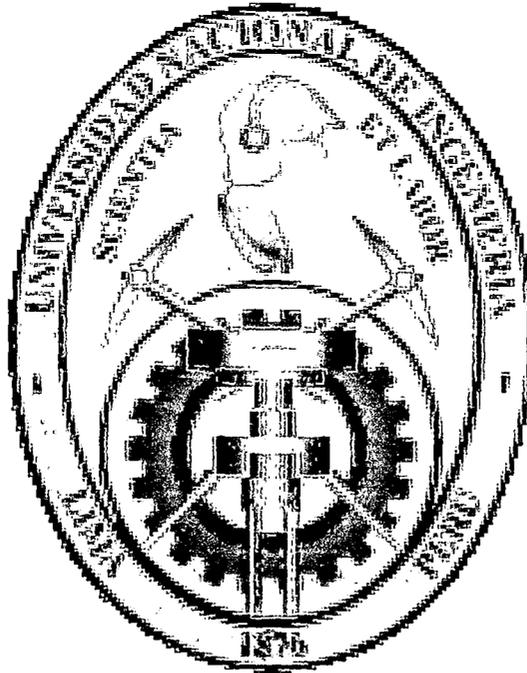


**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**  
**FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL**



***ANÁLISIS DE PRESIÓN EN ENCOFRADOS DE ELEMENTOS VERTICALES DE  
CONCRETO ARMADO CUANDO SE EMPLEA CONCRETO DE ALTA FLUIDEZ***

**TESIS**  
**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**  
**INGENIERO CIVIL**

**PABLO JOHEL PEÑA TORRES**

**LIMA – PERÚ**

**Digitalizado por:**

**2009**

**Consortio Digital del  
Conocimiento MebLatam,  
Hemisferio y Dalse**

## ÍNDICE

	Pag.
RESUMEN	4
LISTA DE CUADROS	6
LISTA DE GRAFICOS	8
LISTA DE FIGURAS	11
INTRODUCCIÓN	13
<b>CAPÍTULO I: MODELOS PROPUESTOS PARA LA EVALUACION DE LA PRESION LATERAL</b>	
1.1 Modelo de Rodin's [1952]	19
1.2 Modelo de Schojdt's [1955]	20
1.3 Modelo propuesto por el ACI	21
1.4 Modelo de Adam et al. [1963]	23
1.5 Modelo de German Standard [DIN 18218, 1980]	24
1.6 Modelo de CIRIA [1965 - 1978]	24
1.7 Modelo de Gardner's [1980 - 1984]	26
1.8 Modelo Francés Standard [NFP 93-350, 1995]	27
<b>CAPÍTULO II: FACTORES QUE INFLUYEN EN LA PRESION LATERAL DEL ENCOFRADO</b>	
2.1 Propiedades de los materiales	29
2.1.1 Composición y contenido de cemento	29
2.1.2 Características del agregado grueso	32
2.1.3 Contenido de agua y relación a/c	34
2.1.4 Adiciones químicas	37
2.2 Nivel de fluidez del concreto	39
2.3 Condiciones de colocación	42
2.3.1 Velocidad de llenado	42
2.3.2 Método de llenado	46
2.3.3 Magnitud de la vibración y tiempo de aplicación para el concreto convencional	48

---

2.3.4 Temperatura del concreto y del medio ambiente	50
2.3.5 Tiempo requerido para desmontar el encofrado	52
2.4 Características del encofrado	54
2.4.1 Dimensiones del encofrado	54
2.4.2 Presencia de refuerzo	55
CAPÍTULO III: SISTEMAS DE MEDICION DE LA PRESION LATERAL	
3.1 Instrumentos y dispositivos para medir la presión lateral	56
3.1.1 Strain Gage	56
3.1.2 Instrumentación para nuestro caso	72
3.1.2.1 Diseño de transductor de presión	72
3.1.2.2 Calibración de transductor de presión	85
3.2 Casos de medidas de presión lateral empleando concreto fluido	120
CAPÍTULO IV: ENSAYO DE PROTOTIPOS EXPERIMENTALES DE PLACAS DE CONCRETO	
4.1 Diseño de experimento	136
4.2 Características del concreto	136
4.3 Características del encofrado	136
4.4 Colocación de los sensores de presión	137
4.5 Condiciones de colocación	137
4.6 Graficas de presión lateral vs. Altura de concreto	138
CAPÍTULO V: ENSAYO DE PROTOTIPOS EXPERIMENTALES DE COLUMNAS DE CONCRETO	
5.1 Diseño de experimento	139
5.2 Características del concreto	139
5.3 Características del encofrado	141
5.4 Colocación de los sensores de presión	141
5.5 Condiciones de colocación	143
5.6 Graficas de presión lateral vs. Altura de concreto	145

---

<b>CAPÍTULO VI: ANALISIS DE RESULTADOS</b>	
6.1 Análisis de columnas	149
6.2 Análisis de placa	152
6.3 Modelamiento matemático del decrecimiento de presión con el tiempo	153
<b>CONCLUSIONES</b>	155
<b>RECOMENDACIONES</b>	157
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	158
<b>ARCHIVOS FOTOGRAFICOS</b>	160

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo, que con mucho esfuerzo y sacrificio se concluyo satisfactoria y exitosamente, principalmente a mis padres que me dieron la vida y han estado conmigo en todo momento. Gracias papá y mamá por darme una carrera para mi futuro y por creer en mí.

A quienes incesablemente contribuyeron, con su sapiencia y gran habilidad:

- Ing. Ana Torre Carrillo, quien me asesoró en el desarrollo de esta tesis.
- Dr. Victor Sanchez Moya, quien me asesoró en el diseño del transductor de presión.
- Ing. Mario Sardon, quien me asesoró en la fabricación e instrumentación del transductor de presión.

A las instituciones y empresas:

- IIFIC, por el apoyo en el financiamiento para desarrollar esta tesis.
- LiderMIX, por la donación que me permitió realizar los ensayos.
- OCI-UNI, por el apoyo para realizar los ensayos en sus instalaciones.

Y finalmente a quienes siempre estuvieron a mi lado dándome ánimos durante el desarrollo de esta tesis.

## RESUMEN

La industria de la construcción es compleja y llena de factores que la hacen muy dinámica, es distinta a la industria manufacturera donde la mayoría de factores que intervienen en ella se pueden limitar, corregir, uniformizar y medir fácilmente. Dichas razones provocan que alcanzar la calidad total en los productos del proceso de construcción sea una tarea difícil, pero no imposible, es así que el proceso de diseño del encofrado no es ajeno a estos problemas principalmente en el caso de concretos de alta fluidez.

Múltiples parámetros tales como la temperatura, dimensiones del encofrado, altura del elemento, velocidad de vaciado, material del encofrado, etc., provocan una serie de incógnitas que pueden traer consigo un mal diseño del encofrado. El problema del diseño de encofrados cuando se emplea concreto de alta fluidez es que este produce mayor presión que cuando se usa un concreto convencional lo que produce una incertidumbre al momento del diseño ya que no hay parámetros de diseño para este caso.

El ACI 347-04 "*Guía de encofrado para Concreto*" no menciona parámetros para el diseño de encofrados cuando se emplee concretos altamente fluidos, lo cual deja al diseñador del encofrado con dos alternativas: el diseño considerando una presión hidráulica o determinando experimentalmente la presión.

Actualmente las empresas constructoras del país tienen este problema en el proceso de diseño ya que en este caso el diseño de los encofrados se hace sobreestimando la presión de diseño lo que produce un mayor costo en la construcción. Considerando que el uso de concretos de alta fluidez es cada vez más común, se justifica la presente investigación, que busca optimizar el diseño del encofrado.

Este trabajo tiene como objetivo optimizar el diseño del encofrado mediante la obtención experimental de diagramas de presiones que se producen en los encofrados de placas y columnas cuando se emplee concreto de alta fluidez.

En la presente tesis se presentará el diseño, fabricación e instalación en obra de un transductor de presión basada en strain gages, mediante el cual se ha monitoreado la presión lateral ejercida por un concreto de alta fluidez en los encofrados.

Se muestra 2 ensayos de columnas monitoreados con los transductores, los cuales permiten determinar la verdadera magnitud de la presión que ejerce un concreto de alta fluidez en los encofrados.

Estos ensayos determinaron que diseñar un encofrado considerando la presión hidráulica es un exceso y genera un sobre costo en la construcción por el sobredimensionamiento de los encofrados. El factor de seguridad determinado en los 2 ensayos es 2 en relación a la presión hidráulica indicada en la Norma ACI347-04.

## LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Factores que influyen en el encofrado	29
Cuadro 2. Relación de fluidez y tiempo necesario de vibrado	48
Cuadro 3. Resumen de cálculos	49
Cuadro 4. Calibración cada 2000 kg/m <sup>2</sup> (T1C)	90
Cuadro 5. Calibración cada 5000 kg/m <sup>2</sup> (T1C)	91
Cuadro 6. Precisión de Transductor (T1C)	91
Cuadro 7. Calibración cada 2000 kg/m <sup>2</sup> (T1L)	92
Cuadro 8. Calibración cada 5000 kg/m <sup>2</sup> (T1L)	93
Cuadro 9. Precisión de Transductor (T1L)	93
Cuadro 10. Calibración cada 2000 kg/m <sup>2</sup> (T1)	94
Cuadro 11. Calibración cada 5000 kg/m <sup>2</sup> (T1)	95
Cuadro 12. Precisión de Transductor (T1)	95
Cuadro 13. Calibración cada 2000 kg/m <sup>2</sup> (T2C)	96
Cuadro 14. Calibración cada 5000 kg/m <sup>2</sup> (T2C)	97
Cuadro 15. Precisión de Transductor (T2C)	97
Cuadro 16. Calibración cada 2000 kg/m <sup>2</sup> (T2L)	98
Cuadro 17. Calibración cada 5000 kg/m <sup>2</sup> (T2L)	99
Cuadro 18. Precisión de Transductor (T2L)	99
Cuadro 19. Calibración cada 2000 kg/m <sup>2</sup> (T2)	100
Cuadro 20. Calibración cada 5000 kg/m <sup>2</sup> (T2)	101
Cuadro 21. Precisión de Transductor (T2)	101
Cuadro 22. Calibración cada 2000 kg/m <sup>2</sup> (T3C)	102
Cuadro 23. Calibración cada 5000 kg/m <sup>2</sup> (T3C)	103
Cuadro 24. Precisión de Transductor (T3C)	103
Cuadro 25. Calibración cada 2000 kg/m <sup>2</sup> (T3L)	104
Cuadro 26. Calibración cada 5000 kg/m <sup>2</sup> (T3L)	105
Cuadro 27. Precisión de Transductor (T3L)	105
Cuadro 28. Calibración cada 2000 kg/m <sup>2</sup> (T3)	106
Cuadro 29. Calibración cada 5000 kg/m <sup>2</sup> (T3)	107
Cuadro 30. Precisión de Transductor (T3)	107
Cuadro 31. Calibración cada 2000 kg/m <sup>2</sup> (T4C)	108
Cuadro 32. Calibración cada 5000 kg/m <sup>2</sup> (T4C)	109
Cuadro 33. Precisión de Transductor (T4C)	109

---

Cuadro 34. Calibración cada 2000 kg/m <sup>2</sup> (T4L)	110
Cuadro 35. Calibración cada 5000 kg/m <sup>2</sup> (T4L)	111
Cuadro 36. Precisión de Transductor (T4L)	111
Cuadro 37. Calibración cada 2000 kg/m <sup>2</sup> (T4)	112
Cuadro 38. Calibración cada 5000 kg/m <sup>2</sup> (T4)	113
Cuadro 39. Precisión de Transductor (T4)	113
Cuadro 40. Calibración cada 2000 kg/m <sup>2</sup> (T5C)	114
Cuadro 41. Calibración cada 5000 kg/m <sup>2</sup> (T5C)	115
Cuadro 42. Precisión de Transductor (T5C)	115
Cuadro 43. Calibración cada 2000 kg/m <sup>2</sup> (T5L)	116
Cuadro 44. Calibración cada 5000 kg/m <sup>2</sup> (T5L)	117
Cuadro 45. Precisión de Transductor (T5L)	117
Cuadro 46. Calibración cada 2000 kg/m <sup>2</sup> (T5)	118
Cuadro 47. Calibración cada 5000 kg/m <sup>2</sup> (T5)	119
Cuadro 48. Precisión de Transductor (T5)	119
Cuadro 49. Sistema de la serie de prueba I – III	124
Cuadro 50. Variación de diseño de mezcla y velocidad de llenado	129

## LISTA DE GRAFICOS

Grafico 1. Presión en el encofrado	28
Grafico 2. Efecto del contenido del cemento en la presión lateral	30
Grafico 3. Efecto del contenido de cemento en la presión lateral	31
Grafico 4. Variación del valor de $P_m/P_p$ con respecto a la concentración del agregado grueso [Amziane y Baudeau (2000)]	33
Grafico 5. Las variaciones de presión relativa con respecto al tiempo transcurrido después del vaciado para mezclas hechas con 10 mm. MSA [Assaad y Khayat, 2005C]	34
Grafico 6. Efecto de $a/c$ sobre las variaciones de presión relativas de SCC hecho con PC-based. - HRWRA [Khayat y Assaad, 2006]	36
Grafico 7. Efecto de $a/c$ sobre las variaciones de presión relativas de SCC hecho con PNS-based. - HRWRA [Khayat y Assaad, 2006]	36
Grafico 8. Efecto del tipo de HRWRA con las variaciones de presión de SCC hecho con una relación de $a/c = 0.36$ . - Khayat y Assaad [2006]	38
Grafico 9. Efecto de VMA tipo y la dosificación sobre las variaciones de presión de SCC hecho con 0.36. - $a/c$ Khayat y Assaad [2006]	39
Grafico 10. Presión máxima relacionada con la trabajabilidad y velocidad de colocación [Rodin, 1952]	40
Grafico 11. El efecto de la fluidez de la mezcla sobre la presión relativa (valores de fluidez mostrados al final de cada prueba) [Assaad y Khayat, 2006]	42
Grafico 12. Efecto de la velocidad de llenado en la presión lateral [Ritchie, 1962B]	43
Grafico 13. Efecto de la velocidad de llenado en la presión lateral [Roby, 1935]	44
Grafico 14. Variación relativa de la presión en el encofrado con a velocidad de llenado para el SCC [Billberg, 2003]	45
Grafico 15. Efecto de la velocidad de llenado sobre la presión relativa en el encofrado con concreto autocompactante [Assaad and Khayat, 2006]	45
Grafico 16. Prueba de mecanismo con la colocación de la medida sujeta y sistema estático [Wolfgang y Stephan, 2003]	47
Grafico 17. Fuerza de presión inferior en relación al nivel de llenado ( $v$ : velocidad de llenado), [Wolfgang y Stephan, 2003]	47
Grafico 18. Presión desarrollada por el concreto vibrado [Stanton, 1937]	49

---

Grafico 19. Efecto de la presión del concreto en la presión lateral [Rodin, 1952]	51
Grafico 20. Efecto de la temperatura del concreto sobre variaciones en presiones relativas medidas en el fondo de la columna de 2800 mm. de alto para SCC (Se muestran valores de fluidez determinados al final del llenado del elemento) [Assaad y Khayat, 2006]	52
Grafico 21. Efecto de anchura de la sección sobre la presión lateral [Khayat et al., 2005A]	55
Grafico 22. Recta de calibración con datos cada 2000 kg/m <sup>2</sup> (T1C)	90
Grafico 23. Recta de calibración con datos cada 5000 kg/m <sup>2</sup> (T1C)	91
Grafico 24. Recta de calibración con datos cada 2000 kg/m <sup>2</sup> (T1L)	92
Grafico 25. Recta de calibración con datos cada 5000 kg/m <sup>2</sup> (T1L)	93
Grafico 26. Recta de calibración con datos cada 2000 kg/m <sup>2</sup> (T1)	94
Grafico 27. Recta de calibración con datos cada 5000 kg/m <sup>2</sup> (T1)	95
Grafico 28. Recta de calibración con datos cada 2000 kg/m <sup>2</sup> (T2C)	96
Grafico 29. Recta de calibración con datos cada 5000 kg/m <sup>2</sup> (T2C)	97
Grafico 30. Recta de calibración con datos cada 2000 kg/m <sup>2</sup> (T2L)	98
Grafico 31. Recta de calibración con datos cada 5000 kg/m <sup>2</sup> (T2L)	99
Grafico 32. Recta de calibración con datos cada 2000 kg/m <sup>2</sup> (T2)	100
Grafico 33. Recta de calibración con datos cada 5000 kg/m <sup>2</sup> (T2)	101
Grafico 34. Recta de calibración con datos cada 2000 kg/m <sup>2</sup> (T3C)	102
Grafico 35. Recta de calibración con datos cada 5000 kg/m <sup>2</sup> (T3C)	103
Grafico 36. Recta de calibración con datos cada 2000 kg/m <sup>2</sup> (T3L)	104
Grafico 37. Recta de calibración con datos cada 5000 kg/m <sup>2</sup> (T3L)	105
Grafico 38. Recta de calibración con datos cada 2000 kg/m <sup>2</sup> (T3)	106
Grafico 39. Recta de calibración con datos cada 5000 kg/m <sup>2</sup> (T3)	107
Grafico 40. Recta de calibración con datos cada 2000 kg/m <sup>2</sup> (T4C)	108
Grafico 41. Recta de calibración con datos cada 5000 kg/m <sup>2</sup> (T4C)	109
Grafico 42. Recta de calibración con datos cada 2000 kg/m <sup>2</sup> (T4L)	110
Grafico 43. Recta de calibración con datos cada 5000 kg/m <sup>2</sup> (T4L)	111
Grafico 44. Recta de calibración con datos cada 2000 kg/m <sup>2</sup> (T4)	112
Grafico 45. Recta de calibración con datos cada 5000 kg/m <sup>2</sup> (T4)	113
Grafico 46. Recta de calibración con datos cada 2000 kg/m <sup>2</sup> (T5C)	114
Grafico 47. Recta de calibración con datos cada 5000 kg/m <sup>2</sup> (T5C)	115
Grafico 48. Recta de calibración con datos cada 2000 kg/m <sup>2</sup> (T5L)	116

---

---

Grafico 49. Recta de calibración con datos cada 5000 kg/m <sup>2</sup> (T5L)	117
Grafico 50. Recta de calibración con datos cada 2000 kg/m <sup>2</sup> (T5)	118
Grafico 51. Recta de calibración con datos cada 5000 kg/m <sup>2</sup> (T5)	119
Grafico 52. Presión del encofrado varía de acuerdo al valor del slump flow.	125
Grafico 53. Diagrama de presión lateral del encofrado bombeado desde la base, inmediatamente después de finalizar el vaciado.	128
Grafico 54. Formas finales de las envolventes de presión para todas las placas de concreto que emplean SCC (Ensayos del No 1-7) y de vibrado convencional del concreto (Ensayo No 8) [Billberg, 2003]	129
Grafico 55. Presión Lateral vs. Tiempo	131
Grafico 56. Altura de concreto vs. Presión Lateral	133
Grafico 57. Tiempo vs. Presión Lateral	134
Grafico 58. Altura de concreto vs. Presión Lateral	135
Grafico 59. Tiempo vs. Presión Medida / Presión Hidrostática	135
Grafico 60. Presión Lateral vs. Altura de concreto	138
Grafico 61. Presión medida en el momento de finalizar el llenado de la columna	145
Grafico 62. Decrecimiento de la presión con el tiempo	145
Grafico 63. Decrecimiento de la presión lateral en el tiempo	146
Grafico 64. Decrecimiento de la presión lateral relativa en el tiempo	146
Grafico 65. Presión medida en el momento de finalizar el llenado de la columna	147
Grafico 66. Decrecimiento de la presión con el tiempo	147
Grafico 67. Decrecimiento de la presión lateral en el tiempo	148
Grafico 68. Decrecimiento de la presión lateral relativa en el tiempo	148
Grafico 69. Presión Lateral vs. Altura (CE1)	149
Grafico 70. Presión Lateral vs. Tiempo (CE1)	150
Grafico 71. Presión Lateral vs. Altura (CE2)	151
Grafico 72. Presión Lateral vs. Tiempo (CE2)	152
Grafico 73. Presión Lateral vs. Altura de concreto	153

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Distribución de la presión del concreto en el encofrado	20
Figura 2. Diagrama de viga sometida a esfuerzo	56
Figura 3. Diagrama de deformación de un elemento	57
Figura 4. Grafica esfuerzo vs. Deformación	58
Figura 5. Strain Gage	59
Figura 6. Strain Gage de filamento	61
Figura 7. Strain Gage de trama pelicular	63
Figura 8. Grafica de la curva del GF	65
Figura 9. Instrumentación típica de un equipo de adquisición de datos	67
Figura 10. Configuración de un cuarto de puente Wheatstone.	67
Figura 11. Puente de Wheatstone	68
Figura 12. Configuración de los strain gages	69
Figura 13. Configuración de medio puente Wheatstone.	70
Figura 14. Espécimen sujeto a tensión.	71
Figura 15. Configuración de puente Wheatstone completo	71
Figura 16. Distribución de esfuerzos en el diafragma empotrado	73
Figura 17. Vishay Micro-Measurements diafragma de strain gages para transductores de presión	74
Figura 18. Diafragma típico, configuración para transductor de presión.	77
Figura 19. Modelo computarizado del Transductor de Presión	80
Figura 20. Transductor de Presión hecho de Aluminio	80
Figura 21. Plano del transductor de presión	81
Figura 22. Envoltente de momento de una sección doblemente empotrada	83
Figura 23. Envoltente de deformación unitaria del transductor	84
Figura 24. Ubicación de los strain gages en el transductor	84
Figura 25. Vista externa del adaptador realizada para la calibración	85
Figura 26. Vista interna del adaptador realizada para la calibración	85
Figura 27. Plano del calibrador para el transductor de presión	86
Figura 28. Strain Indicator	87
Figura 29. Transductor de presión y equipo de calibración	88
Figura 30. Transductor de presión conectado al equipo pre calibrado	88
Figura 31. Equipo de calibración con una lectura de $0 \mu\epsilon$	89

Figura 32. Modulando la presión para la calibración del transductor	89
Figura 33. Sensores de Presión colocados en los encofrados (a) y la grafica de la Presión Medida vs. Altura de concreto (b)	120
Figura 34. Estructuración de prueba para medidas de presión en laboratorio (Placa 2.70 × 0.75 × 0.20 m) [Andreas and Cathleen, 2003]	126
Figura 35. Encofrado de placa para pruebas que usan SCC bombeado de la base	127
Figura 36. Encofrado de 8.5m de alto de la pared firme [Tejeda-Dominguez, 2005]	132
Figura 37. Se colocó en la pared 7 sensores de presión.	133
Figura 38. Encofrado de 3.2m de alto de la columna circular [Tejeda-Dominguez, 2005]	134
Figura 39. Slump flow del concreto autocompactante	136
Figura 40. Diagrama de la localización de los sensores en la placa	137
Figura 41. Placa experimental	138
Figura 42. Concreto Reoplastico	139
Figura 43. Concreto Autonivelante	140
Figura 44. Diagrama de la localización del transductores en el encofrado	141
Figura 45. Diagrama de la localización de los transductores en el encofrado.	142
Figura 46. Pasos seguidos para la colocación de los transductores en el encofrado.	142
Figura 47. Transductores colocados en el encofrado.	143
Figura 48. Ubicación de los transductores en el encofrado (CE1)	144
Figura 49. Ubicación de los transductores en el encofrado (CE2)	144
Figura 50. Envoltorio de presión lateral	153
Figura 51. Decrecimiento de la presión lateral	154
Figura 52. Placa de Concreto Armado (GyM- Edificio Capital)	160
Figura 53. Columna de Concreto Armado (GyM- Edificio Capital)	160
Figura 54.- Columna de Concreto Armado	161
Figura 55.- Columna de Concreto Armado	161
Figura 56.- Encofrado modificado	162
Figura 57.- Colocación del transductor en el encofrado	162
Figura 58.- Mixer de la empresa LIDERMIX	163
Figura 59.- Llenado de la columna de concreto	163

## INTRODUCCIÓN

La tecnología del concreto ha avanzado a un paso relativamente lento asociado a una industria de mano de obra intensa y una colocación tediosa en el encofrado. Dentro de los dos hitos que han tenido gran impacto al propulsar esta industria destacan la introducción de superplastificantes y el desarrollo de concretos autocompactantes (SCC).

Los concretos de alta fluidez son clases relativamente nuevas de concreto de alto desempeño que fluye fácilmente bajo su propio peso y se consolida sin el uso de vibraciones mecánicas y con riesgo mínimo de segregación debido a un equilibrio entre la tensión estática y la viscosidad. El SCC es un sistema complicado pues es usualmente logrado con un número de mezclas químicas y aditivos. Este concreto exhibe baja resistencia para fluidificarse y moderar la viscosidad plástica necesaria para mantener la deformación homogénea durante la colocación y luego hasta el principio del fraguado.

Las ventajas obtenidas al utilizar concretos de alta fluidez pueden ser resumidas como sigue:

- La disminución en el costo de la construcción debido a la reducción de personal.
- La reducción en el tiempo de la construcción.
- La simplificación del proceso de vaciado debido a que no es necesaria ninguna vibración.
- La mejora de condiciones de trabajo debido a la menor contaminación sonora.
- La facilidad para vaciar elementos estructurales congestionados y complicados en dimensiones y formas diversas que no son alcanzables por cualquier otra técnica convencional.
- La habilidad para distribuir el concreto en áreas que representan dificultades para la colocación, y la consolidación.

Como resultado se mejora la apariencia y calidad de las superficies acabadas y la reducción en la ocurrencia de cangrejas, y otras imperfecciones de la superficie. Además se le reconoce otros beneficios tales como:

- Producción de un mejor concreto y mejor producto.
- Permitir una mayor variedad de formas arquitectónicas usando cualquier forma de encofrados. Éste es una de las ventajas principales de los concretos de alta fluidez al lograr un vaciado con densidad estructural y elementos de refuerzo en una geometría complicada que de otra manera no es alcanzable por cualquier otra técnica convencional [Khayat et al, (2001), Walraven, (2002), Okamura and Ouchi, (2003), Mullarky and Vaniker, (2002)].
- Reducción de las presiones de bombeo, y como consecuencia, disminución del deterioro de las bombas, expandiendo su vida útil.

A pesar de los beneficios anteriormente mencionados que se gana al utilizar SCC, hay algunas limitaciones que deberían ser tomadas en cuenta cuando se utiliza esta clase de concreto, tales como:

- El costo de las materias primas de SCC pueden ser de 13% a 30% más alto que el costo de mezclas convencionales con propiedades mecánicas similares Schlagbaum, [2002], Martin, [2002]. No obstante, el análisis de costos muestra que aun si el costo de venta de SCC es disminuida sólo un escaso porcentaje por la disminución en el trabajo y el tiempo de la construcción, la rentabilidad es aumentada cerca de 10% [Szecsy et al., (2002)].
- El SCC requiere de medidas de control de calidad mayores y de comprobación de calidad que aseguren la viabilidad correcta, la resistencia alta inclusive para la segregación y la estabilidad de desplazamiento no exterioricen espacios vacíos.
- El SCC tiene potencial mayor pues la contracción, el desplazamiento y el cuidado deberían ser acogidos diseñando los elementos de concreto. El riesgo mayor de contracción y desplazamiento provienen del uso de un gran volumen de materiales finos, particularmente en el caso de SCC sin cualquier VMA, y el contenido inferior de agregado grueso.
- La falta de conocimiento en la presión lateral relativa que el SCC podría ejercer en los sistemas del encofrado. Este efecto adverso puede comprometer la rentabilidad, debido a la necesidad a diseñar una estructura robusta del encofrado e impermeabilización detallada de la junta.

De las ventajas mostradas anteriormente, los incentivos máximos para la industria en adoptar esta tecnología están relacionados a la rentabilidad

potencial causada al acortar el tiempo de llenado, reducción de logística laboral, minimizada debido a la eliminación de la necesidad de vibraciones, y la producción de superficies estéticas con calidad alta. A su vez, una velocidad alta de llenado de concreto en un sistema del encofrado conduce a un incremento en la presión lateral ejercida por el concreto, lo cual podría producir valores hidráulicos de presión. Tal presión alta es atribuida a dos factores:

(i) El bajo esfuerzo estático inicial del SCC en estado plástico, y (ii) La velocidad de llenado vertical en el encofrado que excede la velocidad de fraguado del concreto en el encofrado.

Los sistemas del encofrado para elementos de placas y de columnas contribuyen un 16% del costo de una construcción a nivel de casco y aproximadamente un 6% del costo total de la construcción a nivel de acabados. Cualquier ahorro en el costo de encofrado, por ejemplo reduciendo las cargas del diseño afectando presión lateral ejercida por concreto en estado plástico, sería de gran interés. La presión relativamente alta y lateral ejercida por concretos de alta fluidez se considera el obstáculo especializado principal que retarda el uso común de los concretos de alta fluidez en aplicaciones utilizadas en obra. Esta presión lateral ejercida por el concreto incumbe a ingenieros de la construcción porque su sobre-estimación resulta en encofrados costosos, mientras su subestimación puede conducir a abultamiento del encofrado o, en los casos extremos, al fracaso del sistema del encofrado.

Adicionalmente, la presión alta del encofrado presenta un tema principal de seguridad. Como la presión lateral del concreto aumenta, así también existe el riesgo potencial de un fracaso. Las disposiciones actuales, la responsabilidad para la construcción segura de encofrado. Las disposiciones en la norma ACI 347-04 estipula que al trabajar con mezclas con características altas de fluidez, semejantes al SCC, la presión lateral debería ser igual a la presión hidrostática del concreto fresco. De modo semejante, la European Federation of Producers y Contractors of Specialist Products for Structures (EFNARC) recomienda que los encofrados con alturas mayores a 3m sean diseñados con una presión hidrostática EFNARC, [2002].

Hasta la fecha, existe una información limitada referente a la magnitud de la presión lateral que se desarrolla por el Concreto de alta fluidez en placas verticales y elementos de una columna. Los contratistas y los ingenieros reconocen que las recomendaciones están elaboradas para diseños con el uso de concreto de consistencia normal, lo cual no puede ser aplicado para Concretos de alto rango debido al nivel mayor de fluidez que podría resultar en una presión lateral cumpliendo presiones hidrostáticas en la altura total del encofrado. Por consiguiente, existiendo ecuaciones para estimar una presión lateral es necesario que el diseño del encofrado sea modificado y adaptado para dar explicación a la alta fluidez del SCC. Hasta ahora, el encofrado es diseñado prudentemente considerando que el concreto de alta fluidez ejerce presión hidrostática en la altura total del encofrado hasta el momento de la colocación. Tal presión es expresada como:  $P_{max} = \rho \times G \times H$  donde:  $\rho$ ,  $G$ , y  $H$  son propias del peso unitario del concreto, la gravedad, y la altura de concreto, respectivamente. Este acercamiento puede resultar en aumentos de costos de la construcción y puede limitar la velocidad de llenado en el encofrado. El diseño para los valores altos de presión hidrostática toma una construcción robusta del encofrado y una junta de sellado detallada, lo cual podría afectar adversamente a la rentabilidad.

La tesis revisa las normas existentes y la presión del encofrado influenciada por parámetros relevantes, propiedades del concreto, el diseño de mezcla del concreto, las condiciones de colocación, las características del encofrado que tienen influencia en la presión máxima del encofrado y su variación con el tiempo.

Esta tesis estará también sustentada con los ensayos realizados en obra y sus resultados que se generaron con los transductores de presión implementados en el Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Civil de la UNI y su equipo de investigación.

## **Capítulo 01**

En este capítulo hago un listado de las normas existentes para la evaluación de la presión lateral en los encofrados, los parámetros más relevantes considerados por cada norma y las formulas planteadas en cada una de ellas. Aquí se muestra la norma propuesta por el ACI, la cual es usada en nuestro medio para el diseño de encofrados.

## **Capítulo 02**

En este capítulo muestro los factores más relevantes en el análisis de presión en encofrados, los registros que se muestran para cada factor son los dados por los investigadores que en la actualidad están desarrollando este tema.

## **Capítulo 03**

En este capítulo muestro el diseño y fabricación de un transductor de presión basado en strain gages. También muestro algunos ensayos realizados anteriormente en EEUU, Canadá y Europa.

## **Capítulo 04**

En este capítulo muestro un ensayo de una placa de concreto armado cuando se utilizó concreto autocompactante, se muestra la ubicación de los sensores de presión y la grafica de presión obtenida.

## **Capítulo 05**

En este capítulo muestro 02 ensayos de columnas realizadas en la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) en el cual se utilizo concreto de alta fluidez, se muestran la ubicación en el encofrado de los transductores de presión fabricados en el IIFIC-UNI y el monitoreo de la presión lateral. La colocación del concreto se hizo con una bomba hidráulica para tener la certeza de tener una velocidad constante de llenado.

## Capítulo 06

En este capítulo se realiza un análisis de resultados de los ensayos mostrados en los capítulos 04 y 05 basado en las graficas de presión lateral vs. altura y presión lateral vs. tiempo. También se muestra un modelamiento de la presión lateral apoyada en lo propuesto por el PhD. David A. Lange et al.

## CAPÍTULO I: MODELOS PROPUESTOS PARA LA EVALUACION DE LA PRESION LATERAL EN ENCOFRADOS

Varias ecuaciones han sido propuestas para evaluar la magnitud y la forma de cómo se genera la presión lateral. Algunos de estos modelos elaborados para estimar la presión del encofrado para el concreto convencional y pocos estudios recientes que evalúan la presión del encofrado cuando se usa concreto de alta fluidez, se resumen a continuación.

### 1.1 Modelo de Rodin's [1952]

Rodin [1952] publicó datos experimentales sobre la presión lateral del concreto fresco en el encofrado. Concluyó que los factores principales que influyen en la presión lateral son la velocidad de llenado, la vibración, la consistencia del concreto y las proporciones del concreto, la temperatura del concreto, el tiempo de vaciado, y el tamaño del encofrado. Rodin [1952] publicó que el encofrado debería ser diseñado según dos casos: concreto vibrado por fuera y no vibrado por fuera. El caso último por consiguiente fue dividido en dos categorías: concreto internamente vibrado y concreto colocado a mano. Se muestra la distribución de presión del concreto sobre el encofrado como propuesto por Rodin [1952] en la Fig. 1. Los detalles de los dos casos pueden ser expresados así:

#### Para vibrados exteriores de concreto

El encofrado debería ser diseñado para la presión hidrostática de un líquido que tiene la misma densidad que el concreto.

#### Para vibrados no exteriores de concreto

Para concretos internamente vibrados  $P_{max} = 23.4 H_{max}$  .....(1)

Para concretos colocados a mano  $P_{max} = 17.2 H_{max}$  .....(2)

Donde,  $H_{max}$ : Altura en la cual ocurre la máxima presión, m.

$$H_{max} = 1.63R^{1/3} \dots\dots\dots(3)$$

Pmax: Máxima presión lateral, kPa.

R: Velocidad de llenado, m/h.

Nota: Estas ecuaciones son para el concreto de proporciones 1:2:4 de cemento: arena: piedra, un peso unitario de 2,400 kg/m<sup>3</sup>, una consistencia de 150 mm, y una temperatura de 21 °C.

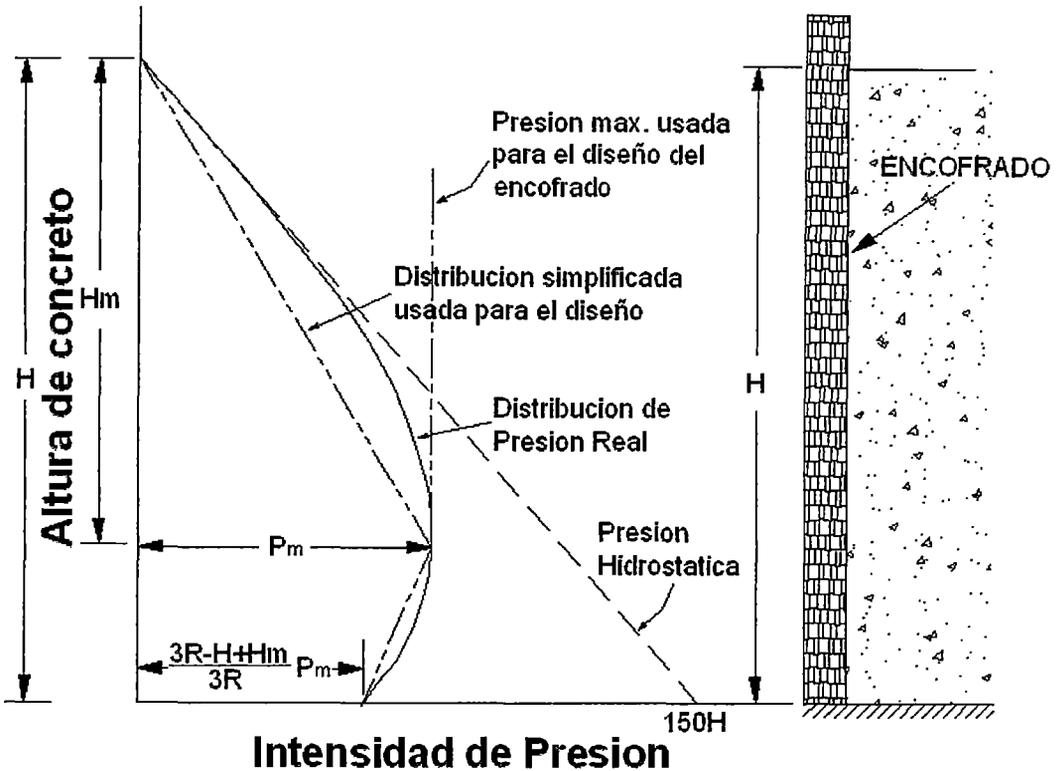


Figura 1.- Distribución de la presión del concreto en el encofrado

1.2 Modelo de Schojdt's [1955]

Schojdt [1955] desarrolló un modelo teórico para determinar la envolvente de presión utilizando los conceptos de mecánica de suelo, incluyendo la presión de poros de agua y el coeficiente de presión lateral. Los factores considerados en la derivación de Schojdt son la velocidad de llenado, la profundidad sumergida del vibrador, el tiempo de llenado, la consistencia, la permeabilidad del encofrado, y el tamaño del encofrado. El método de Schojdt no recibió la aceptación debido a

su complejidad y la exigencia de determinar las propiedades de fuerza del concreto fresco.

### 1.3 Modelo propuesto por el ACI

El American Concrete Institute (ACI) Comité 622 [1958] (actualmente llamado ACI 347) en la “*Guía de Encofrado para Concreto*” propuso que el diagrama de presión lateral que se asume sea de forma trapezoidal: Se presume que el diagrama es una distribución triangular en la superficie libre superior de la fundición hasta alguna profundidad limitativa, más allá del cual el valor de presión a la que se llegó es considerado constante hasta el fondo del encofrado. Las variables significativas consideradas en las recomendaciones ACI son la velocidad de vaciado, la consistencia del concreto, la concentración del agregado grueso, el tamaño nominal del agregado, la temperatura del concreto, la uniformidad y permeabilidad del material del encofrado, tamaño y forma del encofrado, método de consolidación, la presión de agua de poro, el contenido y tipo de cemento, así como también la profundidad de la colocación del concreto, o altura de concreto.

Las ecuaciones del ACI son mostradas junto con la limitación de uso, en los siguientes párrafos.

#### Para Placas:

$R < 2.1 \text{ m/h}$

$$H \leq 4.2 \text{ m.} \quad P_{\max} = C_w.C_c. \left[ 7.2 + \frac{785R}{17.78 + T} \right] \dots\dots\dots(4)$$

$$H > 4.2 \text{ m.} \quad P_{\max} = C_w.C_c. \left[ 7.2 + \frac{1156}{17.78 + T} + \frac{244R}{17.78 + T} \right] \dots\dots\dots(5)$$

Con un mínimo de  $30C_w.kPa$ , pero en ningún caso mayor que  $\gamma_c.H$

2.1 < R < 4.5 m/h

$$P_{max} = C_w.C_c. \left[ 7.2 + \frac{1156}{17.78+T} + \frac{244R}{17.78+T} \right] \dots\dots\dots(6)$$

Con un mínimo de 30C<sub>w</sub>.kPa, pero en ningún caso mayor que γ<sub>c</sub>.H

R > 4.5 m/h

$$P_{max} = \gamma_c.H \dots\dots\dots(7)$$

**Para Columnas:**

$$P_{max} = C_w.C_c. \left[ 7.2 + \frac{785R}{17.78+T} \right] \dots\dots\dots(8)$$

Con un mínimo de 30C<sub>w</sub>.kPa, pero en ningún caso mayor que γ<sub>c</sub>.H

donde P<sub>max</sub> : presión lateral máxima, kPa;

R : velocidad de vaciado, m/h;

T : temperatura del concreto, °C;

H : altura del concreto, m. ;

γ<sub>c</sub> : peso unitario del concreto, kg/m<sup>3</sup>;

C<sub>w</sub> : coeficiente de peso unitario calculado así:

$$C_w = 0.5 \left[ 1 + \frac{\gamma_c}{2320} \right] \text{ pero } \geq 0.8 \quad \text{para } \gamma_c < 2240 \text{ kg / m}^3$$

$$C_w = 1.0 \quad \text{para } 2240 \text{ kg / m}^3 < \gamma_c < 2400 \text{ kg / m}^3$$

$$C_w = \frac{\gamma_c}{2320} \quad \text{para } \gamma_c > 2400 \text{ kg / m}^3$$

C<sub>c</sub> : coeficiente químico calculado así:

C<sub>c</sub> = 1.0 para el cemento tipo I o III sin retardante

C<sub>c</sub> = 1.2 para cemento mezclado sin retardante (medio mezclado: cemento tipo I con < 70% de escoria o < 40% de reemplazo en cenizas volantes).

C<sub>c</sub> = 1.4 para el cemento mezclado con retardante (retardante se refiere a adicionar reductores de agua, o superplastificantes).

**Nota:**

En 2002, Hurd reconoció que tales ecuaciones son demasiado conservadoras para ser utilizadas en la actualidad, ya que resultaría muy costoso el encofrado. Esto es debido a la evolución en la composición de las mezclas de concreto, principalmente con la introducción de mezclas químicas y los reemplazos de cemento portland. La consolidación y las técnicas de colocación también han experimentado cambios significativos con el uso de concreto fluido y altamente fluido. Hurd [2002] propuso aplicar algunos coeficientes a las ecuaciones ACI 1958 para tener en cuenta pesos unitarios diferentes que se encontró en el sitio de trabajo, así como también las mezclas químicas y los aditivos.

**1.4 Modelo de Adam et al. [1963]**

Adán et al. [1963] realizó pruebas de laboratorio sobre placas que miden 3 m de altura, 2.5 m de longitud, y de anchuras variables. Adán et al. [1963] estudió el efecto del tipo de cemento, aditivos, el tamaño del agregado, velocidad de vaciado, la consistencia del concreto, y la vibración sobre la presión del encofrado. Los resultados de este estudio son resumidos así:

Para $R < 2$ m/h	$P_{max} = 19.6 + 12.3R$	$T < 5$ °C	..... (9)
	$P_{max} = 19.6 + 9.8R$	$T = 15$ °C	..... (10)
	$P_{max} = 19.6 + 8.3R$	$T > 25$ °C	..... (11)
Para $R > 2$ m/h	$P_{max} = 40.1 + 1.96R$	$T < 5$ °C	..... (12)
	$P_{max} = 35.3 + 1.96R$	$T = 15$ °C	..... (13)
	$P_{max} = 32.4 + 1.96R$	$T > 25$ °C	..... (14)

donde;  $P_{max}$  : máxima presión lateral, kPa;  
 $R$  : velocidad de vaciado, m/h; y  
 $T$  : temperatura del concreto, °C;

### 1.5 Modelo en estándares alemanes [DIN 18218, 1980]

El DIN 18218 presentó una serie de ecuaciones para calcular las presiones restrictivas laterales del concreto internamente vibrado hecho con varios niveles de consistencia y temperatura de 15 °C [Eq. (15) o Eqs. (16)]. Para adaptarse a temperaturas variables de concreto, recomiendan disminuir la presión restrictiva (desarrollado para el concreto en 15 °C) en el 3 % para cada grado encima de 15 °C y aumentarlo en el 3 % para cada grado debajo de 15 °C.

- Para concreto vaciado a T = 15 °C:

$$P_{max} = \gamma_c C_2 K_t (0.48R + 0.74) \dots\dots\dots (15)$$

$$\left( \begin{array}{l} P_{max} = 21 + 5R \dots \text{Para mezclas tiesas} \\ P_{max} = 19 + 10R \dots \text{Para mezclas suaves} \\ P_{max} = 18 + 14R \dots \text{Para mezclas fluidas} \end{array} \right) \dots\dots\dots (16)$$

- Para concreto vaciado a T < 15 °C: Aumento del 3 % de Pmax para cada grado debajo 15 ° C.
- Para concreto vaciado a T > 15 °C: Disminución del 3 % en Pmax para cada grado encima de 15 ° C.

donde; Pmax : máxima presión lateral, kPa;

$\gamma_c$  : peso unitario del concreto, kg/m<sup>3</sup>;

C2: coeficiente añadido;

Kt: coeficiente de temperatura = (145 – 3R)/100

R : velocidad de vaciado, m/h; y

T : temperatura del concreto, °C;

### 1.6 Modelo de CIRIA [1965 - 1978]

The Construction Industry Research and Information Association (CIRIA) patrocinaron una investigación de campo en gran escala de presiones en el

encofrado realizadas por la Asociación de Cemento y Concreto que fueron publicados en 1965. El estudio de CIRIA propuso un método de diseño de presión lateral que implicó la consideración de la velocidad de llenado, la temperatura del concreto, consistencia del concreto, materiales constituyentes del concreto, el peso unitario del concreto, dimensiones y forma del encofrado, y la continuidad de vibración. El procedimiento de diseño de CIRIA consideró que la envolvente de presión lateral es hidrostática hasta un valor máximo ( $P_{max}$ ) limitado por el inicio de fraguado del concreto y los efectos de arqueo, como dado por las dos ecuaciones debajo. En secciones estrechas, fue encontrado que la fricción de la placa puede limitar considerablemente la máxima presión ejercida [CIRIA, 1965]. En 1978, CIRIA publicó una carta de diseño de dos páginas para sustituir estas ecuaciones.

- Para arqueo

$$P_{max} = 14.37 + 0.094d + 3.14R < 24H \text{ o } 143.7 \dots\dots\dots (17)$$

- Para concreto endurecido

$$P_{max} = \frac{\gamma_c RT}{1 + c \left( \frac{t}{t_{max}} \right)^4} + (4.6 + 1.89R) < 24H \text{ o } 143.7 \dots\dots\dots (18)$$

- Formula General

$$P_{max} = \gamma_c \left[ C_1 \sqrt{R} + C_2 K \sqrt{H - C_1 \sqrt{R}} \right] > \gamma_c h \dots\dots\dots (19)$$

- donde;  $P_{max}$  : máxima presión lateral, kPa;
- d :      dimensión mínima del encofrado, mm;
  - R :      velocidad de vaciado, m/h;
  - T :      temperatura del concreto fresco, °C;
  - t :      tiempo después de iniciado el vaciado, h;
  - tmax: tiempo de endurecimiento, h;
  - c :      tiempo de vibración;

- $\gamma_c$  : peso unitario del concreto, kg/m<sup>3</sup>;  
 H: altura vertical del encofrado, m;  
 h: altura de concreto fresco sobre el punto considerado, m;  
 C1 : coeficiente dependiente de la forma y tamaño del encofrado ( =1.0 en placas).  
 C2 : coeficiente dependiente de los materiales que constituyen el concreto ( = 0.3 – 0.6 );  
 K : coeficiente de temperatura tomado como  $\left( \frac{36}{T + 16} \right)^2$ ; y

(c y tmax son definidos empíricamente)

### 1.7 Modelo de Gardner's [1980 - 1984]

Gardner [1980] realizó estudios de laboratorio que usan una gran instrumentación en el encofrado. Las variables consideradas por Gardner [1980] son la profundidad de vibración, la fuerza de vibrado, la velocidad de vaciado, la temperatura del concreto, las dimensión del encofrado, y la consistencia del concreto. Para objetivos de diseño de encofrados, Gardner [1980] consideró que la envolvente de presión lateral es bilineal. La envolvente es hidrostática en la superficie libre a un valor máximo a partir de entonces se hace constante hasta el inferior. Las ecuaciones propuestas son así:

$$P_{\max} = 24h_i + \frac{3000HP}{d} + \frac{d}{40} + \frac{400\sqrt{R}}{18+T} + \frac{S-75}{10} < 24H \quad \dots\dots\dots (20)$$

Donde; Pmax : máxima presión lateral, kPa;

- H: altura total del encofrado, m;  
 hi : profundidad sumergida del vibrador debe ser mayor que 1m, m;  
 d : dimensión mínima del encofrado, mm;  
 HP : potencia del vibrador;  
 R : velocidad de vaciado, m/h;  
 T : temperatura del concreto, °C; y  
 S : slump después del uso del superplastificante, mm.

Con una investigación subsiguiente que usa el mismo equipo, Gardner [1982, 1984] investigó el efecto de incorporar superplastificante y materiales suplementarios cementicios; ceniza volante tipo F, y escoria de alto horno sobre presión lateral. Fue encontrado que aquel reemplazo (suplente) de cemento parcial de cemento portland por la ceniza volante o la escoria de alto horno puede aumentar la movilidad del concreto y disminuye la velocidad del aumento de presión a temprana edad, así causando un aumento de la presión del encofrado. Un factor adicional fue presentado en la susodicha ecuación para representar la ceniza volante y sustituciones de escoria. Mostraron la ecuación para dar valores de diseño conservadores para el concreto de ceniza volante.

$$P_{\max} = 24h_i + \frac{3000HP}{d} + \frac{d}{40} + \frac{400\sqrt{R}}{18+T} \left( \frac{100}{100-\%F} \right) + \frac{S-75}{10} < 24H \dots\dots\dots (21)$$

Donde:

F: porcentaje de sustitución de cemento por ceniza volante tipo F o escoria de alto horno.

**1.8 Modelo Francés Standard [NFP 93-350, 1995]**

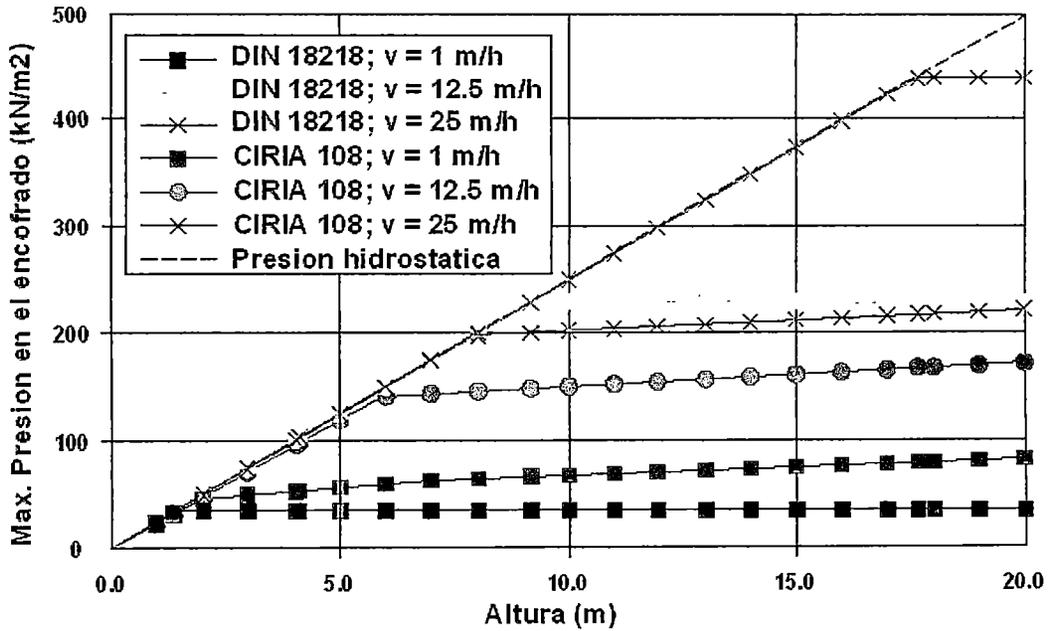
El French Standard [NF P93-350, 1995] publicó que el encofrado debe ser diseñado para soportar fuerzas en el dominio elástico debido a la colocación de concreto convencional con una densidad de 2,400 kg/m<sup>3</sup>. La ecuación siguiente da a la presión máxima lateral ejercida:

$$P_{\max} = 2400.g.H < 72 \text{ kPa en el fondo} \dots\dots\dots (22)$$

Donde: g: aceleración gravitacional;  
 H: altura del encofrado, m.

Una comparación de las envolventes de presiones laterales que pueden ser obtenidos de ecuaciones de diseño ofrecidas por el DIN 18218, CIRIA 108, Y NFP93-350 modelos para el concreto convencional vibrado con la consistencia es presentada en la Fig. 2. Estos resultados son trazados para el concreto fresco que tiene un peso unitario ( $\gamma_c$ ) de 2,500 kg/m<sup>3</sup>, la temperatura (T) de 15 °C, y un

tiempo final de fraguado ( $t_E$ ) de 5h en velocidades de llenado de 1 a 25 m/h en una placa que mide 20 m en la altura. Los datos muestran la influencia de la velocidad de llenado sobre la envolvente de presión. Según el modelo DIN 18218, el aumento de la velocidad de llenado de 1 a 12.5 y 25 m/h conduciría al diseño lineal de la envolvente de presión igual a la presión hidrostática en los 1.5, 9, y 18m de la placa, respectivamente. Estos valores son aproximadamente 1.5, 6, y 8 m, respectivamente, para el modelo de diseño de CIRIA 108.



**Gráfico 1.** - Presión en el encofrado - DIN 18218(D), CIRIA 108(GB) y NF P93-350(F) [Proske y Graubner, 2002]

## CAPÍTULO II: FACTORES QUE INFLUYEN EN LA PRESIÓN LATERAL DEL ENCOFRADO

Desde principios de los años 1900, numerosas investigaciones de laboratorio y de campo fueron realizadas para proporcionar el amplio entendimiento de las variables que pueden afectar la presión lateral del concreto fresco. El Comité del ACI 622 [1958] estudió todas las investigaciones publicadas de campo y de laboratorio sobre presión lateral desarrollada sobre el encofrado. Los factores claves que pueden influir en la presión lateral del encofrado debido al concreto son resumidos en la Cuadro 1. Estos factores son mencionados con un énfasis especial, debido a que ejerce mayor presión sobre el encofrado ejercida por concreto de alta fluidez.

**Cuadro 1: Factores que influyen en el encofrado**

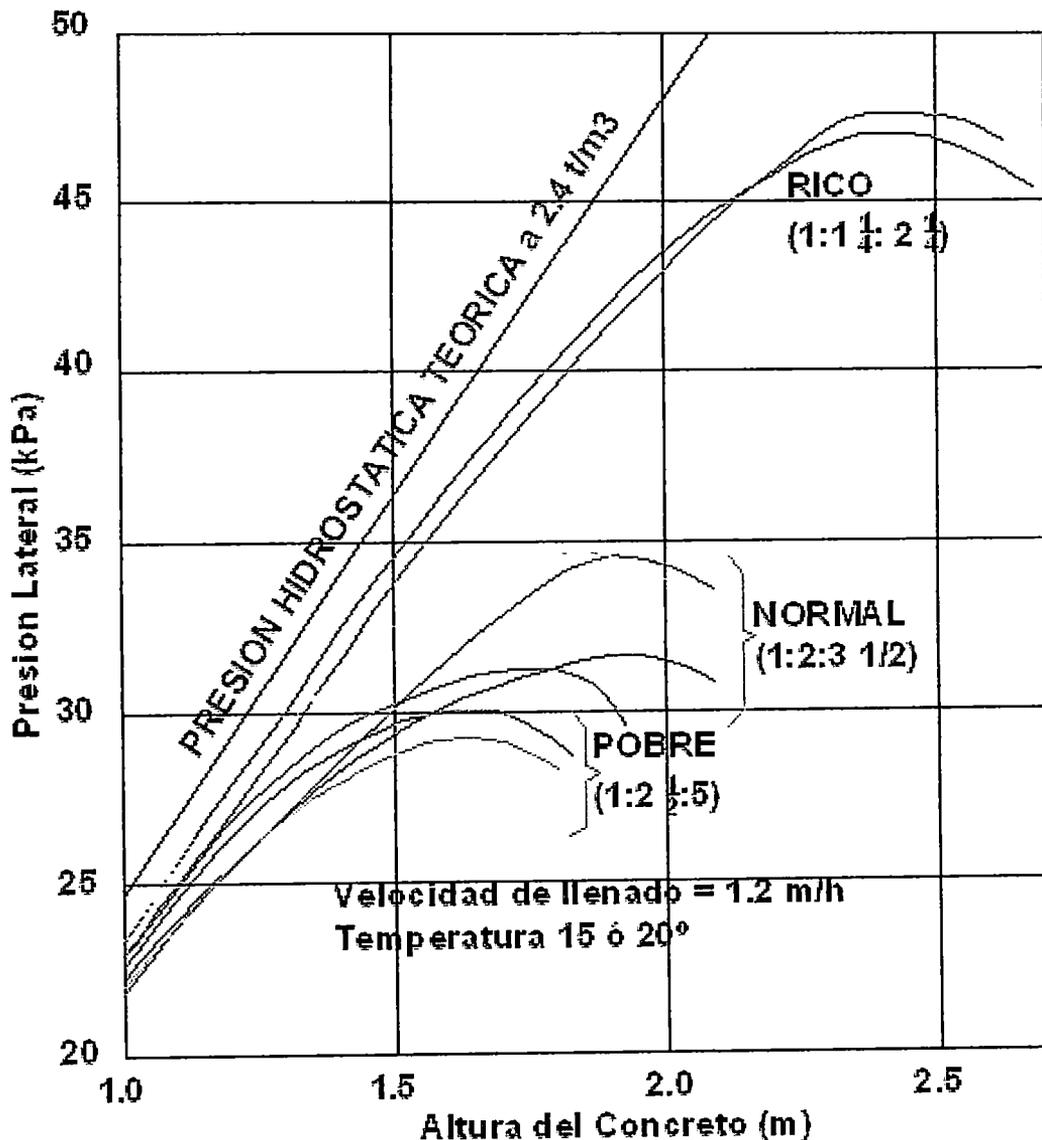
1. Primer Orden	2. Segundo Orden	3. Tercer Orden
1.1 Velocidad de Vaciado	2.1 Tiempo de fraguado	3.1 Tipo de vaciado
1.2 Densidad del concreto	2.2 Cemento - Aditivos	3.2 Agregados y tamaño máximo de grano
1.3 Tipo de compactación	2.3 Presión de poros de agua	3.3 Tipo de cemento
1.4 Tipo de vibración/ Profundidad de vibración	2.4 Tiempo de vibración	3.4 Temperatura del ambiente
1.5 Consistencia del concreto	2.5 Diseño del encofrado	3.5 Altura de vaciado y total
1.6 Temperatura del concreto fresco	2.6 Permeabilidad del encofrado	3.6 Construcción de refuerzo

### 2.1 Propiedades de los materiales

#### 2.1.1 Composición y contenido de cemento

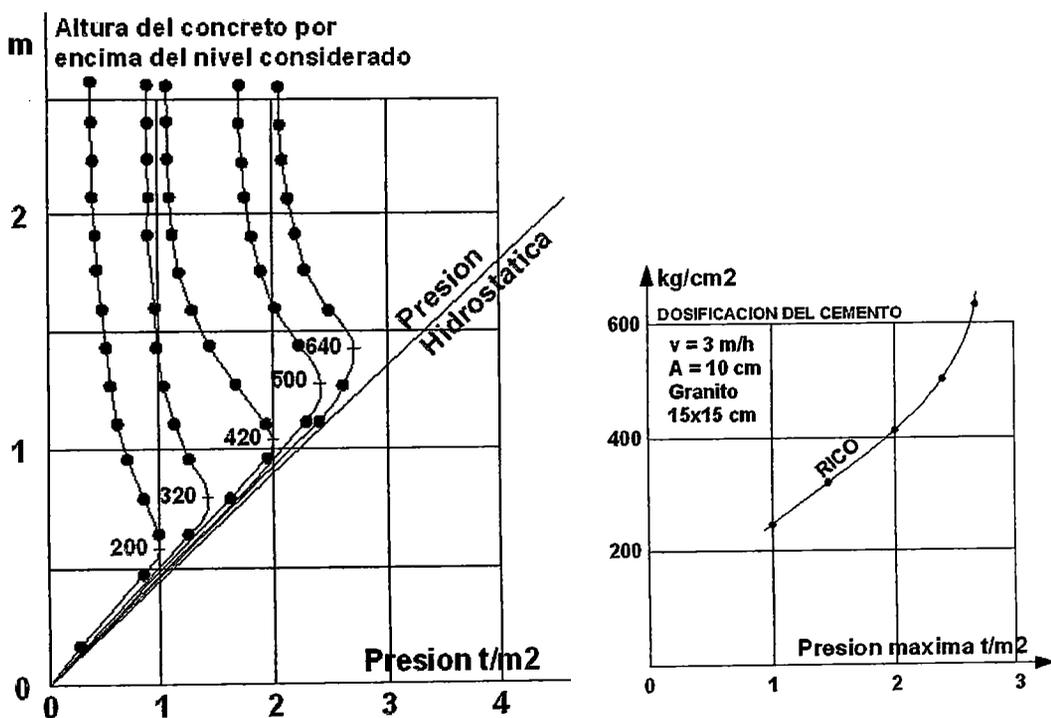
El contenido de cemento, el tipo de cemento, el empleo de aditivos y rellenos tienen la influencia significativa sobre el desarrollo de la presión lateral ejercida por el concreto convencional vibrado y concreto autocompactante. Roby [1935]

investigó una serie de mezclas ricas, normales, y pobres hechas con el conjunto de cemento: arena: piedra de diferentes proporciones de masas de 1:1.25:2.25, 1:2:3.5, y 1:2.5:5, respectivamente (Grafico 2). Fue usado un cemento portland ordinario, y los valores de fluidez de las mezclas varían entre 50 y 150 mm. El autor público que el contenido de cemento tiene un efecto significativo sobre la presión lateral ya que mezclas con proporciones altas de cemento desarrollaron una presión mayor del 40% que las mezclas normales, que a su vez, desarrolló una presión mayor de aproximadamente 15% que él de las mezclas pobres.



**Grafico 2.- Efecto del contenido del cemento en la presión lateral**

Asimismo Ritchie [1962B] intentó determinar el efecto del cemento portland sobre la envolvente de presión lateral para concretos convencionales que tienen una fluidez de 100 mm a una velocidad de 3 m/h. El contenido de cemento varía de 200 y 640 kg/m<sup>3</sup>. Como está indicado en el Grafico 3, las mezclas preparadas con el contenido de cemento más alto desarrollaron la mayor presión lateral. Roby [1935] y Ritchie [1962B] concluyó que tal aumento de la presión lateral que es resultado del empleo de más cemento indirectamente puede ser relacionado con el hecho que tal concreto contiene un menor volumen de agregado grueso. La interferencia causada por altas partículas de agregado puede aumentar el grado de fricción interna. Esto a su vez puede reducir la movilidad del concreto plástico y así la transformación de carga vertical a la presión lateral.



**Grafico 3.-** Efecto del contenido de cemento en la presión lateral [Ritchie, 1962B]

Gardner [1984] investigó la influencia del reemplazo de cemento por la ceniza volante para el concreto convencional con valores de fluidez que se extienden entre 65 y 115 mm. El reemplazo de la ceniza volante varía entre 0 y el 50%. Mezclas de concreto que contienen la ceniza volante fueron encontradas para

desarrollar la presión lateral más alta que el concreto similar hecho con sólo el cemento Tipo I.

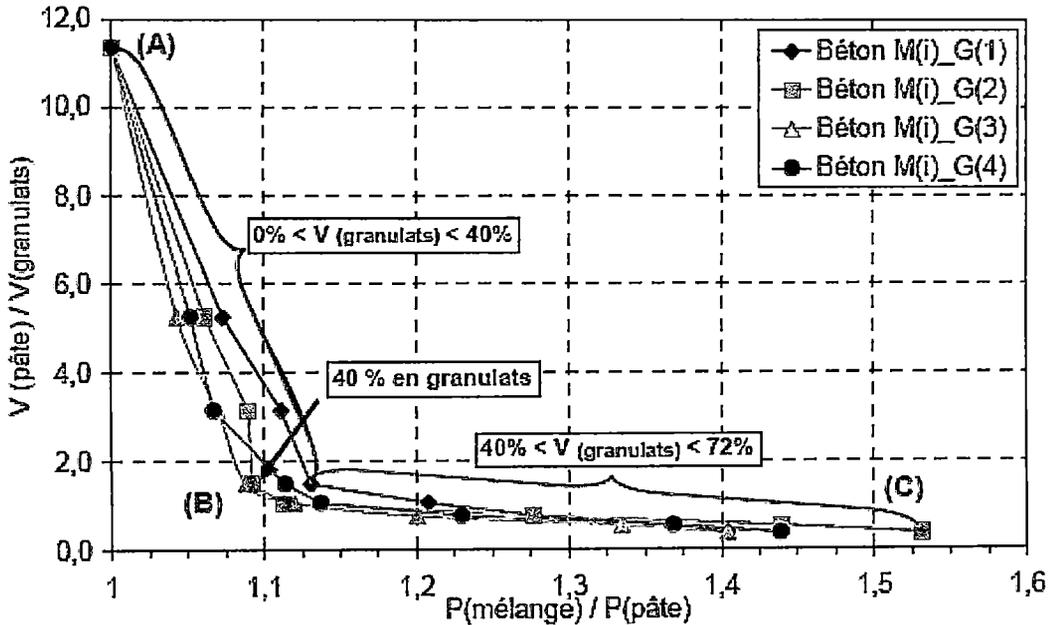
La incorporación de ceniza volante es aconsejada para aumentar la movilidad del concreto plástico y reducir la velocidad de la fuerza interna, así conduciendo al desarrollo de presión lateral más alta.

### **2.1.2 Características del agregado grueso**

Gardner y Ho [1979] encontraron que el aumento del tamaño del agregado grueso (MSA) de 10 a 20 mm no tenía ninguna influencia significativa sobre la presión lateral ejercida por el concreto convencional con una consistencia de 50 a 100 mm.

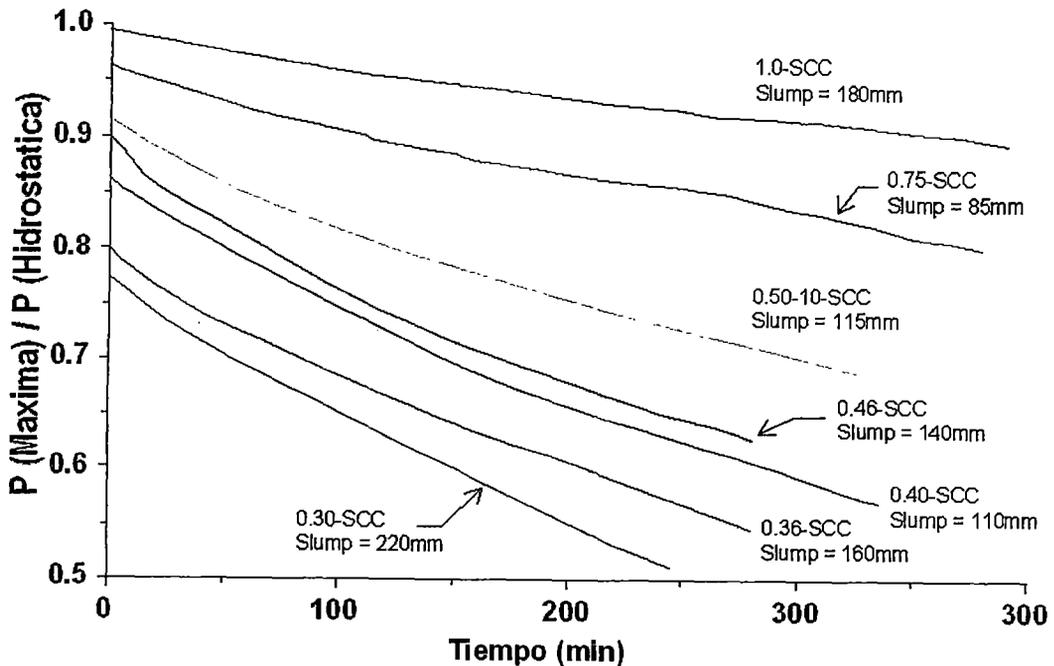
Amziane y Baudeau [2000] consideró que el concreto es un material heterogéneo de dos fases, se compone de la pasta de cemento y el agregado grueso. La pasta posee un comportamiento reológico que es exclusivamente viscoso, mientras que la fase granular contribuye a la resistencia de tensión por la fricción del agregado. Mezclas convencionales de concreto hechas con a/c de 0.5, varió el contenido de agregado, MSA, los valores de fluidez de 50 a 250 mm fueron evaluadas. La presión lateral fue determinada usando un encofrado de 1.65 m. de altura, 1.35 m. de longitud, y 0.2 m. de ancho. Fue obtenida la presión hidrostática en el caso de pasta de cemento. Mostraron la presión máxima lateral dividida por la presión obtenida para la mezcla de la pasta de cemento ( $P_m/P_p$ ) para disminuirse con el aumento del volumen de agregado grueso hasta que la proporción volumétrica del conjunto de pasta-agregado grueso ( $V_p/V_{agg}$ ) se acercara a uno. Como está indicado en el Grafico 4, la variación en  $P_m/P_p$  con  $V_p/V_{agg}$  es lineal entre A y B que corresponde a mezclas que tienen concentraciones de agregado más abajo de 40%. Sólo una reducción leve del valor de  $P_m/P_p$  ha despreciado considerablemente la reducción en el valor  $V_p/V_{agg}$ . Los autores sugirieron que mientras el volumen de mortero sea dominante, la magnitud de la fricción interna residual límite causa una presión lateral bastante más alta. La segunda tanda (BC) corresponde a mezclas con la concentración de agregado mayor a 40%, e indica que puede ser obtenida una disminución significativa en la presión relativa con una pequeña

disminución en el valor de  $V_p/V_{agg}$ . Esto sugirió que el concreto tiende a tener un comportamiento granular facultando el desarrollo de resistencia al corte principalmente a través de la fricción de la interpartícula del agregado, de ahí llevando a la reducción significativa en la presión lateral.



**Gráfico 4.-** Variación del valor de  $P_m/P_p$  con respecto a la concentración del agregado grueso [Amziane y Baudeau (2000)]

En el caso de mezclas de alta fluidez con una consistencia de  $650 \pm 15$  mm, Assaad y Khayat [2005C] encontraron que el aumento del volumen del agregado grueso podría reducir la presión lateral y aumentar la velocidad de la caída de presión después del vaciado. Esto fue atribuido a los aumentos del grado de fricción interna que es resultado del mayor contenido de agregado grueso, que reduce la movilidad del concreto y la presión lateral resultante. Como se muestra en la Gráfico 5, la presión lateral inicial puede disminuirse del 99% al 77% de presión hidrostática cuando la proporción de arena y el total de agregado ( $S/A$ ) disminuyese de 1.0 a 0.30, respectivamente. La presión lateral fue determinada cerca de la base de una columna que mide 2.8 m en la altura en la cual el concreto fue llenado a 10 m/h. La velocidad de caída de presión con el tiempo también fue encontrada para ser influenciada bajo el valor de  $S/A$ . Por ejemplo, para el 0.50-10-SCC y mezclas 0.30-SCC, el tiempo requerido para reducir la presión lateral en el 10% del valor hidrostático era 145 y 80 minutos, respectivamente (Graf. 5).



**Gráfico 5.-** Las variaciones de presión relativa con respecto al tiempo transcurrido después del vaciado para mezclas hechas con 10 mm. MSA [Assaad y Khayat, 2005C]

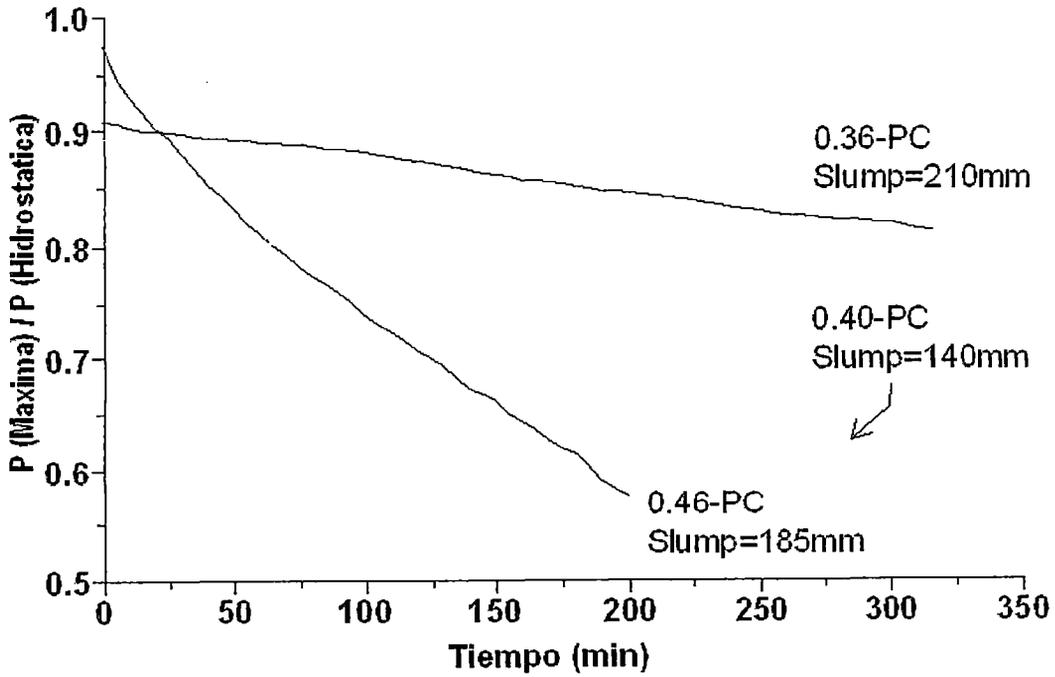
El MSA también fue hallado para afectar la presión del encofrado. Mostraron la presión inicial relativa la cual descendió del 92% al 85%, y el decrecimiento de presión era más pronunciado usando 14 mm MSA comparado a 10 mm MSA. Luego el aumento de MSA a 20 mm había limitado el efecto sobre el decaimiento de presión comparada al SCC con 14 mm MSA [Assaad y Khayat, 2005C].

### 2.1.3 Contenido de agua y relación a/c

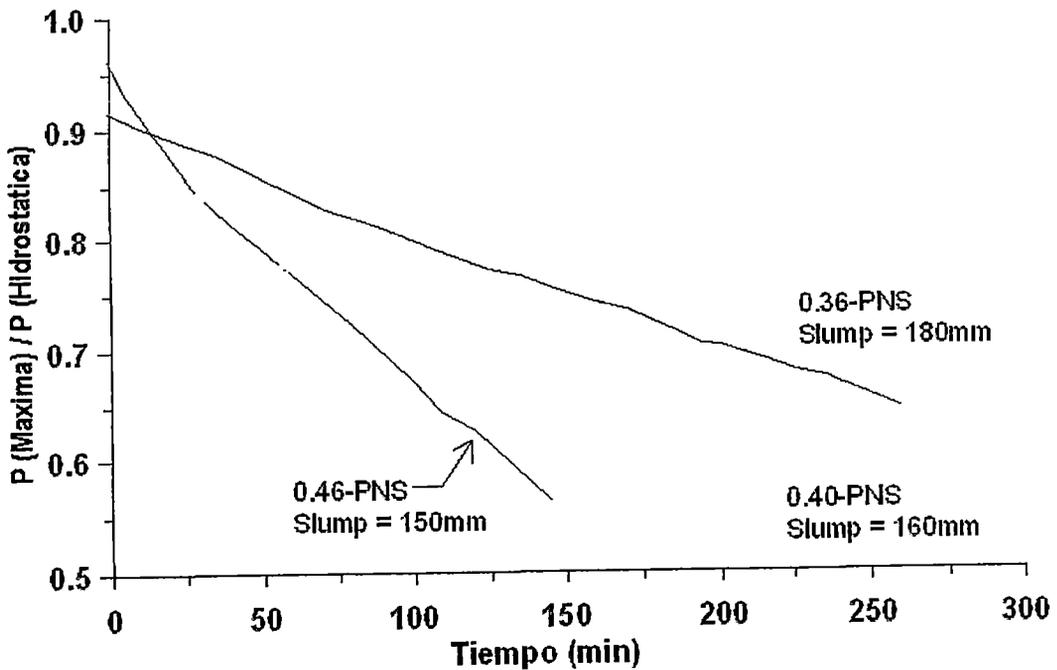
Determinar el efecto de contenido de agua sobre la presión lateral, Roby [1935] realizó una serie de pruebas que usan mezclas de concreto con cemento: arena: piedra de 1:2:3.5. El a/c fue variado de 0.86 a 0.91, y la fluidez fue cambiada de 80 a 180 mm. El concreto que contiene el contenido mayor de agua, como se decía, iba a desarrollar una presión máxima del 20% al 25% mayor que el de concreto seco. El autor atribuyó este comportamiento al efecto aumentado lubricante de la capa de pasta entre las partículas de los agregados, así disminuyendo la fricción interna y causando la presión lateral más alta.

Conclusión similar fue dibujada por Ore y Straughan [1968] concerniente al efecto del contenido de agua sobre la presión del encofrado decidida para el concreto con una fluidez de 75 a 100 mm. Los autores notaron que una cantidad de exceso del agua añadida a una mezcla que contiene sólo arena y piedra puede causar el equivalente de presión que el producido por la presión hidrostática. Tal presión puede prevalecer hasta que el agua de exceso sea agotada fuera del encofrado.

En el caso de SCC, Khayat y Assaad [2006] publico que los cambios de la relación a/c tienen un efecto significativo sobre la presión lateral. Para una fluidez dada de 550 mm, SCC proporcionado con relación a/c de 0.46 presión inicial ligeramente mayor comparada a SCC hecho con a/c de 0.40 o 0.36 (Figs 7, 8). Esto fue atribuido y relacionado con el aumento de agua, el contenido de pasta y la reducción del volumen de agregado grueso, que conducen a bajar las propiedades de resistencia al corte del concreto plástico. Además, la velocidad de decrecimiento de la presión lateral con el tiempo fue encontrado que es bastante mayor en SCC hecho con la a/c de 0.46 (Grafico 6, 7). El tiempo transcurrido para reducir la presión relativa en el 25% se disminuyó de 200 a 150 minutos con la disminución en la relación a/c de 0.40 a 0.36 para SCC hecho con PMS-based HRWRA. Esto es atribuido al menor HRWRA que demanda el SCC hecho con una relación de a/c más alta, que puede presentar menos interferencia con la velocidad de desarrollo estructural y desarrollo de coherencia que el SCC con el a/c inferior [Khayat y Assaad, 2006].



**Gráfico 6.-** Efecto de a/c sobre las variaciones de presión relativas de SCC hecho con PC-based. - HRWRA [Khayat y Assaad, 2006]

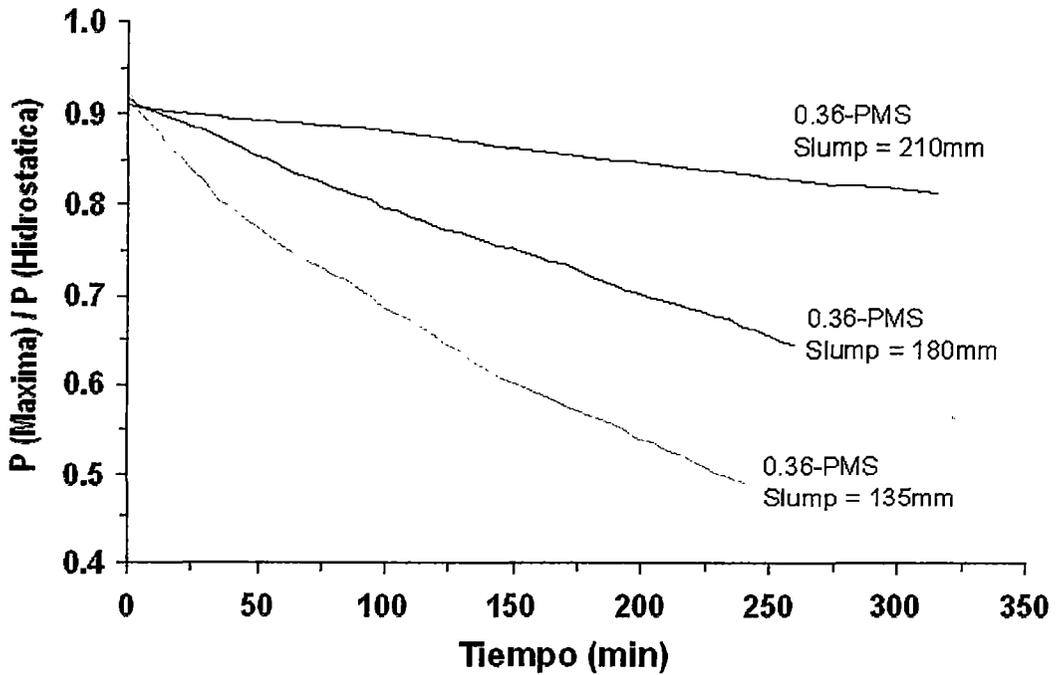


**Gráfico 7.-** Efecto de a/c sobre las variaciones de presión relativas de SCC hecho con PNS-based. - HRWRA [Khayat y Assaad, 2006]

#### 2.1.4 Adiciones químicas

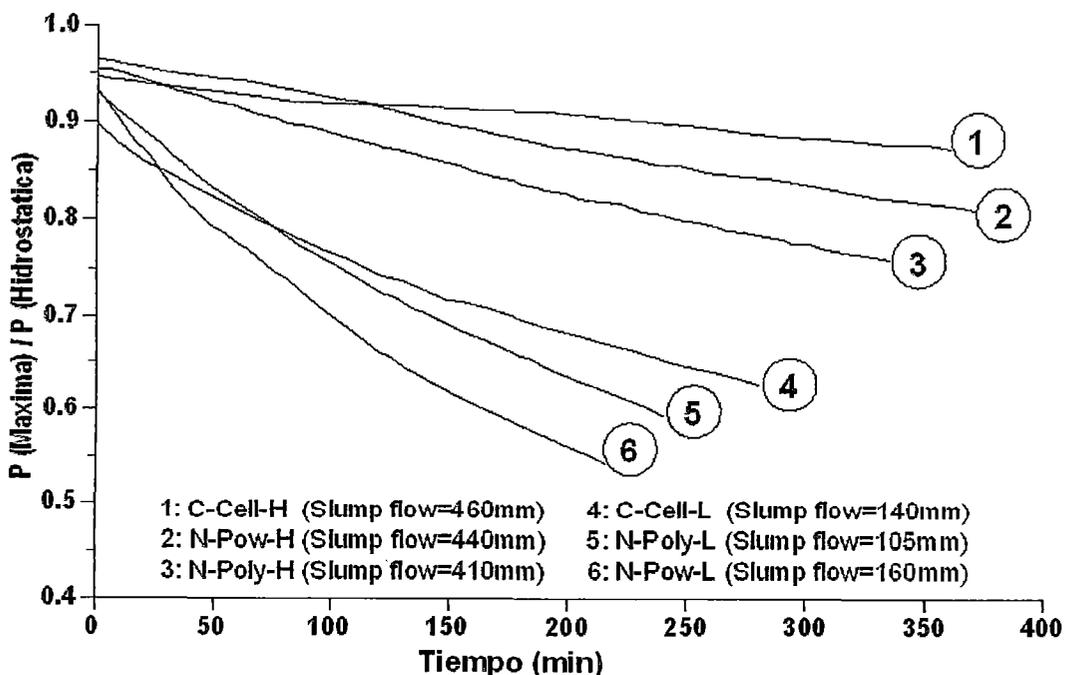
Ore y Straughan [1968] demostraron que el efecto de incorporar agua o reducir el aditivo retardante ha limitado la influencia sobre la presión del encofrado. El efecto de añadir HRWRA para mejorar la trabajabilidad aumentó la presión en el encofrado [Gardner, 1984]. Sin embargo, el empleo de HRWRA para reducir la relación  $a/c$  para una fluidez dada fue encontrado que desarrollo similar envolvente de presión en el encofrado que con él de concreto hecho sin HRWRA de consistencia similar.

Khayat y Assaad [2006] evaluó el efecto de tipo de HRWRA de las características de presión del encofrado del SCC en la columna de 2.9 m de altura que es llenada a 10m/h. Las mezclas estuvieron preparadas con polycarboxylate a base de ácido (PC), polynaphthalene sulphonatebased (PNS) y polymelamine sulphonate-basado (PMS) HRWRAs. Como se muestra en la Grafico 8, para concreto autocompactante hecho con una relación  $a/c$  de 0.36, el tipo de HRWRA ha limitado el efecto sobre la presión inicial. De otra parte, el tipo de HRWRA tiene el efecto considerable sobre el decaimiento de presión. Comparado al SCC hecho con PNS o PMS-based HRWRA, el empleo de PMS-based HRWRA expone la mejor retención de fluidez que conduce a bajar el beneficio en el desarrollo estructural y el decaimiento de presión. Resultados similares fueron obtenidos con SCC hecho con  $a/c$  de 0.40 y 0.46.



**Gráfico 8.-** Efecto del tipo de HRWRA con las variaciones de presión de SCC hecho con una relación de  $a/c = 0.36$ . - Khayat y Assaad [2006]

Andreas et al. [2005] evaluó la influencia de VMA (Aditivo Modulador de Viscosidad) sobre la presión lateral de SCC. El SCC fue vaciado de la parte superior de un encofrado que mide  $0.20 \times 0.20 \times 0.975$  m. La adición de VMA ligeramente puede acelerar la disminución de presión; sin embargo, ninguna diferencia fue notada entre los VMAs diversos. La disminución en la dosificación HRWRA y el aumento simultáneo de la  $a/c$  condujo a un decaimiento de presión más rápida.



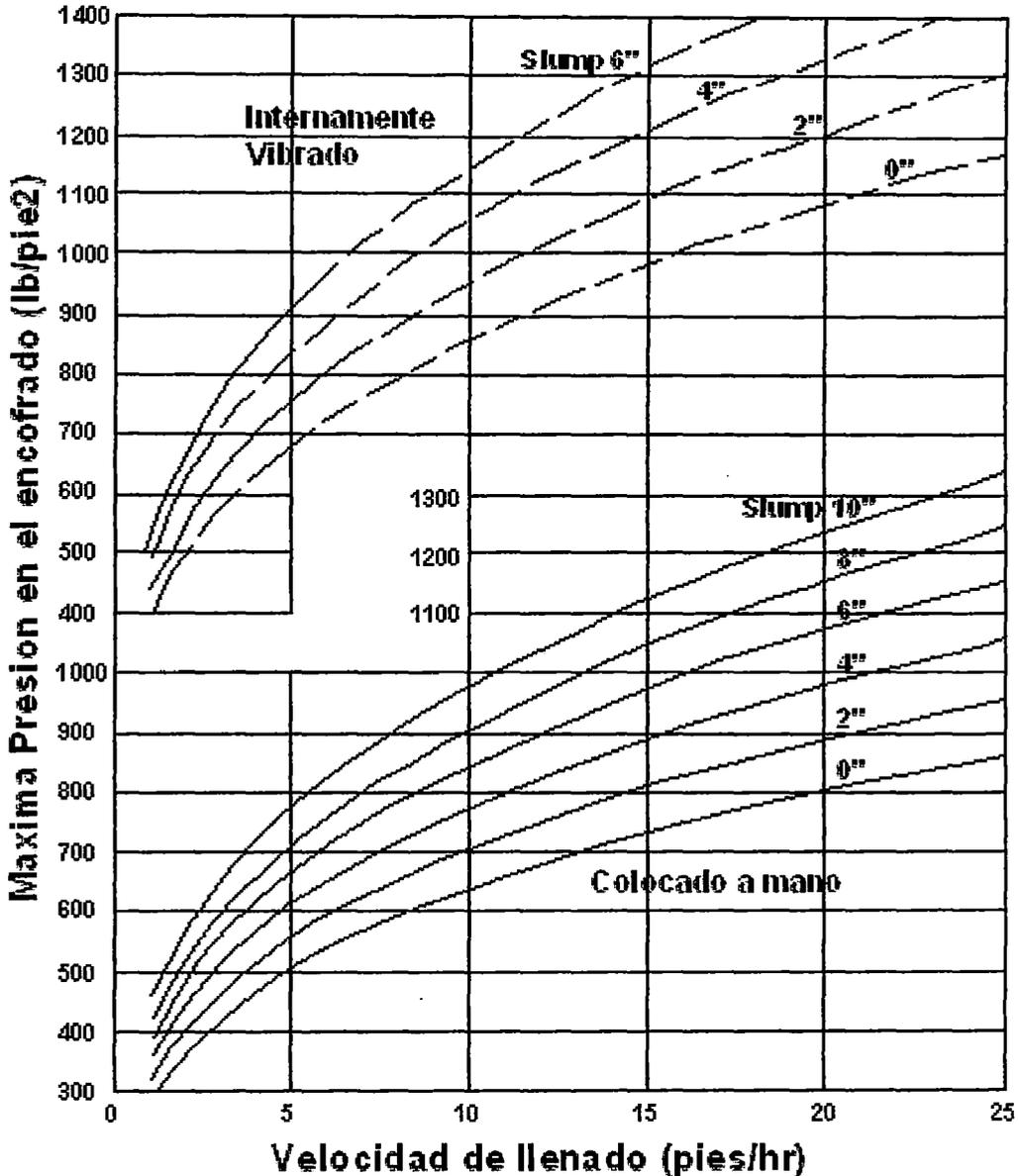
**Grafico 9.-** Efecto de VMA tipo y la dosificación sobre las variaciones de presión de SCC hecho con 0.36. - a/c Khayat y Assaad [2006]

Ferron, et al. [2006] evaluó la influencia de HRWRA y a/c sobre el desarrollo estructural de la pasta de cemento. En este estudio, la dosificación HRWRA o la relación a/c fueron variadas hasta que fuera obtenida la fluidez de la pasta deseada inicial. Fue determinado que la adopción de un a/c inferior con una dosificación más alta de HRWRA es más eficaz en la velocidad de desarrollo estructural que la utilización de una relación a/c más alta y una dosificación inferior de HRWRA. El aumento del contenido de agua aumenta el grosor de la capa de agua alrededor de las partículas de cemento. Por consiguiente, los incrementos de distancia de la interpartícula, y la floculación de la partícula se acortan porque las fuerzas de coagulación de la interpartícula decrecen. En consideración a HRWRA, la agregación de partícula es dificultada por la presencia de fuerzas electrostáticas repulsivas y/o el efecto de obstáculo estérico que mantiene las partículas de cemento dispersadas.

## 2.2 Nivel de fluidez del concreto

La mayor parte de investigadores publicaron que esperan que la presión lateral aumente para mezclas que tienen un nivel de consistencia más alto. Esto es

debido al reducido grado de resistencia a la fricción que hace que el material se comporte como un fluido, así causando una mayor presión lateral. Rodin [1952] estudió el efecto acoplado de fluidez y velocidad de colocación sobre el desarrollo de presión lateral. Mezclas de concreto que tienen valores de fluidez que varían entre 0 y 250 mm fueron investigadas. Como se muestra en el Grafico 10, el aumento de la fluidez causa una mayor presión lateral para una velocidad de llenado dada. El concreto sujeto a la vibración interna desarrolla mayor presión en el encofrado que el concreto que es colocado a mano.

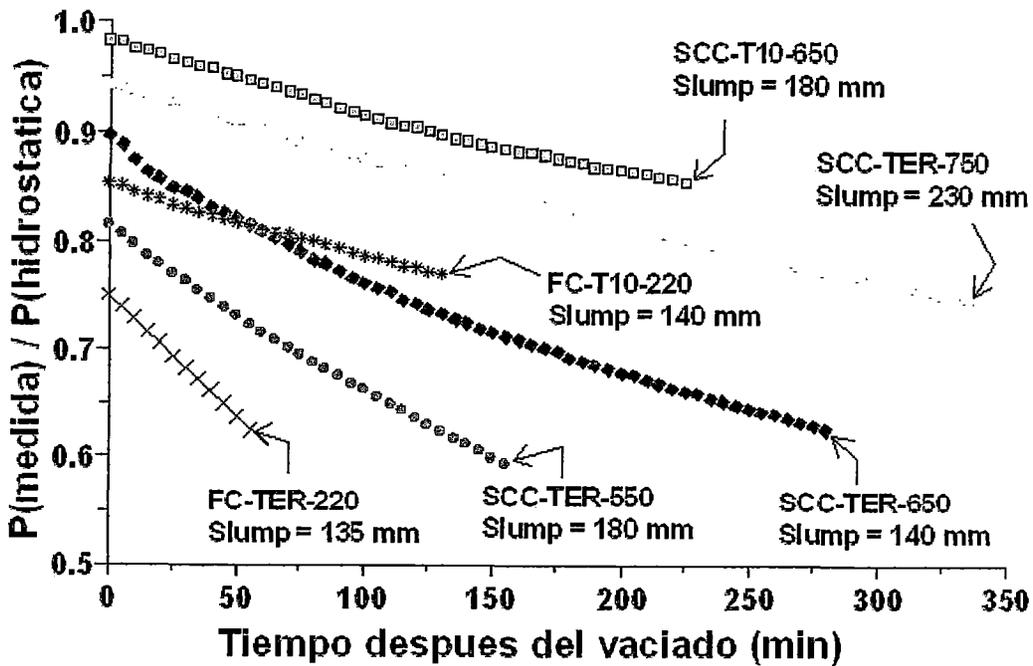


**Grafico 10.-** Presión máxima relacionada con la trabajabilidad y velocidad de colocación [Rodin, 1952]

Ritchie [1962B] realizó una serie de experimentos sobre el concreto con el cemento y el agregado grueso de 1:3 y 1:6. Fue usada una velocidad de llenado de 3 m/h, y la fluidez se varió entre bajo y alto. Las mezclas con la fluidez inferior fueron encontradas para ejercer presiones ligeramente mayores que aquellos con la fluidez más alta. Este comportamiento, es contradictorio a lo que podrían esperar, esto fue debido al hecho que el equipo de secado en el concreto de fluidez inferior necesita más compactación y un esfuerzo mayor para ser correctamente colocado en el encofrado, así causando una presión más alta.

Gardner [1980] encontró que para el concreto con una fluidez de 170 mm y una velocidad de llenado de 6 m/h, la presión lateral es igual, en algunos casos, o típicamente excede él de un concreto con la consistencia de 50 mm con la velocidad mucho más alta de 46 m/h. Una fluidez del concreto de 100 mm y un vaciado a 46 m/h desarrollo el 35% la presión lateral más alta comparada a una mezcla con la fluidez de 50 mm, también llenada a 6 m/h.

En el caso de SCC, Assaad y Khayat [2006] investigó mezclas SCC listas con  $450 \text{ kg/m}^3$  de cemento y  $a/c$  de 0.40. Las mezclas tenían los valores de fluidez de 550, 650, y  $750 \pm 15$  mm, e incorporaron concentraciones VMA correspondiente a 200, 260, y 350 mL/100 kg de cemento, respectivamente. La proporción de arena y el total del agregado fueron constantes en 0.46 para todas las mezclas, y la dosificación de agente de aire fue ajustada para asegurar un contenido de aire fresco de  $6 \pm 2\%$ . Muestran las variaciones de presión lateral con el tiempo decidido cerca el inferior de columna de PVC de 2.8 m de altura y 200 mm en el diámetro en la Grafico 11 para una velocidad de vaciado de 10 m/h. Los resultados claramente indican que el desarrollo de presión lateral de concreto sumamente fluido (FC) y SCC es afectado considerablemente por el nivel de fluidez inicial. Para una proporción de mezcla dada, el concreto con la dosificación más alta de HRWRA y el nivel de fluidez fue encontrado para ejercer la presión inicial más alta y un decrecimiento inferior de presión con el tiempo. Por ejemplo, según la fluidez de la mezcla, la presión inicial relativa puede variar del 75% al 98% de la hidrostática y el tiempo para reducir la presión en el 10% puede extenderse a partir de 45 a 167 minutos.

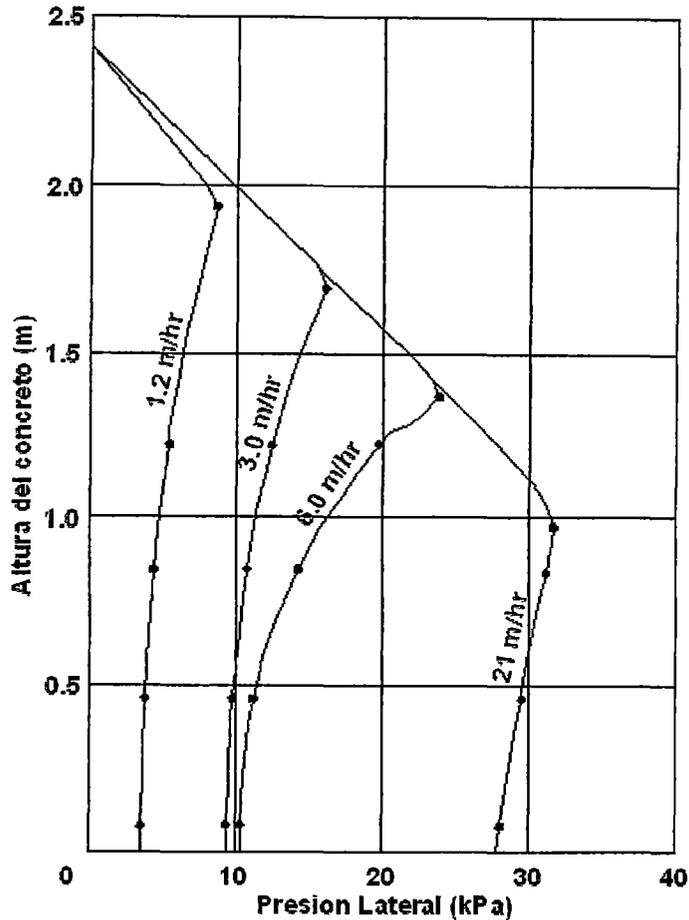


**Gráfico 11.-** El efecto de la fluidez de la mezcla sobre la presión relativa (valores de fluidez mostrados al final de cada prueba) [Assaad y Khayat, 2006]

## 2.3 Condiciones de colocación

### 2.3.1 Velocidad de llenado

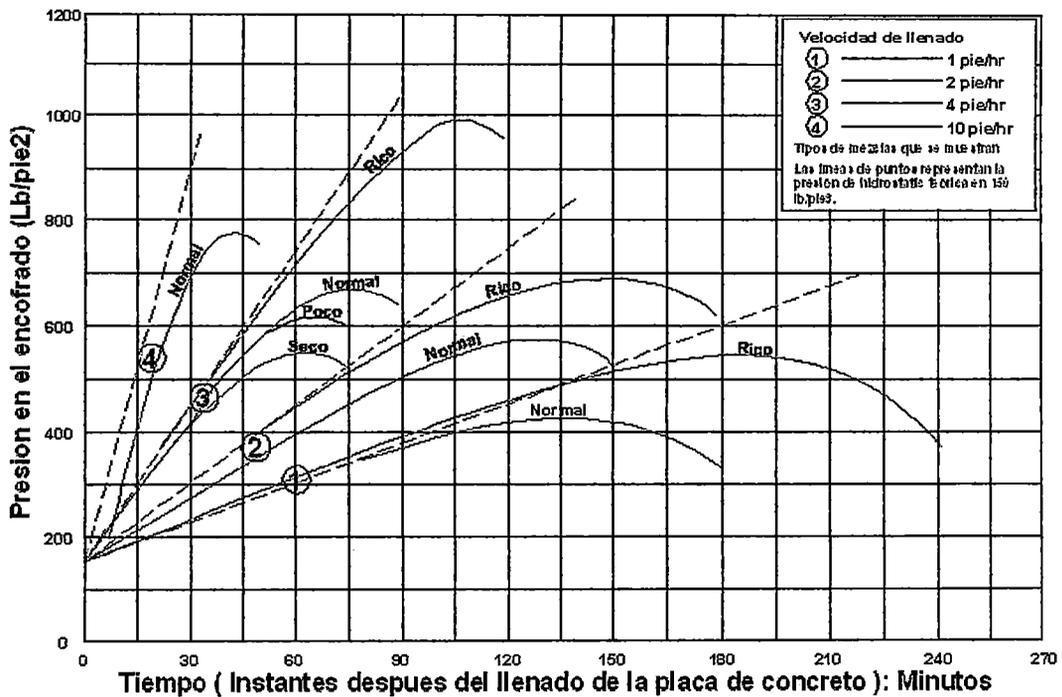
Varias investigaciones fueron realizadas para determinar la influencia de la velocidad de llenado sobre el desarrollo de presión lateral. Ritchie [1962B] condujo una serie de experimentos sobre el concreto con el cemento y las proporciones de agregado grueso de 1:3 y 1:6. La presión lateral fue determinada sobre una columna experimental que midió 2.4 m de altura y  $15 \times 15 \text{ cm}^2$  de corte transversal. La velocidad de llenado varía de 1 a 20 m/h, como se muestra en la Gráfico 12. Independientemente de la composición y la fluidez de la mezcla, fue encontrada que la presión lateral aumenta con la velocidad de llenado. Por ejemplo, para una relación 1:6 de la mezcla de concreto con la alta fluidez, la presión máxima lateral disminuyó de aproximadamente 38 a 24 y 10 kPa cuando redujeron la velocidad de llenado de 21 a 3 y 1.2 m/h, respectivamente.



**Gráfico 12.-** Efecto de la velocidad de llenado en la presión lateral [Ritchie, 1962B]

Asimismo Roby [1935] publicó que el aumento de la velocidad de llenado de 0.3 a 3m/h aumenta la presión lateral desarrollada por el concreto plástico (Gráfico 13). Según Gardner [1980], el tiempo necesario de llenar un encofrado con velocidades de llenado inferiores puede aumentar el tiempo disponible para el concreto que desarrolla un mayor esfuerzo de corte, así causando una menor presión lateral. Maxton (por [Rodin, 1952]) estudió el efecto acoplado de la velocidad de llenado y la temperatura del concreto sobre la presión lateral. La serie diferente de relativamente baja fluidez de mezclas de concreto colocadas a velocidades de llenado que varían entre 0.6 y 2m/h fue investigada. La temperatura del concreto varía de 4.5 a 27 °C. Se determinó que la presión lateral máxima aumentaba con el aumento de la velocidad de llenado y/o la disminución de la temperatura del concreto. Independientemente de los susodichos parámetros, la envolvente de presión, como se decía, era

hidrostática en la superficie libre hasta un cierto valor máximo y permaneció constante a partir de entonces hasta el inferior del encofrado. El autor notó que tal distribución de presión es aplicable para el concreto vibrado en dimensiones extensamente espaciadas, como aquellos usados para la construcción de bloque sobre cerraduras y presas. Siempre que los encofrados son angostos, se emplean los vibradores y velocidades de llenado más altas, el autor recomendó usar la presión correspondiente a la presión hidrostática del concreto para una altura completa del encofrado.

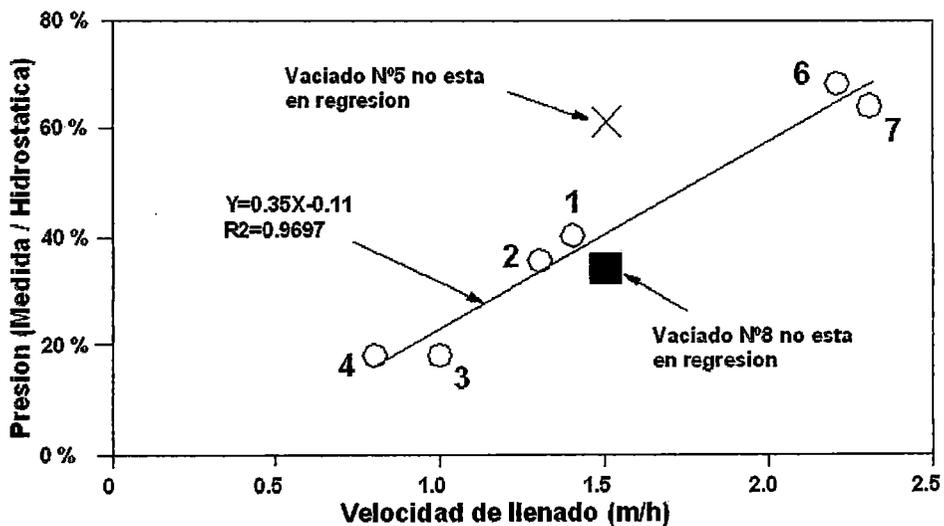


**Gráfico 13.-** Efecto de la velocidad de llenado en la presión lateral [Roby, 1935]

Varios estudios establecieron que la velocidad de llenado podría haber marcado el efecto sobre la presión del encofrado ejercida por el SCC (Vanhove et al., [2001], Khayat et al. [2002B], Leemann y Hoffmann [2003], Assaad [2004], Fedroff et al., [2004], Beitzel et al., [2004], y Tejeda-Dominguez et al. [2005]). Cuando el llenado del elemento es tan rápido que no permiten al concreto ponerse rígido, en el encofrado del concreto autocompactante la presión bien podría alcanzar la presión hidrostática. Sin embargo, cuando las medidas de presión en el encofrado fueron hechas en estructuras más grandes donde la

velocidad de llenado era de verdad lenta, la presión máxima era bastante más pequeña que la presión hidrostática.

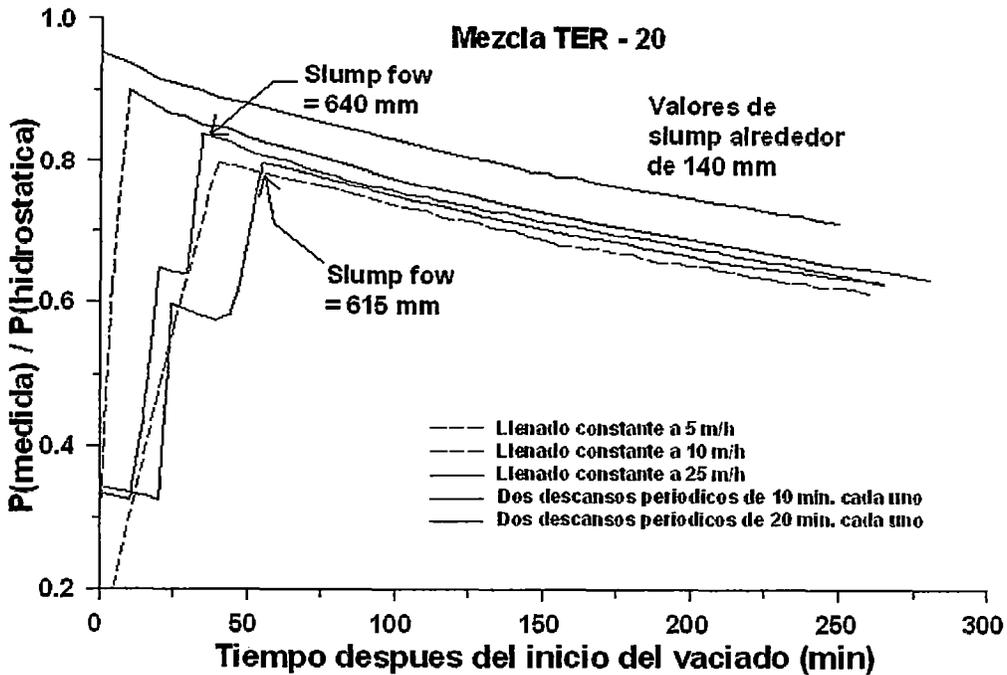
Billberg [2003] evaluó la presión del encofrado ejercida por el concreto autocompactante en las velocidades de colocación relativamente bajas de aproximadamente 1 a 2.5 m/h. Estas velocidades de subida de concreto en el encofrado pueden ser obtenidas llenando concreto autocompactante en secciones relativamente grandes. Dos diseños de mezcla diferentes fueron empleados para el SCC (SCC1 y SCC2 con a/c de 0.40 y 0.45, respectivamente) además de un concreto convencional (CC). La fluidez del concreto en el momento del vaciado era  $730 \pm 50$ ,  $700 \pm 50$  para el SCC1 y SCC2, respectivamente. El concreto fue dejado caer de  $1 \pm 0.5$ m de altura sobre la superficie de concreto, la medición del encofrado fue de 3m de altura. Se muestra en la Grafico 14, la correlación entre la velocidad de llenado y la presión en el encofrado que fue encontrada relativamente lineal para SCC.



**Grafico 14.-** Variación relativa de la presión en el encofrado con a velocidad de llenado para el SCC [Billberg, 2003]

Para el SCC colocado a velocidades relativamente moderadas a altas, Assaad y Khayat [2006] evaluaron el efecto de la velocidad de SCC utilizando una columna de presión que mide 2.8 m en la altura y 200 mm de diámetro. Como se muestra en el Grafico 15, la disminución en la velocidad de llenado de 25 a 5 m/h puede reducir la presión máxima inicial en el 15%; sin embargo, ningún efecto

significativo fue notado sobre la velocidad de decrecimiento de presión con el tiempo. La interrupción de llenado durante 10 o 20 minutos entre vaciados subsecuentes en el medio de la colocación, como se relataba, conducía a la reducción considerable de la presión del encofrado a pesar del hecho que la velocidad de llenado fue mantenida en 10 m/h cuando ocurría la colocación [Assaad y Khayat, 2006].

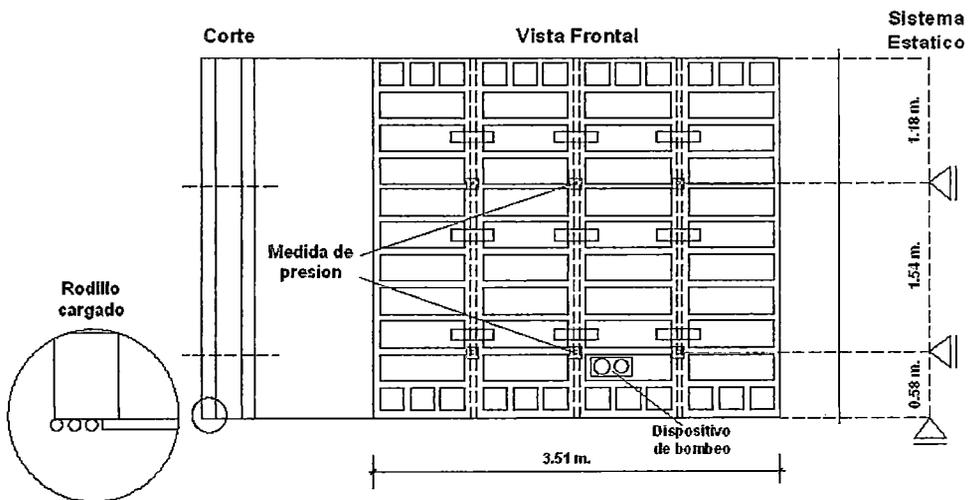


**Gráfico 15.-** Efecto de la velocidad de llenado sobre la presión relativa en el encofrado con concreto autocompactante [Assaad and Khayat, 2006]

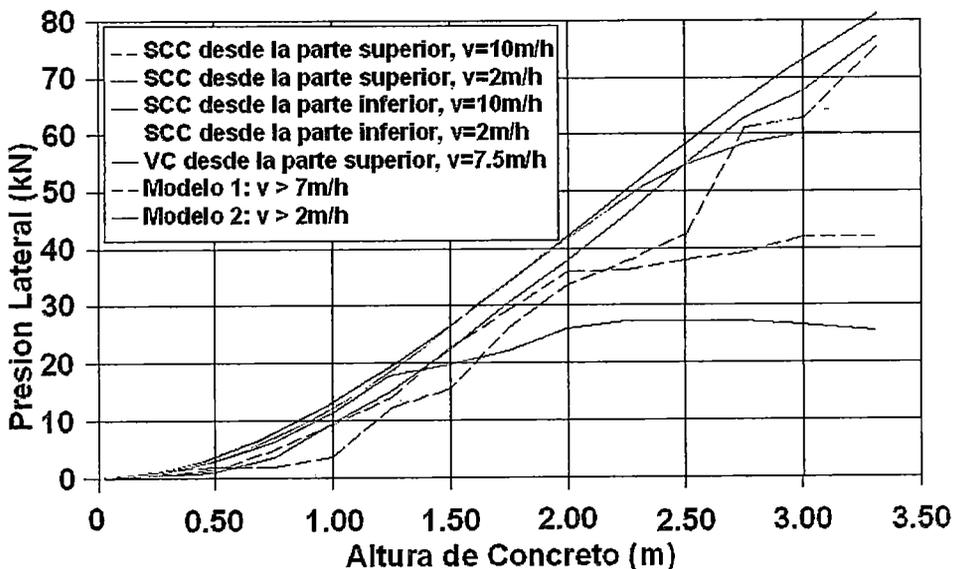
### 2.3.2 Método de llenado

Wolfgang y Stephan [2003] realizaron una investigación sobre un modelo de una placa cuyas dimensiones son  $h \times w \times d$  de  $3.30 \times 3.51 \times 0.24$  m, respectivamente. Una configuración compleja de encofrado fue escogida (Gráfico 16) para reducir al mínimo los efectos divisorios. Cuatro placas fueron vaciadas usando concreto autocompactante: dos elementos vaciados desde la parte superior y dos con el concreto siendo bombeado del inferior en las velocidades de colocación de 2 y 10 m/h. La quinta placa fue vaciada usando el concreto convencional vibrado (VC) colocado desde la parte superior con una velocidad de colocación de 7.5 m/h. Como se muestra en el Gráfico 17, el concreto vibrado expuso presión casi hidrostática sobre los 3.3 m de alto elemento de la pared. La distribución de

presión lateral mucho más abajo fue obtenida con el encofrado de SCC vaciado de la parte superior. Como se esperaba, la disminución de la velocidad de vaciado causaba una presión lateral más baja para cualquier método de colocación de inyección inferior. La presión hidrostática fue obtenida cuando la colocación fue realizada del inferior con la bomba de concreto. La presión lateral resultante era aproximadamente dos veces la presión ejercida en el encofrado de SCC vaciado desde la parte superior con la misma velocidad de llenado. Reduciendo la velocidad de llenado a 2 m/h en el caso de inyección inferior se requirió una presión más alta de bombeo.



**Grafico 16.-** Prueba de mecanismo con la colocación de la medida sujeta y sistema estático [Wolfgang y Stephan, 2003]



**Grafico 17.-** Fuerza de presión inferior en relación al nivel de llenado (v: velocidad de llenado), [Wolfgang y Stephan, 2003]

### 2.3.3 Magnitud de la vibración y tiempo de aplicación para el concreto convencional

Según la experiencia práctica de campo, se establece para determinados rangos de asentamiento del concreto en estado plástico, un tiempo óptimo de vibrado. Esta correlación se muestra en el cuadro 2.

**Cuadro 2.** Relación de fluidez y tiempo necesario de vibrado

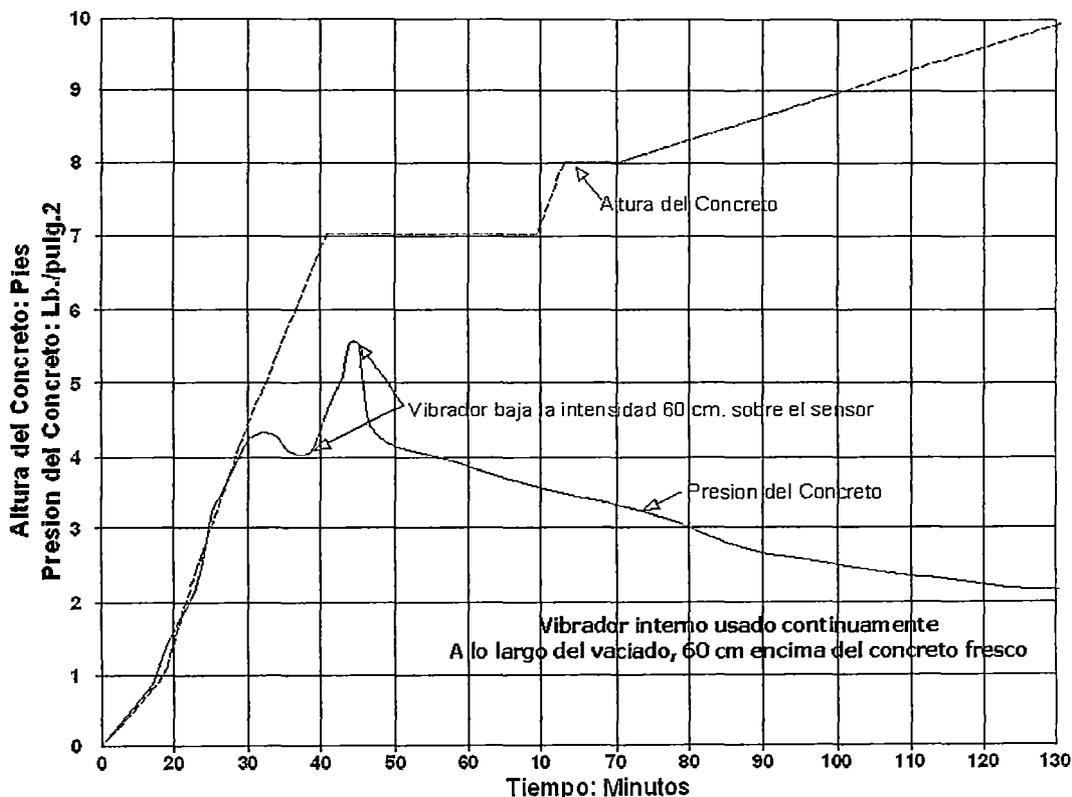
<b>Slump (pulg.)</b>	<b>Tiempo aprox. de vibrado (seg.)</b>
2 – 4	14 a 20
4 – 6	8 a 14
6 – 8	4 a 9
mayor a 8	máximo 7

Dependiendo del elemento vaciado y tipo de concreto, será necesario complementar con golpes externos (martillo de goma).

Mientras una mezcla tenga una consistencia más fluida, los tiempos de vibrado disminuirán.

Stanton [1937] publicó los resultados de una serie de pruebas hechas por la División de Carreteras de California cuyo fin era averiguar el efecto del vibrador interno eléctricamente conducido sobre la presión lateral del concreto. La relación entre la altura de concreto sobre el sensor de presión y la presión registrada es graficada en el Grafico 18. Las medidas fueron hechas en placas que miden 4.5 m de altura, 650 mm. de ancho en el inferior, y 450 mm. de ancho en la parte superior [Stanton, 1937]. El sensor de presión fue colocada 1 m encima de la base. Excepto en el caso notado en el diagrama, el vibrador fue integrado arriba de 600 mm. Las lecturas indicaron que la presión hidrostática total interpretada hasta la altura llena de concreto alcanzó 1.4 m, después de lo cual la presión del concreto disminuía regularmente excepto cuando el vibrador

fue bajado por el concreto a un punto aproximadamente 600 mm. encima del sensor de presión para el periodo de 2 minutos.



**Gráfico 18.-** Presión desarrollada por el concreto vibrado [Stanton, 1937]

Ore y Straughan [1968] demostraron que la presión máxima para el concreto convencional vibrado podría caerse del 100% al 40% de hidrostático cuando la distancia entre el vibrador y el llenado del concreto por la parte inferior del encofrado es aumentada a 900 mm. Cuando el concreto es vibrado de nuevo, los valores de presión podrían aumentar al 73% y el 98% de hidrostático, dependiendo el tiempo transcurrido entre la colocación y la nueva vibración. Los autores concluyeron que la duración, la magnitud, y la ubicación del esfuerzo vibratorio son más críticos que cualquier otro factor considerado en el desarrollo de presión, y por lo tanto deberían ser constantes en el diseño del encofrado.

Gardner [1984] público que el concreto vibrado se comporta como un líquido que tiene el mismo peso unitario que el concreto, con la envolvente de presión tangencial a la línea de presión hidrostática. Cuando la altura del concreto se hace suficientemente alta (más de 2 m), el efecto del vibrador se hace bastante reducido o aún cancelado. El concreto en la parte más baja del encofrado puede

ser más fluidizado por el esfuerzo de consolidación. El concreto entonces comenzará a desarrollarse esfuerzos de corte, la fricción de la placa, y la presión lateral en la parte inferior comenzará a desviarse de la presión hidrostática. Cuando la altura de concreto otra vez es aumentada, la magnitud del esfuerzo de corte se hace más significativa, y la presión lateral alcanza un valor máximo en alguna elevación encima de la base del encofrado. Incluso con el remoto aumento de la altura de concreto, la presión lateral permanece constante en un valor máximo hasta el inferior del encofrado. El autor concluyó que los parámetros principales que controlan la magnitud de presión lateral son la profundidad de concreto vibrado, el desarrollo del esfuerzo al corte, y la fricción de la placa.

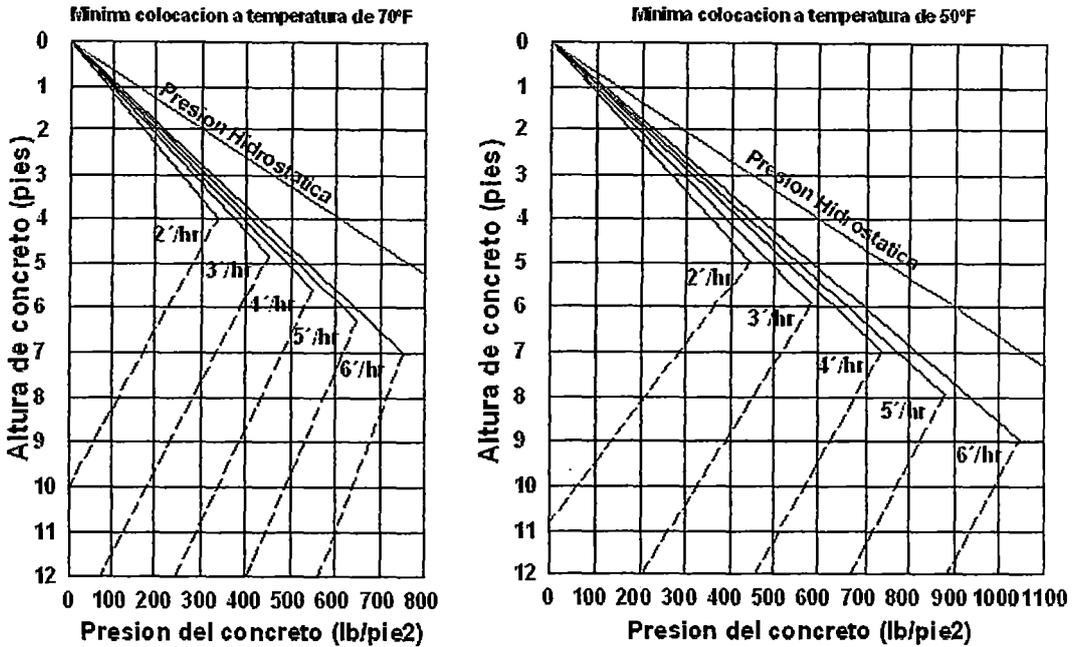
#### 2.3.4 Temperatura del concreto y del medio ambiente

Roby [1935] mostró que la presión desarrollada por el concreto durante el tiempo caliente es menor que la obtenida bajo una temperatura ambiente moderada. Por ejemplo, la mezcla de concreto colocada en 38°C de temperatura, como se relataba, desarrollaba la presión máxima de alrededor del 60% al 75% menor que esto ejercido por el mismo diseño de mezcla a una temperatura de 16°C.

The Portland Cement Association (de Rodin [1952]) estudió el efecto acoplado de temperatura del concreto y la velocidad de llenado para el concreto colocado a mano. Cinco velocidades de llenado que varían de 0.5 a 2 m/h y la temperatura del concreto de 10 a 21°C fueron evaluadas. Para una velocidad de llenado dada, el aumento de la temperatura del concreto, como se relataba, reducía la presión máxima, como puede ser visto en el Grafico 19.

El efecto de la temperatura del concreto sobre la presión lateral también fue evaluado por Gardner [1984] sobre mezclas vibradas con valores de consistencia que se extienden entre 65 y 115 mm. Temperaturas de concreto que varían de 2 a 27°C fueron probadas. Como se relato antes, la presión lateral fue encontrada para aumentar con la disminución en la temperatura del concreto. El autor encontró que las propiedades mecánicas del concreto plástico dependen de la temperatura del concreto. Para temperaturas inferiores, la hidratación de cemento puede ser reducida a baja velocidad, y propiedades

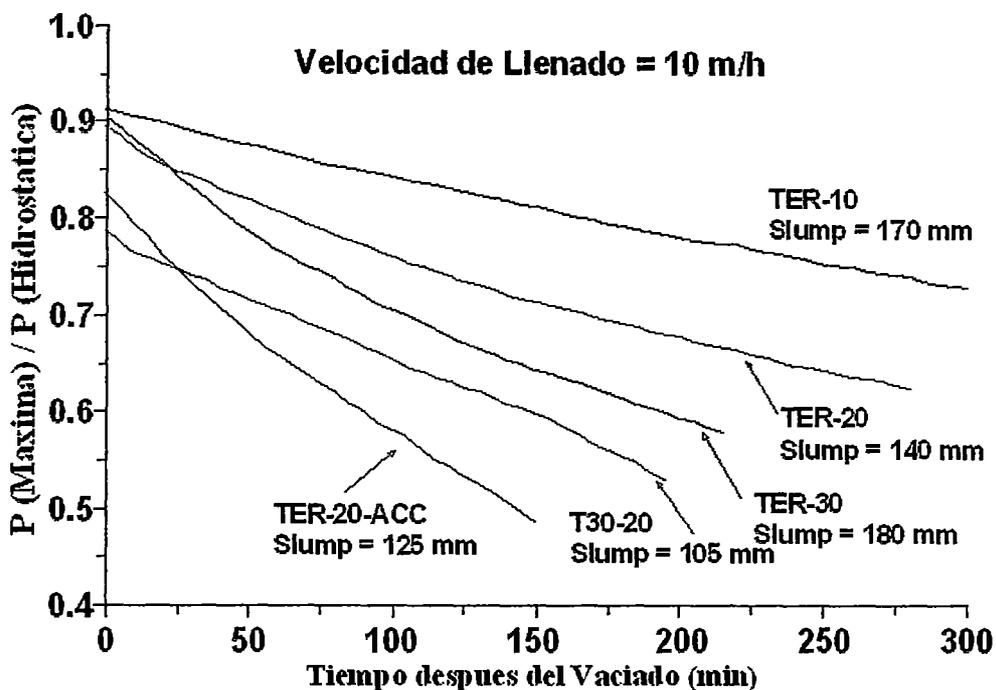
mecánicas pueden desarrollarse en una velocidad lenta que causa la presión lateral más alta. Gardner [1984] divulgó que la presión lateral más bien es controlada por la temperatura del concreto, y no por la temperatura ambiente.



**Grafico 19.-** Efecto de la presión del concreto en la presión lateral [Rodin, 1952]

El efecto de la temperatura del concreto autocompactante sobre variaciones de presión laterales fue evaluado por Assaad y Khayat [2006]. Las mezclas tenían un contenido de cemento de  $450 \text{ kg/m}^3$ , la relación a/c de 0.40, fluideces de  $650 \pm 15 \text{ mm.}$ , y el contenido de aire de  $6 \pm 2 \%$ . Ellos estuvieron preparados en  $10, 20, \text{ y } 30 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ ; estas mezclas se mencionan como TER-10, TER-20, y TER-30, respectivamente, en el Fig. 21. Las variaciones de presión relativa de este molde de mezclas en  $10 \text{ m/h}$  en columnas de PVC que miden  $2.8 \text{ m}$  en la altura y  $200 \text{ mm}$  en el diámetro son trazadas en la Fig 21. Las mezclas preparadas con el concreto en las temperaturas iniciales de  $10, 22, \text{ y } 30^\circ\text{C}$  desarrollan las presiones relativas similares del 91% al final del vaciado. De otra parte, la velocidad de decrecimiento de presión con el tiempo considerablemente fue afectada por la temperatura del concreto. Por ejemplo, el tiempo transcurrido para reducir la presión relativa en el 25% se disminuyó de 400 a 250 y 160 minuto para el TER-10, TER-20 y TER-30, respectivamente. A mayor temperatura del concreto podría generar una velocidad mayor en la pérdida de la

fluidez. Por ejemplo, los valores de fluidez de 170 y 180 mm. fueron medidos 5 y 3.5 horas después del vaciado para el TER-10 y mezclas TER-30, respectivamente. Las variaciones de presión de concreto autocompactante hecho con cemento CSA Tipo I (T30) y el cemento ternario con el molde de adición que acelera el vaciado en 20°C también es graficado en el Grafico 20. Como era esperado, la velocidad de decrecimiento de presión era más rápida para estas mezclas, dadas la acelerada velocidad de hidratación que conduce al desarrollo más rápido de cohesión y reducción de la presión lateral.



**Grafico 20.-** Efecto de la temperatura del concreto sobre variaciones en presiones relativas medidas en el fondo de la columna de 2800 mm. de alto para SCC (Se muestran valores de fluidez determinados al final del llenado del elemento) [Assaad y Khayat, 2006]

### 2.3.5 Tiempo requerido para desmontar el encofrado

Es usualmente económico quitar encofrado lo más pronto posible, con tal que el concreto armado sea lo suficientemente fuerte como para dar soporte al sistema impuesto de carga cuando el encofrado está dañado. Por consiguiente, es importante optar por el mínimo tiempo transcurrido después de ponerse a buscar extracción del encofrado a fin de que no ocurra daño para el concreto armado.

La extracción prematura podría involucrar considerablemente más gasto en el trabajo de reparación que puede ser ahorrada por el uso de un día adicional del encofrado.

Cuando el encofrado es removido a temprana edad, un número potencial de problemas necesita ser evitados. Harrison 1983 publico que los factores para ser considerado en colocar los criterios pues la extracción del encofrado puede incluir colapso, el daño de deflexión, de hielo/deshielo, el daño mecánico para el concreto armado, pérdida de humedad, variación de color, la durabilidad, agrietamiento termal y la sacudida, así como también algunos requisitos específicos del sitio. El autor encontró de tal manera el parámetro crucial para evaluar el tiempo precisado para la extracción del encofrado es la característica in-situ de fuerza compresiva del concreto.

Generalmente hablando, el tiempo mínimo para la extracción del encofrado depende de la fuerza del concreto y del sistema de carga para el cual el concreto sería sometido. Según Murdock y Blackledge [1968], un tiempo mínimo varía entre 12 horas y 4 días el cual se necesitaría antes de la extracción del encofrado usado para vaciar en los elementos de placas y columnas, respectivamente, dependiente de la temperatura y el tipo de cemento. Tal período puede aumentar a 7 o 14 días en el caso de losa o viga de elementos horizontales de intervalos largos donde existe una fuerza mayor y los desarrollos de rigidez serían requeridos. El encofrado puede ser removido más temprano para mezclas con mayor contenido de cemento, especialmente los concretos hechos con aditivos de acelerantes de fragua.

Cuandoquiera que el encofrado sea removido en edad temprana para condiciones particulares, el British Standard (CP 114) dispone que el concreto debería lograr una fuerza compresiva correspondiente a dos veces a la tensión nerviosa total que se espera a la hora de extracción del encofrado [Taylor, 1965]. Tal fuerza puede ser determinada de especímenes de control o por medio de la prueba no destructiva, como "El esclerometro". El Manual de Concreto Practico del ACI recomienda que la evaluación de la resistencia del concreto puede ser demostrado por diamantinas extraídas en campo o que otros procedimientos

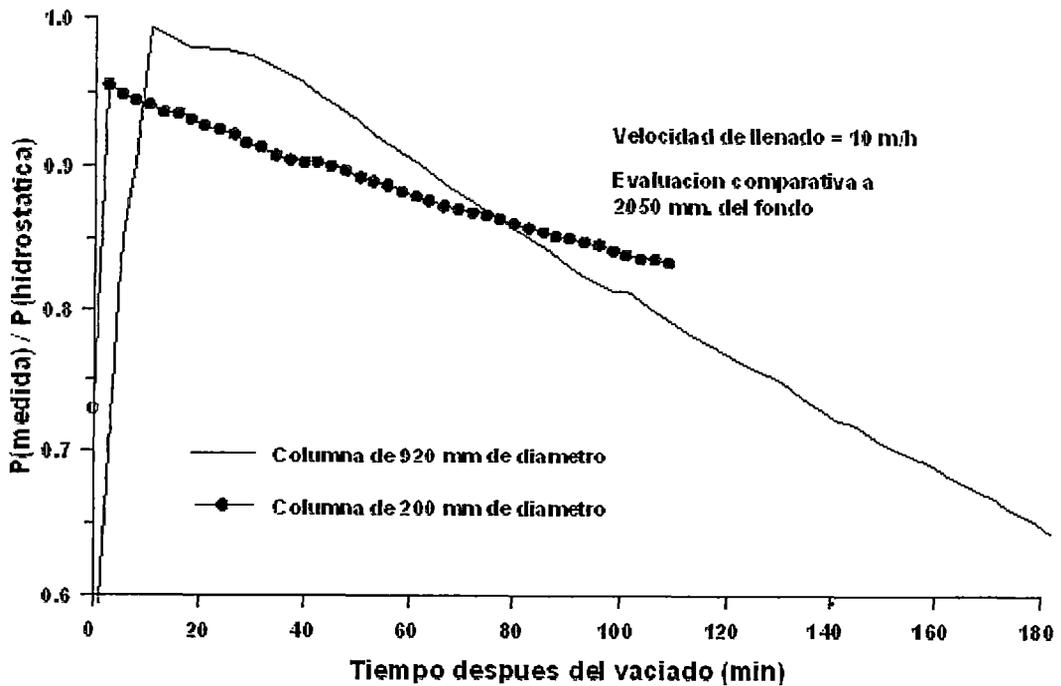
aprobados, algo semejante como la resistencia de penetración (ASTM C 803), la fuerza corredera (ASTM C 900), o el factor de madurez (ASTM C1074).

## 2.4 Características del encofrado

### 2.4.1 Dimensiones del encofrado

Existen datos limitados en cuanto al efecto de tamaño y forma del encofrado sobre características de presión laterales. Rodin [1952] divulgó que la tendencia general indica que la presión máxima aparece ser inferior en los sistemas de encofrados de más pequeños cortes transversales. Esto puede ser atribuido al grado aumentado del efecto de arqueo, que limita la presión lateral. Gardner [1980] demostró que más grande la dimensión del encofrado, más grande la presión lateral podría ser para el concreto convencional vibrado.

Khayat et al. [2005A] estudió el efecto de diámetro de columna sobre cambios de la presión lateral. Dos sistemas experimentales de encofrado fueron usados. Un tubo de PVC de 2.1 m en la altura, 200 mm en el diámetro, y 10 mm en el grosor de la pared fue usado para un sistema. La segunda columna consistió en un sonotube la medición de 3.6 m en la altura y 920 mm en el diámetro. El sonotube tenía un impermeable plástico y suficientemente largo que fue reforzado. Presiones laterales fueron determinadas usando sensores de presión localizados en varias posiciones a lo largo de las alturas de las columnas experimentales. Ambas columnas fueron echadas en la misma velocidad de llenado de 10 m/h. Grafico 21 ilustra las variaciones de presión relativa lateral decidida en aproximadamente 2 m de la cima de los sistemas de encofrado. Al principio, la mezcla colocada en la columna más grande expuesta presión ligeramente mayor relativa del 99 % comparado al 96% para la columna de 200 mm de diámetro. Esto puede ser debido a un efecto de arqueo en la sección relativamente restringida. Sin embargo, las velocidades que pasan la presión eran considerablemente diferentes. En el caso del concreto colocado en la columna de 920 mm de diámetro, el tiempo requerido para reducir la presión lateral en el 5% del valor hidrostático era 20 minutos, causando una velocidad de decaimiento de 5.3 kPa/h. A la inversa, para la columna de 200 mm de diámetro, este período era 38 minutos, o una velocidad inicial de decaimiento de 3.3 kPa/h.



**Gráfico 21.-** Efecto de anchura de la sección sobre la presión lateral [Khayat et al., 2005A]

### 2.4.2 Presencia de refuerzo

La densidad del refuerzo en el encofrado es un factor importante. El acero de refuerzo lleva una parte de la carga del concreto, y por lo tanto tiene un efecto beneficioso sobre la presión del encofrado. Sin embargo, tal efecto beneficioso podría ser cancelado debido a un nivel alto de la acción de compactar que podrían requerir para distribuir y consolidar el concreto entre los refuerzos [Rodin, 1952].

## CAPÍTULO III: SISTEMA DE MEDICION DE LA PRESION LATERAL

### 3.1 Instrumentos y dispositivos para medir la presión lateral

#### 3.1.1 Strain Gage

El uso de los strain gages o también llamadas galgas extensométricas está muy difundido como método Instrumental para la:

- Medición de deformación.
- Medición de esfuerzos.
- Medición de fuerza/Peso.

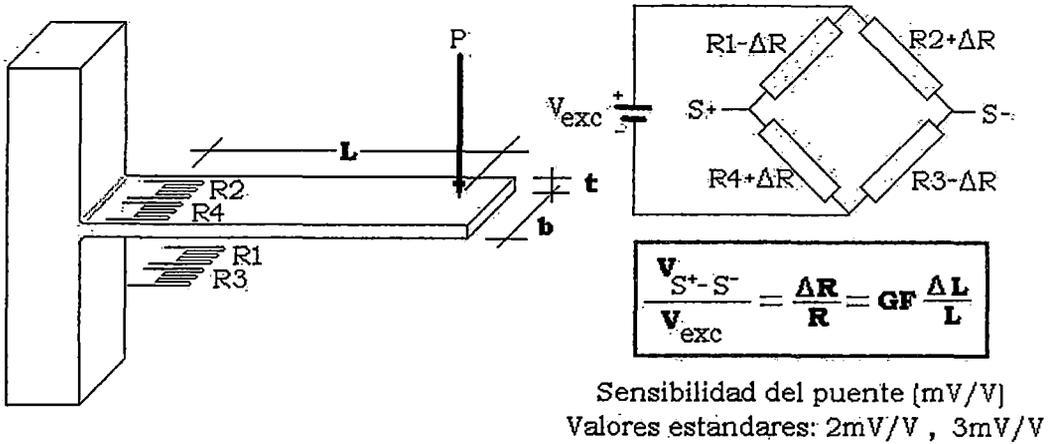


Figura 2.- Diagrama de viga sometida a esfuerzo

Robert Hooke estableció en 1678 la relación que existe entre tensiones y deformaciones en los cuerpos sometidos a esfuerzos mecánicos. Si el material es isótropo y homogéneo y no sobrepasa su límite elástico, entonces la relación es lineal. Basándose en este principio, la extensometría es el método que tiene por objeto la medida de las deformaciones superficiales de los cuerpos. El concepto de deformación es análogo al de alargamiento unitario y se expresa mediante una relación adimensional:

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

Por lo general se emplea como unidad el micro strain ( $\mu\epsilon$ ).

El esfuerzo o tensión ( $\sigma$ ) que soporta una estructura se define como la relación entre la fuerza y el área:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

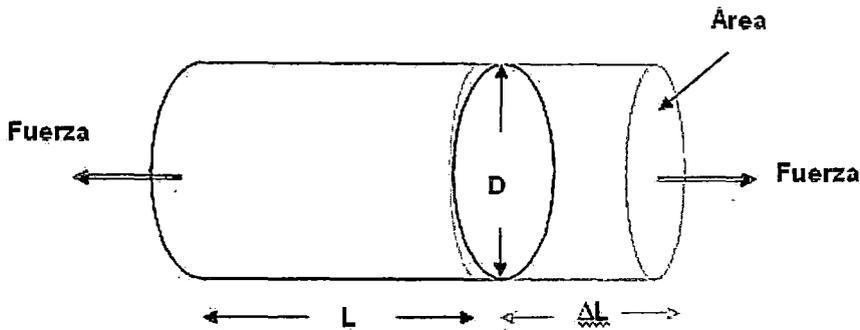


Figura 3.- Diagrama de deformación de un elemento

### Módulo de elasticidad

El **módulo de elasticidad** o **módulo de Young** es un parámetro que caracteriza el comportamiento de un material elástico, según la dirección en la que se aplica una fuerza. Para un material elástico lineal e isótropo, el módulo de Young tiene el mismo valor para una tracción que para una compresión, siendo una constante independiente del esfuerzo siempre que no exceda de un valor máximo denominado límite elástico, y es siempre mayor que cero: si se tracciona una barra, aumenta de longitud, no disminuye. Este comportamiento fue observado y estudiado por el científico inglés Thomas Young.

Tanto el módulo de Young como el límite elástico son distintos para los diversos materiales. El módulo de elasticidad es una constante elástica que, al igual que el límite elástico, puede encontrarse empíricamente con base al ensayo de tracción del material.

Para el caso concreto de un acero A33, el módulo de Young es de  $2 \cdot 10^5$  N/mm; el límite elástico (por encima del cual la deformación no es proporcional y deja secuelas) es del orden de  $3 \cdot 10^2$  N/mm, y la rotura se alcanza hacia los  $5 \cdot 10^2$  N/mm. Por debajo del límite elástico se cumple la relación de Hooke.

## Materiales lineales

Como se ha explicado para un material elástico lineal el módulo de elasticidad longitudinal es una constante (para valores de tensión dentro del rango de reversibilidad completa de deformaciones). En este caso su valor se define mediante el coeficiente de la tensión y de la deformación que aparecen en una barra recta estirada que esté fabricada en el material para el cual pretendemos estimar el módulo de elasticidad:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F/A}{\Delta L/L}$$

Donde:

$E$  : es el módulo de elasticidad longitudinal.

$\sigma$  : es la tensión sobre la barra usada para determinar el módulo de elasticidad.

$\varepsilon$  : es la deformación unitaria en cualquier punto de la barra.

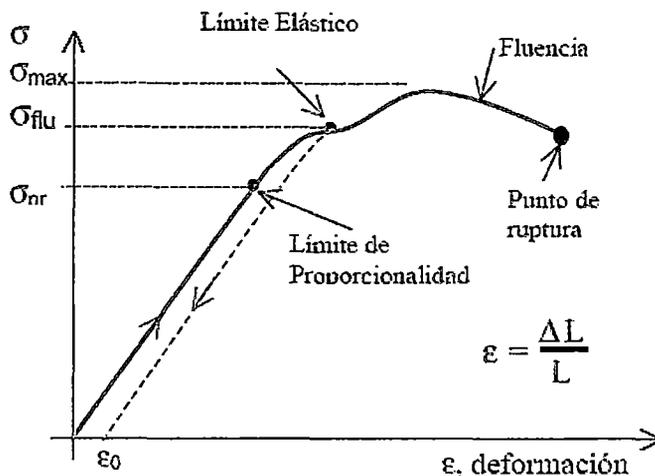


Figura 4.- Grafica esfuerzo vs. Deformación

Diagrama tensión: deformación: el módulo de elasticidad es la tangente en cada punto.

Para materiales como el acero resulta aproximadamente constante dentro del límite elástico.

Pero no sólo se produce deformación en la dirección de la fuerza aplicada, porque resulta que el aumento de longitud va acompañado de una disminución de sección (efecto de Poisson).

Al cociente definido por la deformación unitaria en la dirección transversal (diámetro D) y la deformación unitaria en la dirección axial (longitud L) se le conoce como modulo de Poisson ( $\nu$ ) y debe determinarse experimentalmente para los diversos materiales.

$$\nu = \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_L} = \frac{\Delta D/D}{\Delta L/L}$$

Básicamente un strain gage es una resistencia eléctrica, ya que lo que se mide en ella es la variación de la resistencia de dicho strain gage cuando este sufre una determinada deformación. Es decir, existe una relación directa entre la variación que sufriría la resistencia y la variación de la deformación en el strain gage.

Al pegar el strain gage en una superficie en la cual se quiere realizar el análisis de su deformación, se parte de la hipótesis de que el sensor experimenta la misma deformación que el material. El sensor consta de una base muy delgada no conductora, en la cual hay adherido un hilo metálico muy fino, de esta forma, la mayor parte de su longitud está distribuida paralelamente a una dirección determinada, como se puede ver aqui:

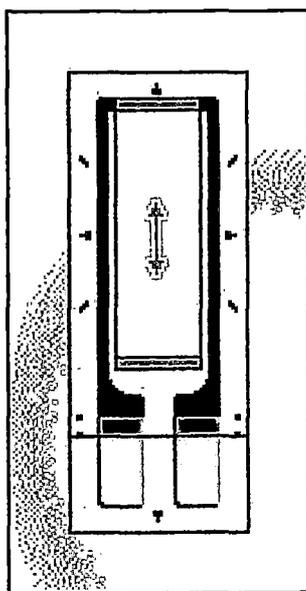


Figura 5.- Strain Gage

El fino hilo, el cual si conduce, es el que nos proporciona la resistencia que queremos medir, la cual varía con la deformación, esta viene dada por la ecuación:

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

Vemos en esta ecuación que la resistencia medida es directamente proporcional a la longitud, es decir, la resistencia es mayor al alargar el hilo, lo cual se consigue cuando el material se deforma. Al estar la galga adherida en dicho material, provoca esta variación de longitud y con ello el resultado deseado, que la resistencia varíe.

$$\Delta R = \rho \frac{\Delta L}{A}$$



Además del principio de funcionamiento observado, también de da otro en las galgas, este se basa en la deformación de elementos semiconductores, la cual provoca una variación tanto en la longitud como en la sección, y de una forma más acusada, en la resistividad ( $\rho$ ) del semiconductor.

$$\Delta R = \Delta \rho \cdot \frac{\Delta L}{\Delta A}$$

### Tipos de Strain Gage

Hay 5 tipos de Strain Gages:

- De hilo metálico.
- Laminas metálicas.
- De metal depositado.
- Semiconductores.
- Tipo rosetas

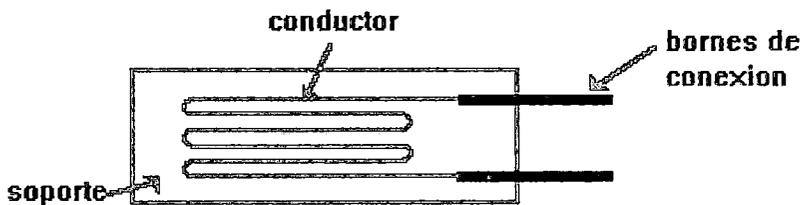
### Materiales comúnmente utilizados en su construcción:

- Constantan (Níquel-Cobre).
- Chromel (Níquel-Cromo).
- Aleaciones (Hierro-Cromo-Aluminio).
- Semiconductores (Silicio).

### Strain Gage metálicos

a) **Strain Gage de filamento.**- El elemento sensible es un hilo conductor metálico (aleaciones de níquel con cobre o cromo) con una sección circular de aproximadamente 0,025 mm de diámetro, y encolado sobre un soporte aislante de resina epóxica, poliéster o material análogo.

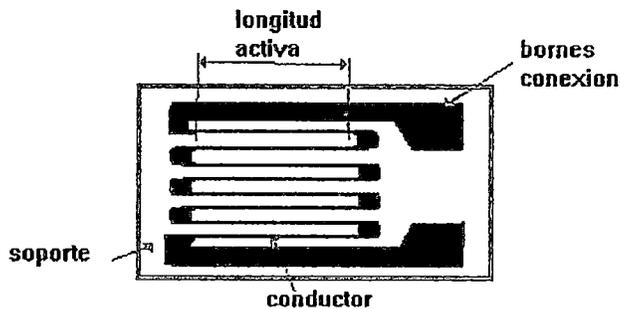
Para ofrecer la máxima longitud activa dentro de un área reducida, el hilo presenta varios repliegues siguiendo la disposición que se muestra en la figura.



Constitución de una galga de filamento

Figura 6.- Strain Gage de filamento

b) **Strain Gage de trama pelicular.**- El elemento sensible es una película de metal de pocas micras de espesor, recortada mediante ataque fotoquímico u otra técnica adecuada. La longitud activa está bien determinada, pues los bucles y las pistas de conexión son prácticamente insensibles a causa de su anchura.



Constitución de una galga de trama pelicular

Figura 7.- Strain Gage de trama pelicular

El principio de medida de los Strain Gages se basa en tres premisas:

- El valor de la resistencia de un conductor es función de sus características geométricas (efecto enunciado por Lord Kelvin).
- A todo aumento de longitud corresponde una disminución de sección (efecto de Poisson).
- La variación de resistividad es proporcional a la variación relativa de volumen (efecto enunciado por Bridgman).

Como la resistencia de un conductor de longitud  $L$  y área transversal  $A$  está dada por:

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

Derivando esta ecuación y dividiendo por  $R$  tenemos:

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} - \frac{dA}{A}$$

Cuando el material se encuentra en el rango plástico, su volumen se mantiene constante independientemente de los cambios en la deformación, de manera que

$$dV = LdA + AdL \quad \text{o sea} \quad \frac{dA}{A} = -\frac{dL}{L}$$

Para el caso general expresamos el área en términos del diámetro

$$\frac{dA}{A} = 2 \frac{dD}{D}$$

Vamos a definir GF como

$$GF = \frac{dR/R}{dL/L} = \frac{dR/R}{\varepsilon_L}$$

Si introducimos las definiciones de la deformación unitaria axial y del modulo de Poisson, tenemos que:

$$GF = 1 + 2\nu + \frac{1}{\varepsilon_L} \cdot \frac{dp}{p}$$

Donde GF es el factor del strain gage, cuyo cálculo lo proporciona el fabricante.

En la Ecuación anterior los tres términos del lado derecho corresponden respectivamente a tres fenómenos generados durante la deformación del material: cambio de resistencia debido al cambio de longitud; cambio de resistencia debido al cambio de área transversal y cambio de resistencia debido al efecto piezorresistivo.

Por lo anteriormente expuesto, algunas características deseables que debe de tener el material conductor del strain gage son:

- Sensitividad a la deformación lineal en el rango elástico para exactitud y repetición de la prueba.
- Alta resistividad para reducir el tamaño del strain gages.
- Baja histéresis para repetición y exactitud en la prueba.
- Alta sensitividad a la deformación para producir la máxima señal eléctrica ante una deformación experimentada.
- Coeficiente de resistencia bajo y controlable para lograr una buena autocompensación de temperatura.
- Amplio rango de temperatura operacional para poderse aplicar en pruebas variadas.
- Durabilidad con respecto a su fatiga para mediciones dinámicas.

Los strains gages están disponibles comercialmente con valores nominales de resistencia desde 30  $\Omega$  hasta 3000  $\Omega$ , siendo 120  $\Omega$ , 350  $\Omega$  y 1000  $\Omega$  los valores más frecuentes.

## Strain Gage Semiconductor

Los strain gages semiconductores son similares a las anteriores. En este tipo de strain gage se sustituye el hilo metálico por un material semiconductor. La principal diferencia constructiva de estos strain gages respecto a los anteriores se encuentra en el tamaño. Los strain gages semiconductores tienen un tamaño más reducido.

Desventajas de los semiconductores:

- Muy sensibles a la temperatura.
- Muy frágiles, permiten poca deformación.

## Características de los strain gages

A continuación veremos algunas características de los Strain Gages así como algunas propiedades que hay que tener en cuenta:

1. *Anchura y Longitud*: Estos dos parámetros hay que tenerlos en cuenta cuando escogemos el sensor para adherirlo al material, por tanto escogeremos el tamaño que más se adecue al tamaño del material.
2. *Peso*: El peso de un strain gage suele ser del orden de gramos, y en aplicaciones donde se necesita mucha precisión puede influir a la medida de la deformación realizada.
3. *Tensión obtenida*: Es el rango de variación de longitud del strain gage, cuando ésta se somete a una deformación. Este rango viene expresado en un tanto por cien respecto a la longitud del strain gage.
4. *Influencia de la Temperatura*: La temperatura puede afectar el funcionamiento del strain gage, si esta varía durante una medida con bandas extensiométricas, la deformación real puede desviarse de la deformación medida. Para ello el fabricante del strain gage proporciona dos curvas para poder corregir los efectos dados por la variación de temperatura.
5. *Resistencia del strain gage*: Es la resistencia de referencia que se da cuando el sensor no sufre ninguna deformación, es decir, el valor nominal de resistencia, suele venir acompañada por un porcentaje que indica su tolerancia.

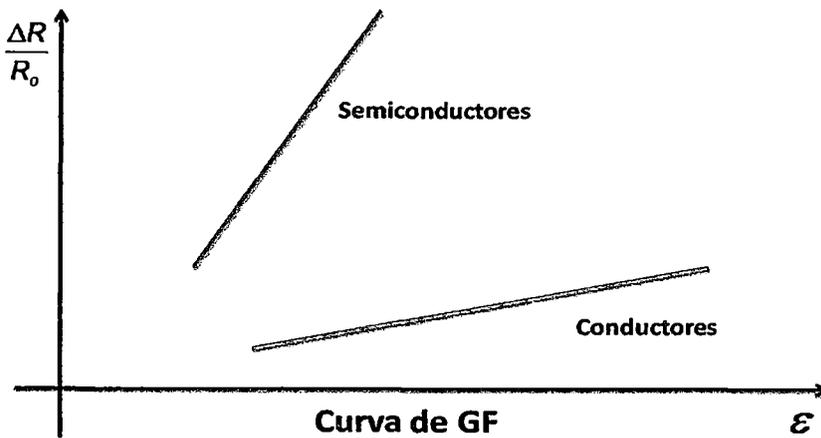
6. *Factor del strain gage:* El factor del strain gage es una constante  $K$  característica de cada strain gage. Este factor es función de muchos parámetros, pero especialmente de la aleación empleada en la fabricación. Viene acompañado de su tolerancia.
7. *Sensibilidad Transversal:* Los strain gages están diseñados para trabajar en una dirección determinada, sin embargo si se producen deformaciones transversales, se puede dar una pequeña variación de resistencia. El fabricante proporciona este valor en forma de porcentaje, suele ser este menor del 1%.
8. *Material de la lámina:* Esta característica nos define el material del que está hecho el hilo conductor o el material semiconductor.
9. *Material de la base:* Esta característica nos define el material del que está constituida la base no conductora del strain gage.
10. *Linealidad, histéresis y deriva:* La linealidad histéresis y deriva dependen de diversos factores, como son el nivel de deformaciones alcanzado, el material soporte de la banda y la calidad y los materiales del pegado.
11. *Disipación de calor:* Otro aspecto importante al utilizar bandas extensiométricas es la disipación de calor. Puesto que una banda extensiométrica es un elemento resistivo, formará parte de un circuito eléctrico y por tanto pasará una corriente eléctrica por la banda. Por tanto hay que prestar especial cuidado en cuanto a que la potencia que consume la banda debido al paso de la corriente eléctrica, y que disipa en forma de calor, sea menor que la potencia que la banda es capaz de transmitir al material sobre el que se ha pegado. De esta forma se evita el sobrecalentamiento de la banda, que podría dar lugar a medidas erróneas o incluso a llegar a quemar la propia banda.
12. *Estabilidad:* Cuando se hacen medidas que duran tiempos largos o se utilizan bandas montadas en piezas con mucha antelación, las condiciones ambientales pueden degradar las propiedades de la banda, haciendo que el comportamiento de estas se aleje de lo esperado o que incluso lleguen a deteriorarse.
13. *Comportamiento a la fatiga:* Como todos los materiales, las bandas tienen una vida limitada por la fatiga. Las bandas estándar son capaces de aguantar unos 105 ciclos. Cuando se requiere una mayor durabilidad en fatiga existen bandas especiales para tales fines.

**Valores comunes del factor del strain gage (GF):**

$$GF = \frac{dR/R}{dL/L} = \frac{dR/R}{\epsilon_L}$$

Conductores: 1,5 a 2.

Semiconductores: 50 a 200 (Valor más común 125)



**Figura 8.** Grafica de la curva del GF

**Mediciones con Strain Gages**

Los strain gages son capaces de medir deformaciones muy inapreciables a simple vista, esto da una pequeña variación de resistencia para la cual el circuito ha de ser muy sensible. Para el acondicionamiento de los strain gages el circuito utilizado por excelencia es el circuito potenciómetro doble, o puente de Wheatstone, que debido a sus características lo convierten en el circuito ideal para estos casos.

Existen tres tipos de montajes básicos: con una, dos y cuatro strain gages. La medida se suele realizar por deflexión, es decir midiendo la diferencia de tensión existente entre los terminales de salida del sensor. Las principales diferencias de estos montajes se encuentran en la sensibilidad y la capacidad de compensación del efecto de temperatura. Cuando los strain gages de iguales características coinciden, los efectos de la temperatura se anulan ya que las afectan a todas por igual.

## Puente de Wheatstone

El puente de Wheatstone es usado comúnmente para convertir los pequeños cambios en resistencia de los strain gages –provocados por la deformación– en un voltaje capaz de ser amplificado y procesado.

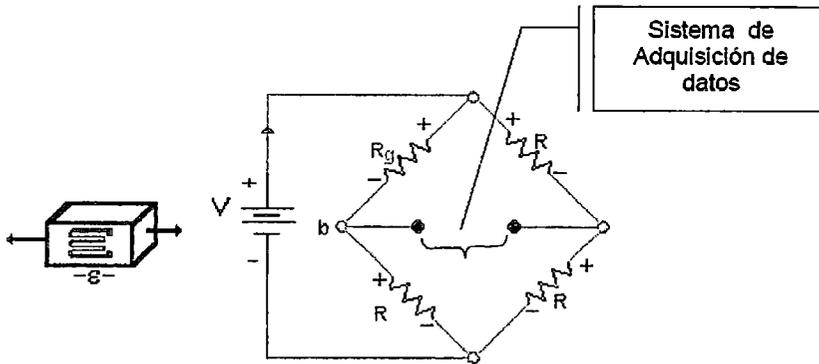


Figura 9.- Instrumentación típica de un equipo de adquisición de datos.

A continuación se estudia el caso de un strain gage que se encuentra en una barra prismática de eje recto sometida a tracción simple.

Dependiendo del tipo y complejidad de la medición que se esté efectuando, existen configuraciones diferentes del puente de Wheatstone.

**Configuración de un cuarto de puente.** Cuando se utiliza sólo un strain gage y resistores complementando el puente, la configuración se denomina *cuarto de puente*. En esta configuración los cables conductores que conectan el strain gage con el puente deben de ser del mismo calibre y si se puede, deben de trenzarse para evitar diferencia de temperatura entre ellos. La Figura 10 muestra esta configuración.

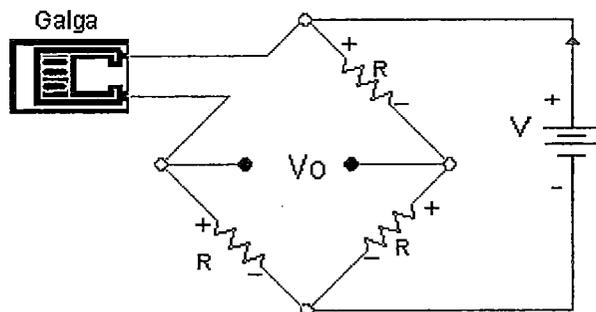


Figura 10.- Configuración de un cuarto de puente Wheatstone.

El uso de tres conductores conectados al strain gage ofrece las siguientes ventajas:

- La resistencia de los conductores, independientemente de su longitud, no desbalancea el puente porque existen cables similares en los brazos adyacentes del puente y sus efectos se cancelan.
- Los cambios en resistencia de los conductores producidos por la temperatura se cancelan en el puente.
- Los efectos de insensibilización de los conductores son divididos.
- El tercer conductor puede ir en la fuente o en la línea de señal (frecuentemente es en esta última).

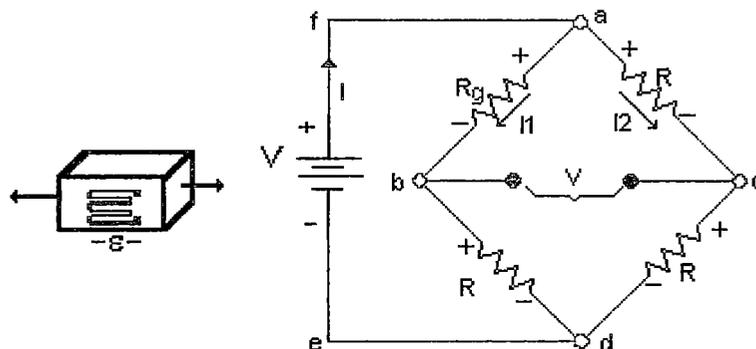


Figura 11.- Puente de Wheatstone.

Se tiene un strain gage activo, alineada en la dirección de la fuerza como se indica en la figura, inicialmente el puente se encuentra equilibrado es decir  $R_g=R$  siendo  $R_g$  la resistencia cuando sobre el strain gage no actúa ninguna fuerza externa y, por lo tanto la diferencia de potencial entre los puntos  $b$  y  $c$  es nula. Cuando el strain gage experimenta una fuerza su resistencia cambia a  $R_g=R+dR$  y las corrientes en cada rama del puente están dadas por

$$i_1 = \frac{V}{R + (R + dR)} \quad i_2 = \frac{V}{2R}$$

Mientras que la diferencia de potencial entre los puntos  $c$  y  $b$  es

$$V_{cb} = V_{ab} - V_{ac}$$

Aplicando la ley de Ohm y las dos ecuaciones anteriores se obtiene que:

$$V_{bc} = \frac{V(R+dR)}{2R+dR} - \frac{V}{2} = \frac{VdR}{4R+2dR}$$

Traduciendo este resultado a parámetros que caracterizan este transductor de fuerza

$$GF = \frac{dR/R}{dL/L} = \frac{dR/R}{\varepsilon_L}$$

Se tiene

$$V_{bc} = \frac{V.GF.\varepsilon_L}{4 + 2.GF.\varepsilon_L}$$

Donde:

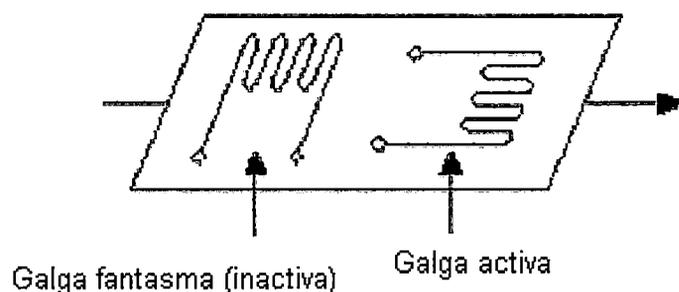
GF= Factor del strain gage.

$\varepsilon$  = Deformación unitaria.

V= Voltaje de entrada.

Idealmente, quisiéramos que el cambio en la resistencia del strain gage se deba solamente a la respuesta de la tensión aplicada.

Sin embargo, el material del strain gage, también como el material del espécimen a el cual se aplica el strain gage, también responderá a los cambios de la temperatura. Los fabricantes del strain gage procuran reducir al mínimo la sensibilidad de la temperatura procesando el material del strain gage para compensar en el rango de temperatura del material del espécimen para el cual se piensa el strain gage. Mientras que los strain gages compensados reducen la sensibilidad termal, no la quitan totalmente.



**Figura 12.- Configuración de los strain gages**

Usando dos strain gages en el puente, el efecto de la temperatura puede ser reducido al mínimo más a fondo. Por ejemplo, la figura anterior ilustra una configuración del strain gages donde está activa un strain gage (  $R_g + dR$ ), y un segundo strain gage es transversalmente colocada a la tensión aplicada. Por lo tanto, la tensión tiene poco efecto en el segundo strain gage, llamada la galga fantasma. Sin embargo, cualquier cambio en temperatura afectará ambos strain gages de la misma manera. Porque los cambios de temperatura son idénticos en los dos circuitos, el cociente de su resistencia no cambia, el voltaje o  $V$  no cambia, y los efectos del cambio de temperatura se reducen al mínimo.

**Configuración de medio puente.** Esta configuración se ilustra en la figura 13, posee un voltaje a la salida que es lineal y dobla aproximadamente la salida del circuito del cuarto puente, aquí ambos strain gages están activos solo que el segundo strain gage se coloca transversalmente al primer strain gage. Para que esta configuración funcione adecuadamente, la resistencia de un strain gage debe incrementarse mientras que la de la otra debe disminuir.

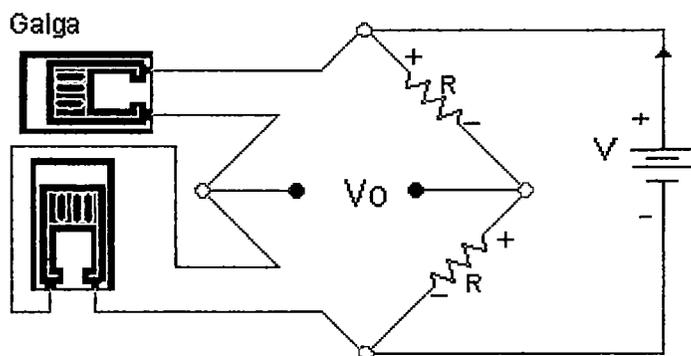


Figura 13.- Configuración de medio puente Wheatstone.

La variación de la resistencia del strain gage colocado en la dirección de aplicación de la fuerza está dada por  $R+dR$ , y para el otro strain gage que detecta la variación de la sección de la barra (efecto Poisson) es  $R- \nu .dR$ .

$$i_1 = \frac{V}{R + \delta R + R - \nu \delta R} = \frac{V}{2R + (1-\nu)\delta R} \quad i_2 = \frac{V}{2R}$$

$$V_{ab} = \frac{V(R + \delta R)}{2R + (1-\nu)\delta R} = \frac{VR + V\delta R}{2R + (1-\nu)\delta R} \quad V_{ac} = \frac{V}{2}$$

$$V_{bc} = V_{ab} - V_{ac} = \frac{V(1+\nu).GF.\varepsilon}{2(2 + GF.\varepsilon(1+\nu))}$$

Un ejemplo típico de aplicación de esta configuración es la medición de la deformación en la cara superior e inferior de una viga o la medición de deformación axial y transversal simultáneamente en un espécimen sujeto a tensión axial (Figura 14).

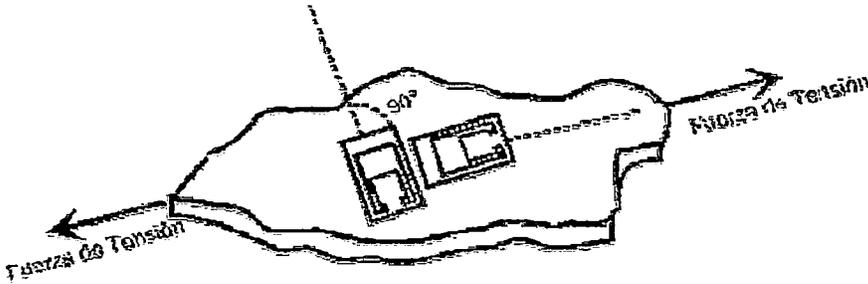


Figura 14.- Especimen sujeto a tensión.

**Configuración de puente completo.** En esta, los cuatro brazos del puente son utilizados y la sensibilidad del puente aumenta considerablemente, siendo el voltaje de salida cuatro veces el de una configuración de un cuarto de puente.

La figura 15 muestra una configuración de puente de Wheatstone completo. Esta configuración se usa cuando el punto donde se efectúa la medición está retirado de los instrumentos de medición y también cuando las condiciones ambientales son sumamente cambiantes. Su uso principal es en transductores donde se requiere leer unidades diferentes a las de deformación (presión, carga, etc).

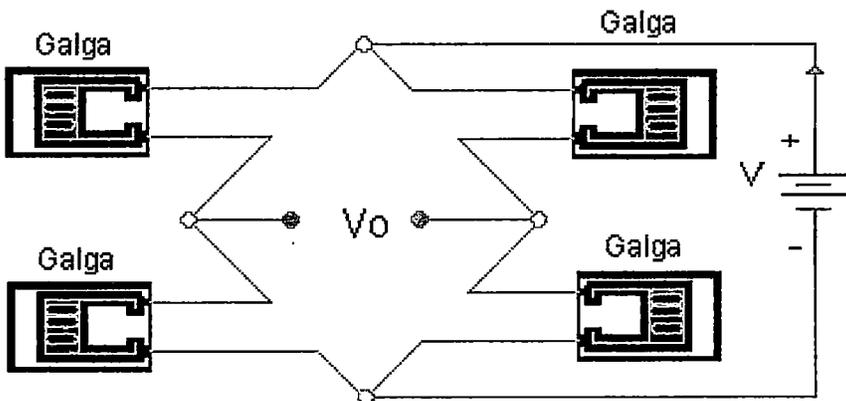


Figura 15.- Configuración de puente Wheatstone completo

Los strain gages no poseen polaridad, aunque, dependiendo de cuál de las tres configuraciones anteriores se emplee, existe un gran número de conexiones diferentes que se pueden tener para realizar el hardware de medición.

### **3.1.2 Instrumentación para nuestro caso**

#### **3.1.2.1 Diseño de Transductor de presión**

##### **Consideraciones de Diseño para Diafragmas de Transductores de Presión**

Para realizar el diseño se presentan las siguientes consideraciones que son dadas sólo como una guía general para el diseño preliminar de diafragmas de transductores de presión.

Las fórmulas mostradas aquí se basan en las siguientes suposiciones:

- El espesor uniforme del diafragma
- Deflexiones pequeñas
- Rigidez infinita y empotrada alrededor de la periferia del diafragma
- Comportamiento perfectamente elástico
- Insignificancia de la rigidez y los efectos de la masa debido a la presencia del strain gage en el diafragma.

En el caso en el que el transductor real no puede satisfacer todas las suposiciones citadas anteriormente, las fórmulas serán inexactas. Por esto, las fórmulas deberían ser usadas sólo en los estadios iniciales de desarrollo del transductor para determinar las proporciones aproximadas del transductor.

##### **Sensibilidad**

La distribución de esfuerzos en un diafragma rígidamente empotrado bajo la distribución uniforme de presión es exteriorizada en la Figura 16.

Las tensiones radiales y tangenciales en el centro del diafragma son idénticas, y expresado así:

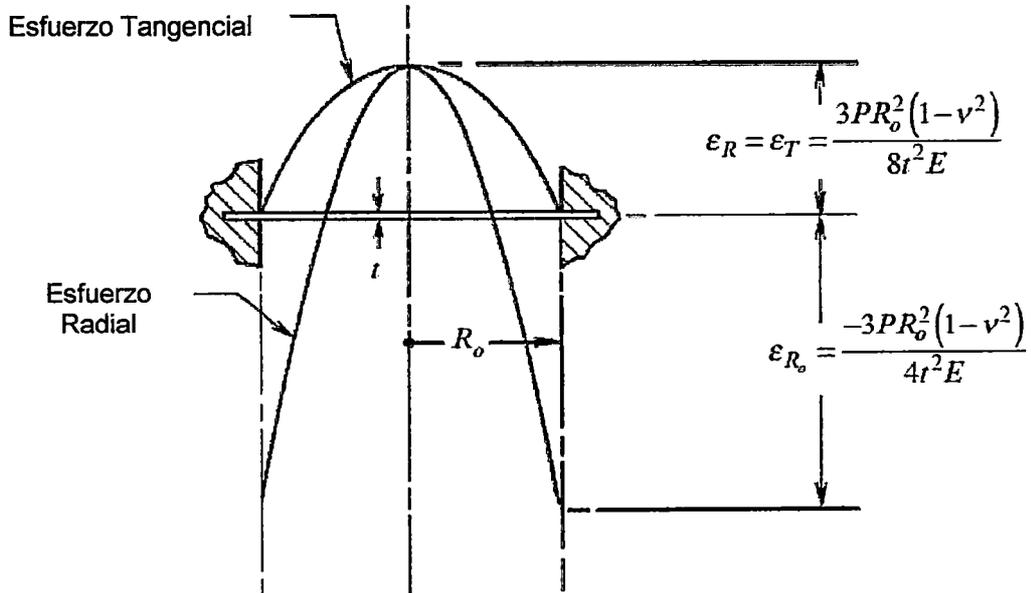


Figura 16.- Distribución de esfuerzos en el diafragma empotrado

$$\epsilon_{R_o} = \epsilon_{T_c} = \frac{3PR_o^2(1-v^2)}{8t^2E} \dots\dots(1)$$

Donde:

		U.S. Customary Unidades	Métrico (SI) Unidades
<b>P</b>	= Presión	psi	Pa
<b>R<sub>o</sub></b>	= Radio del Diafragma	in	mm
<b>t</b>	= Espesor del Diafragma	in	mm
<b>v</b>	= Constante de Poisson	Sin dimensiones	
<b>E</b>	= Modulo de Elasticidad	psi	Pa

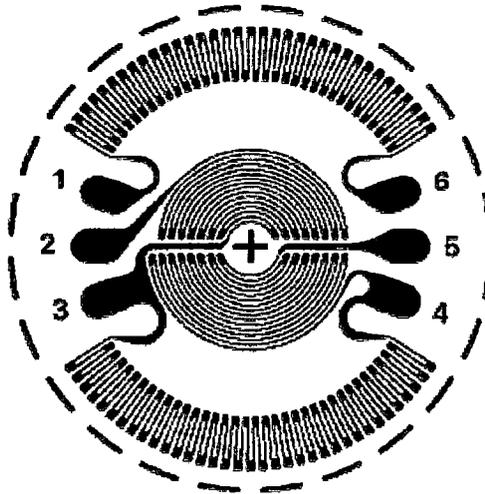
El esfuerzo radial decrece rápidamente mientras el radio aumenta, quedando negativo, e igual para dos veces el esfuerzo central (en el borde del diafragma). El esfuerzo tangencial decrece hasta el cero en el margen del diafragma. Así:

$$\epsilon_{R_o} = -\frac{3PR_o^2(1-v^2)}{4t^2E} \dots\dots(2)$$

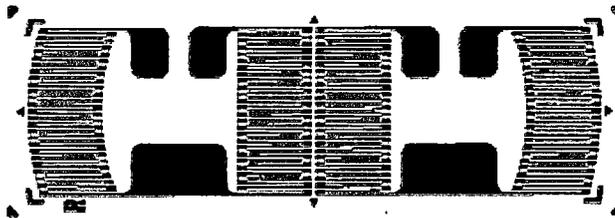
$$\epsilon_{T_o} = 0 \dots\dots(3)$$

## Diafragma del Strain Gages

Vishay Micro Measurements confecciona dos configuraciones diferentes (Figura 17a y 17b) del strain gages para el uso en diafragmas de transductores de presión.



(a) Patrón Circular



(b) Patrón Linear

**Figura 17 - Vishay Micro-Measurements diafragma de strain gages para transductores de presión**

El patrón circular tradicional como se muestra en la Fig. 2a ha sido diseñado para aprovecharse de la orientación de los campos de esfuerzos tangenciales y radiales descritos arriba. Teniendo en cuenta la diferencia de signos en los esfuerzos sometidos por los elementos radiales, tangenciales, cuadrículados, y dividiendo los elementos en pares simétricos, permisos incorporando un puente completo en un solo strain gage.

El strain gage lineal se muestra en la Figura 2b funciona tal cual la versión circular con sólo diferencias menores en la salida total del esfuerzo ( $e_o$ ). Las ventajas principales de usar un diseño lineal son la facilidad de instalación (menos superficie para vincular) y generalmente bajan el costo del strain gage.

Para modelos circulares o lineales, haciendo un promedio de la tensión sobre la región cubierta por cada strain gage (asumiendo un factor de strain gage de 2.0), y haciendo un promedio de todas las salidas de los elementos sensibles, la salida total del strain gage se da en mili voltios por voltio que puede ser expresada aproximadamente por la siguiente fórmula ( $e_o$ ):

$$e_o = 0.75 \frac{PR_o^2(1-\nu^2)}{t^2 E} \times 10^3, mV/V \dots\dots\dots(4)$$

**Linealidad**

Las ecuaciones precedentes para la tensión del diafragma y la salida del strain gage muestran que la salida es proporcional a la presión aplicada. Esta precisa linealidad tiene aplicación, sin embargo, sólo es para deflexiones de la parte pequeña del vanishingly.

Por regla general, la deflexión del diafragma en el centro no debe ser mayor que el espesor del diafragma; y para la linealidad en el orden de 0.3 %, debería estar limitado para una cuarta parte el espesor del diafragma.

El seguimiento es la fórmula para la deflexión del diafragma, basada en la teoría de small-deflection:

$$Y_c = \frac{3PR_o^4(1-\nu^2)}{16t^3 E} \dots\dots\dots(5)$$

Donde:  $Y_c$ = Centro de deflexión, in (mm).

### Frecuencia de Respuesta

Para responder fielmente a presiones dinámicas, la frecuencia resonante del diafragma debe ser considerablemente superior que la más alta frecuencia aplicada. Dependiendo fuertemente del grado de amortiguación en la convención del strain gage del diafragma y en el fluido en contacto con el diafragma, la frecuencia resonante debería ser por lo menos de tres a cinco veces que la más alta frecuencia aplicada. El tema de diseño correcto para la respuesta dinámica precisa es demasiado complicado y extensivo para ser incluido aquí. Sin embargo, para transductores se somete a las altas frecuencias o a marcar con un sostenido frente de olas de presión implicando componentes de alta frecuencia, la consideración ponderada debe ser dada a la respuesta de frecuencia, ambos en términos de la amplitud y debe poner en fase cambio.

Para las finalidades remisivas sólo, y el tema para las suposiciones listadas anterior, la frecuencia resonante seca de un diafragma rígidamente sujetado puede estar expresado usando a U.S. Customary Units como sigue:

$$f_n = \frac{0.469t}{R_o^2} \sqrt{\frac{gE}{\gamma(1-\nu^2)}}, Hz \dots\dots\dots(6)$$

Donde:           g= aceleración de la gravedad, 386.4 in/sec<sup>2</sup>  
                   y= densidad del material, lbs/in<sup>3</sup>

Desde dentro el sistema métrico (SI), la densidad está derivativa sin el efecto de gravedad, Ecuación (6) debe ser ligeramente modificado al SI utilizando Unidades como sigue:

$$f_n = \frac{0.469t}{R_o^2} \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu^2)}}, Hz \dots\dots\dots(7)$$

Donde:           ρ = Densidad del material, g/cm<sup>3</sup>

## Construcción

Para la exactitud máxima y la histéresis mínima, es práctica común diseñar transductores de presión con el fin de que el diafragma sea una parte integral del cuerpo del transductor (Figura 18).

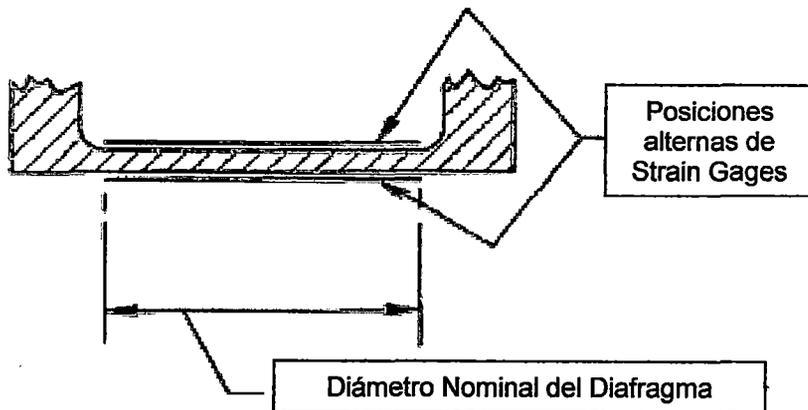


Figura 18.- Diafragma típico, configuración para transductor de presión.

No es recomendable tratar de labrar a maquina el cuerpo del transductor por una esquina interna de la unión del diafragma. Sin embargo, este es uno de los caminos más comunes para una construcción práctica del transductor, es por esto que generalmente la construcción práctica difiere del concepto idealizado correspondiente a las anteriores suposiciones y las ecuaciones dadas aquí. Por esto y las otras diferencias, el comportamiento del transductor necesariamente diferirá del ideal; y el desarrollo experimental obviamente estará obligado a optimizar el desempeño de un transductor particular.

## Cálculos para el diseño del Transductor de Presión

Utilizando las consideraciones de diseño para diafragmas de transductores de presión, en nuestro caso se realizó el diseño con Aluminio debido a su mejor grado de trabajabilidad que el acero para la elaboración de la pieza y a su menor valor de Modulo de Elasticidad.

Los datos de las propiedades del Aluminio para realizar el diseño son:

$$\nu = 0.345$$

$$E = 7.10^{10} \text{ Pa}$$

$$\text{Densidad} = 2700 \text{ kg/m}^3$$

De las ecuaciones (2), (4), (5) y (7) tenemos 10 incógnitas y de los datos de la propiedad del material tenemos 3 valores.

Luego de esto notamos que tenemos 7 incógnitas y 4 ecuaciones, así que con criterio tendremos que asumir 3 valores iniciales para obtener un diseño adecuado.

Valores Asumidos:

- Para obtener valores confiables de deformación, asumimos:

$$\xi_{RC} (\mu\text{m} / \text{m}) = 1500$$

- Considerando un espesor trabajable, asumimos:

$$t = 2\text{mm}.$$

- Debido a las dimensiones del strain gage que usaremos, asumimos:

$$R_o = 3.7\text{cm}.$$

Con estos valores asumidos, efectuamos las ecuaciones (1), (2), (3) y (4), cuyos resultados son los siguientes:

De la ecuación (1):  $\varepsilon_{R_o} = \varepsilon_{T_c} = \frac{3PR_o^2(1-\nu^2)}{8t^2E}$  tenemos:

$$P = 928.6\text{kPa}$$

De la ecuación (2): 
$$Y_c = \frac{3PR_o^4(1-v^2)}{16t^3E}$$
 tenemos:

$$Y_c = 0.5mm.$$

De la ecuación (3): 
$$e_o = 0.75 \frac{PR_o^2(1-v^2)}{t^2E} \times 10^3, mV/V$$
 tenemos:

$$e_o = 3mV/V$$

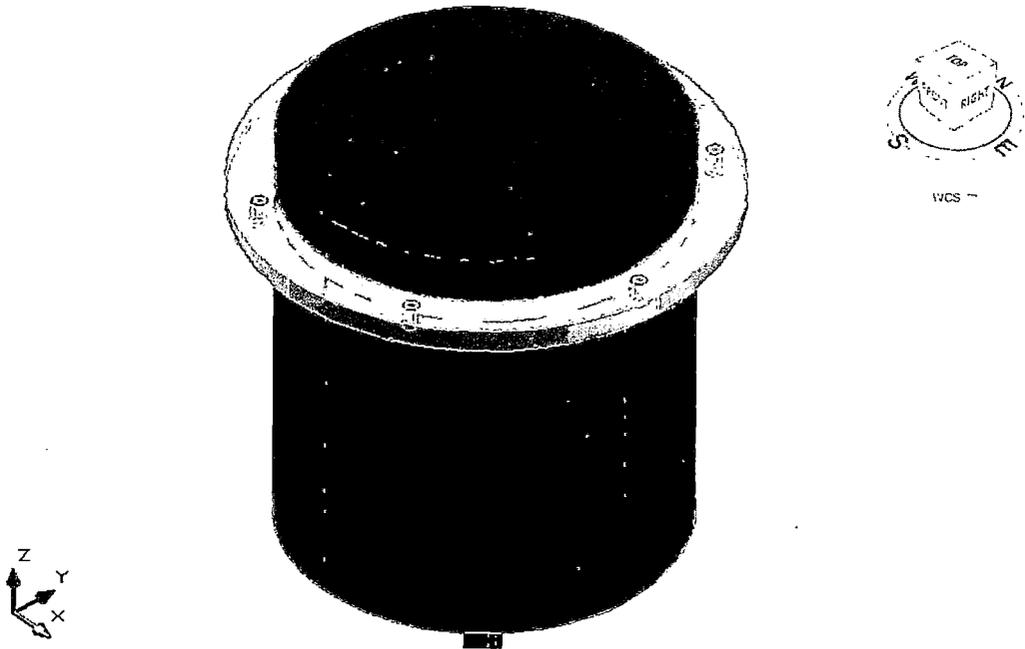
De la ecuación (4): 
$$f_n = \frac{0.469t}{R_o^2} \sqrt{\frac{E}{\rho(1-v^2)}}, Hz$$
 tenemos:

$$f_n = \frac{0.469(2 \cdot 10^{-3})}{(37.10^{-3})^2} \sqrt{\frac{7 \cdot 10^{10}}{2700(1-0.345^2)}} = 3716.93Hz$$

### Resumen de cuadro de resultados

**Cuadro 3.- Resumen de cálculos**

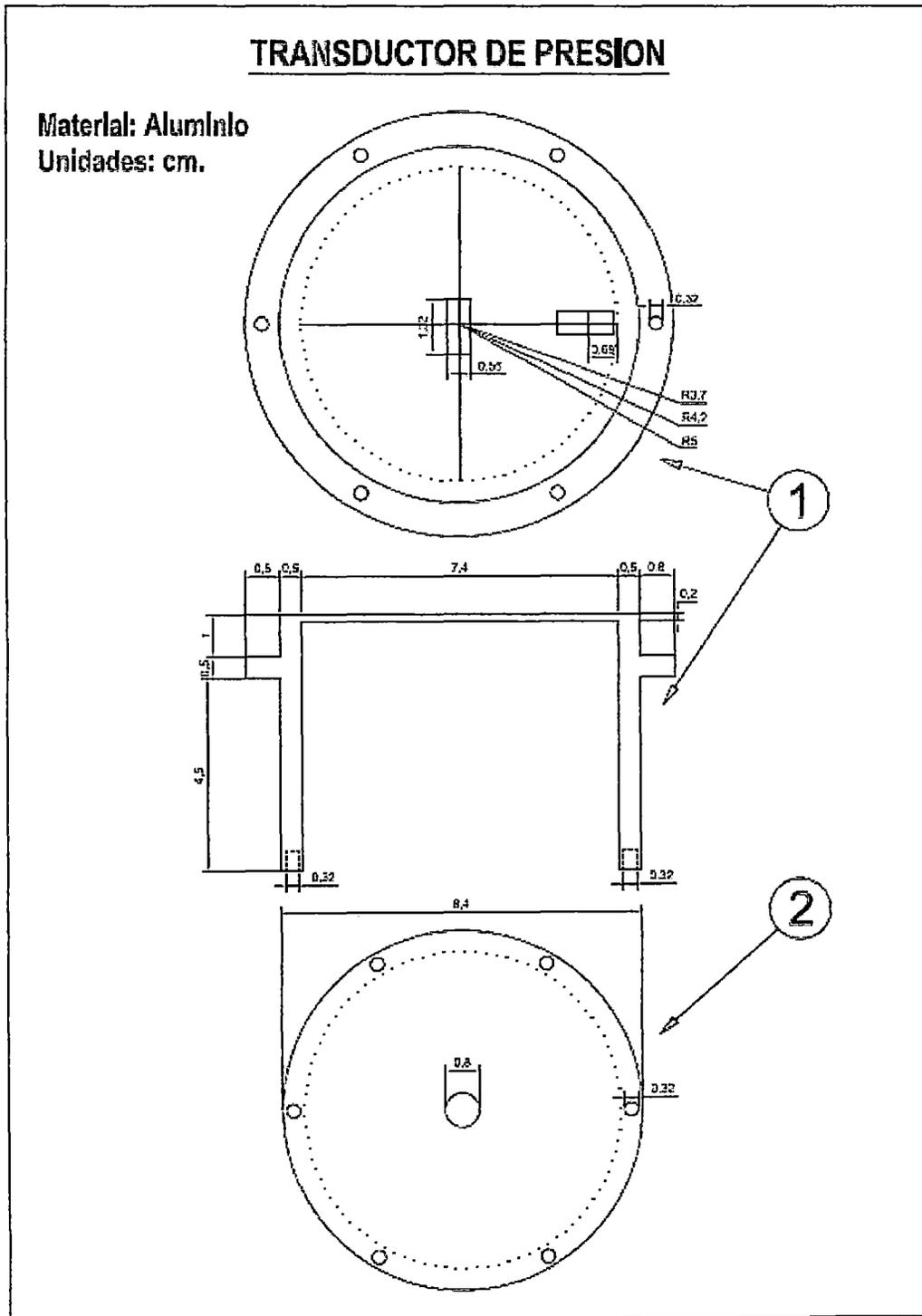
<b>P (kPa)=</b>	928.65
<b>v=</b>	0.345
<b>E (Pa)=</b>	$7 \cdot 10^{10}$
<b>R<sub>o</sub> (cm)=</b>	3.7
<b>Densidad (kg/m3)=</b>	2700
<b>E<sub>Ro</sub> =</b>	3000
<b>t (mm)=</b>	2
<b>e<sub>o</sub> (mV/V)=</b>	3
<b>Y<sub>c</sub> (mm)=</b>	0.5
<b>f<sub>n</sub> (Hz)=</b>	3716.9



**Figura 19.-** Modelo computarizado del Transductor de Presión



**Figura 20.-** Transductor de Presión hecho de Aluminio



**Figura 21.- Plano del transductor de presión**

## Ubicación de los Strain Gages en el transductor

Para realizar la ubicación de los strain gages se tuvo que buscar 2 puntos dentro del diafragma del transductor que tengan la misma deformación unitaria cuando es sometido a presión uniforme, uno a compresión y el otro a tensión para así compensar los errores propios del circuito, estos valores son los máximos posibles para obtener mayor precisión.

Para obtener la envolvente de la deformación unitaria se partió de las formulas básicas de resistencia de materiales:

$$\sigma = \frac{M.y}{I} \dots(5) \quad \wedge \quad \sigma = E.\xi \dots(6)$$

Donde:

$\sigma$  = Esfuerzo Normal

$M$  = Momento flector

$y$  = Distancia al eje neutro

$I$  = Momento de inercia

$E$  = Modulo de elasticidad

$\xi$  = Deformación unitaria

De (5) y (6):

$$\frac{M.y}{I} = E.\xi \Rightarrow \frac{M}{\xi} = \frac{E.I}{y} = \text{cte.}$$

De aquí notamos que:

$M$  y  $\xi$  son proporcionales

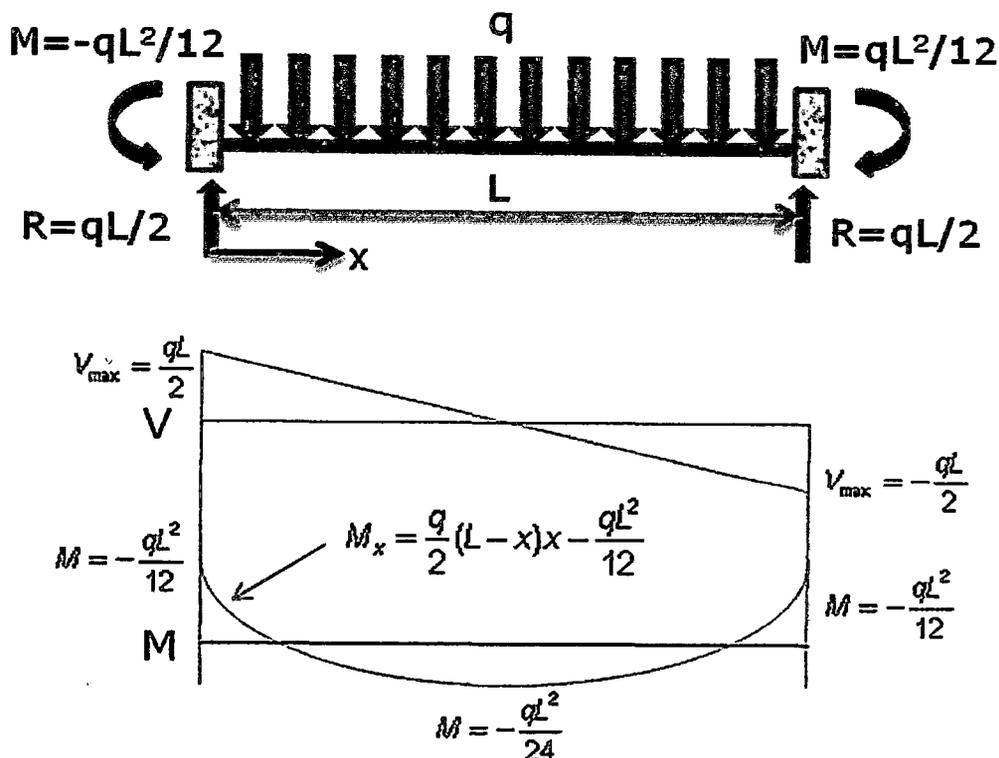


Figura 22.- Envoltente de momento de una sección doblemente empotrada

Entonces sabiendo que en una sección doblemente empotrada:

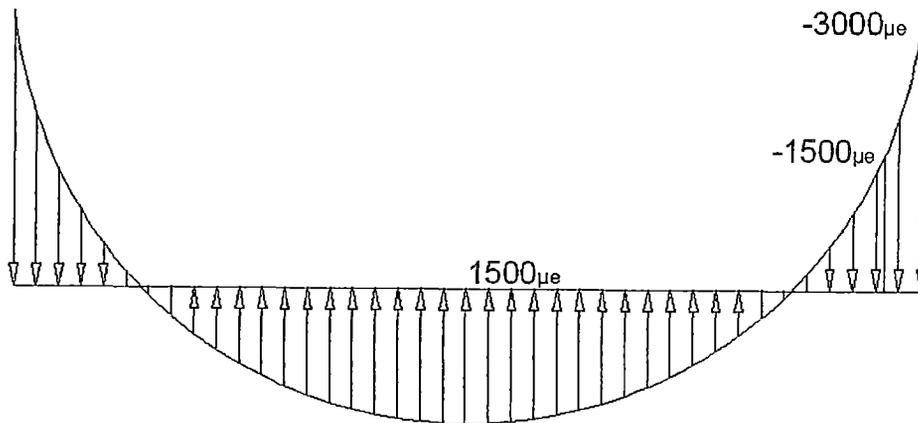
$$M_{\max} = \frac{q \cdot L^2}{12} \quad \text{y} \quad M_x = \frac{q \cdot (L-x) \cdot x}{2} - \frac{q \cdot L^2}{12}$$

Buscamos la ubicación de la deformación unitaria igual al centro de la sección pero en compresión, con la proporción:

$$\frac{M_{\max}}{-3000 \mu\epsilon} = \frac{M_x}{-1500 \mu\epsilon}$$

De aquí obtenemos:

$$x = 0.9564 \cdot L$$



**Figura 23.-** Envoltente de deformación unitaria del transductor

En nuestro caso, nosotros tenemos un  $L=7.4\text{cm}$ , entonces las 2 ubicaciones de los strain gages son:

$-1500 \mu\epsilon$  a  $6.72\text{cm}$  del borde  
 $+1500 \mu\epsilon$  en el centro del transductor



**Figura 24.-** Ubicación de los strain gages en el transductor

### 3.1.2.2 Calibración de Transductor de presión

#### Pieza utilizada para realizar la calibración

Para realizar la calibración del transductor de presión se diseñó una pieza que nos permitió utilizar el equipo TRIAXIAL para inyectarle agua a presión y someterlo a una carga uniforme, lo cual simularía la presión que se ejercerá en el transductor cuando sea llenada las columnas y placas.

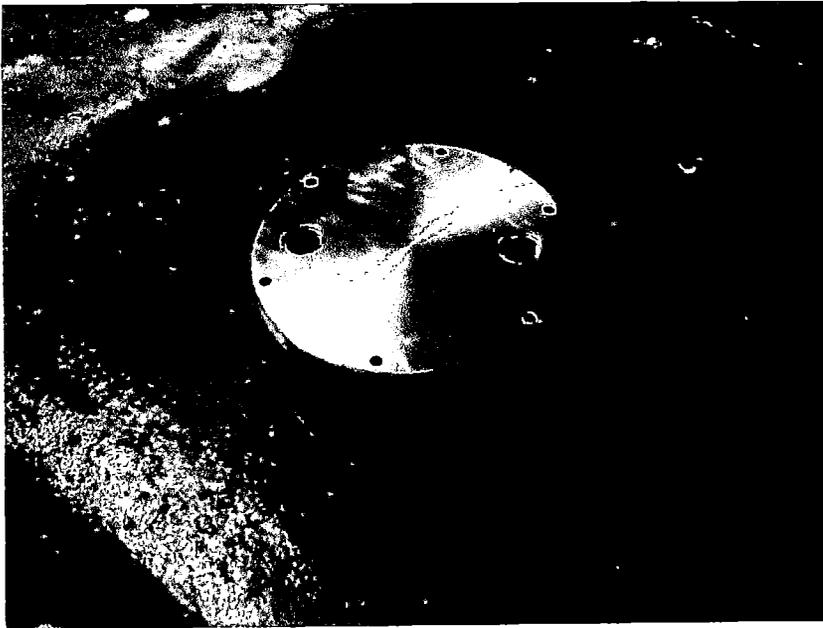


Figura 25.- Vista externa del adaptador realizada para la calibración

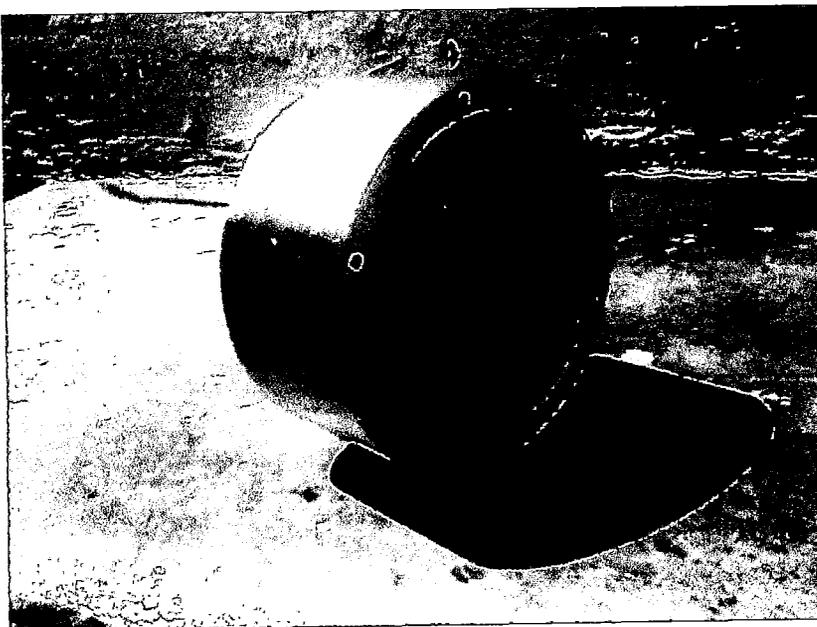
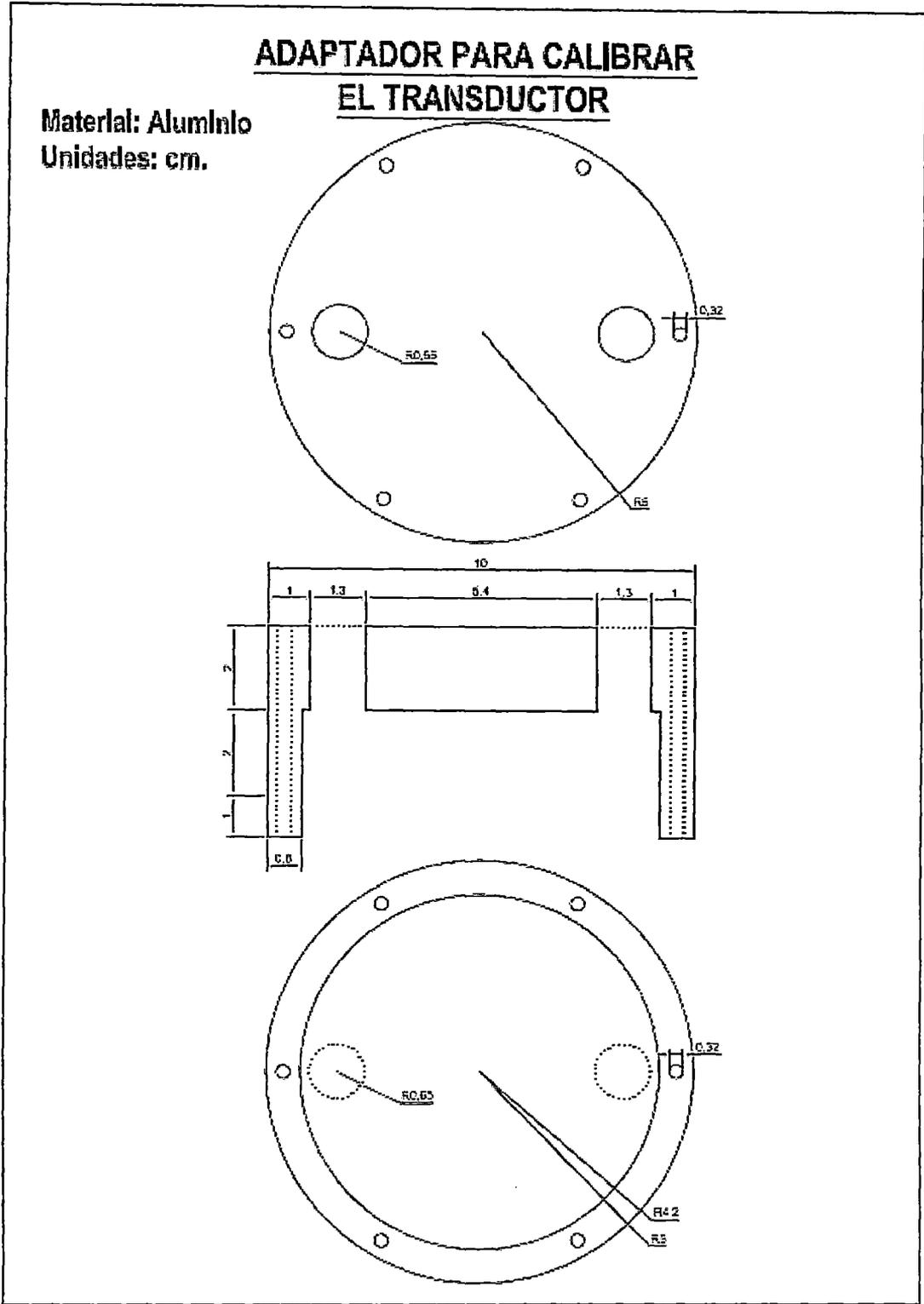


Figura 26.- Vista interna del adaptador realizada para la calibración



**Figura 27.-** Plano del calibrador para el transductor de presión

## Strain Indicator

Para obtener el registro de los datos en el ensayo de calibración, se utilizó el "Strain Indicator" que es un medidor de deformaciones unitarias.

### *Características del Strain Indicator utilizado*

Solo permite la lectura de un dato a la vez.

No graba datos.

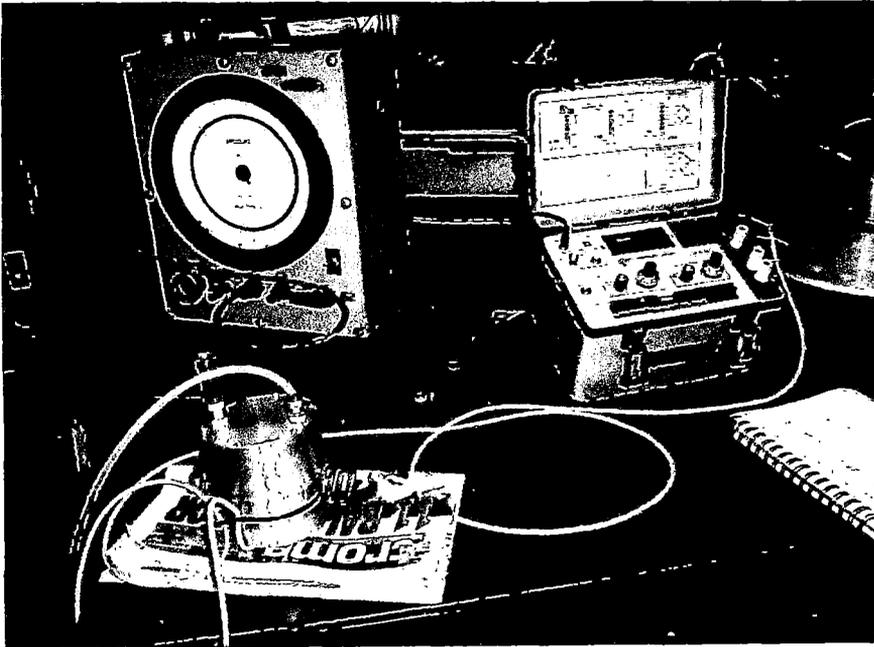


**Figura 28.- Strain Indicator**

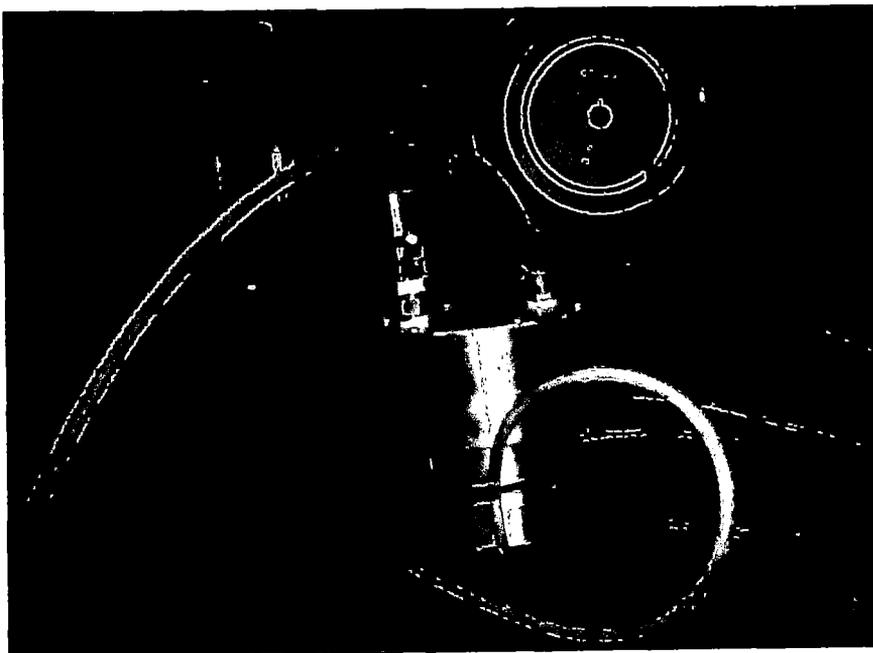
Luego de haber fabricado el adaptador, este se sobrepuso al transductor para llenarlo con agua, una vez seguros de no tener aire atrapado se conectó a un equipo pre calibrado del Laboratorio de Geotecnia del CISMID para someterlo a presiones uniformes en el diafragma y comparar en paralelo los resultados.

## Ensayo de calibración

Para realizar la calibración se sobrepuso el adaptador sobre el transductor de presión para llenarlo de agua, una vez lleno de agua y con la seguridad de no tener aire atrapado se tapa uno de los orificios para luego inyectarle presión con una manguera conectada al otro orificio del adaptador, este ensayo se realizo con el equipo pre calibrado del Laboratorio de Geotecnia del CISMID.



**Figura 29.-** Transductor de presión y equipo de calibración

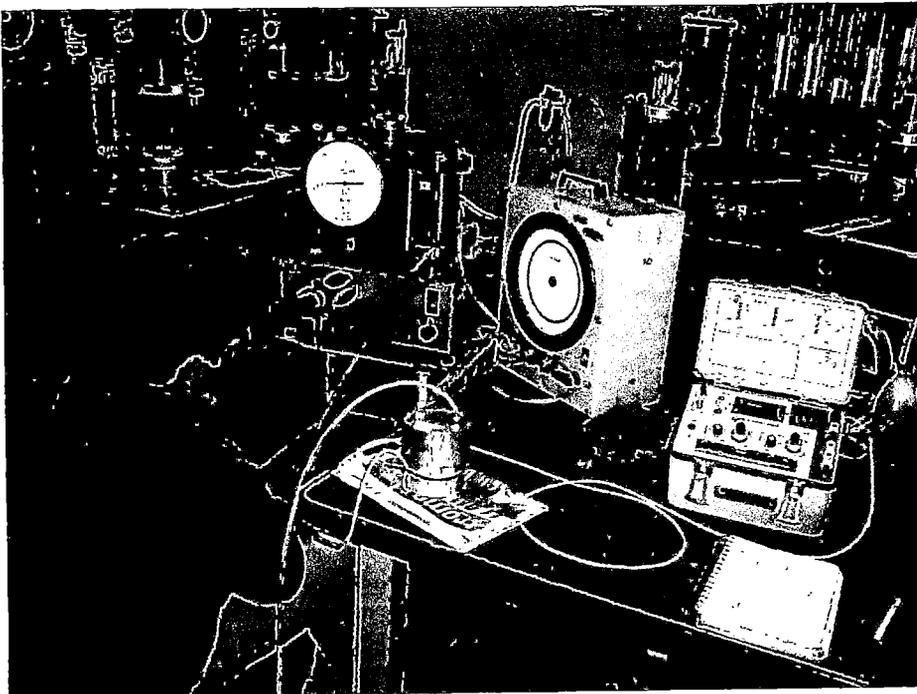


**Figura 30.-** Transductor de presión conectado al equipo pre calibrado

En la calibración del primer transductor se realizo las medidas de cada strain gage de forma individual para luego hacer lo mismo con los 2 strain gages juntos, se realizo las medidas con un intervalo de 0.2 kg/cm<sup>2</sup> comenzando desde 0 kg/cm<sup>2</sup> hasta los 5 kg/cm<sup>2</sup>.



**Figura 31.-** Equipo de calibración con una lectura de 0  $\mu\epsilon$



**Figura 32.-** Modulando la presión para la calibración del transductor

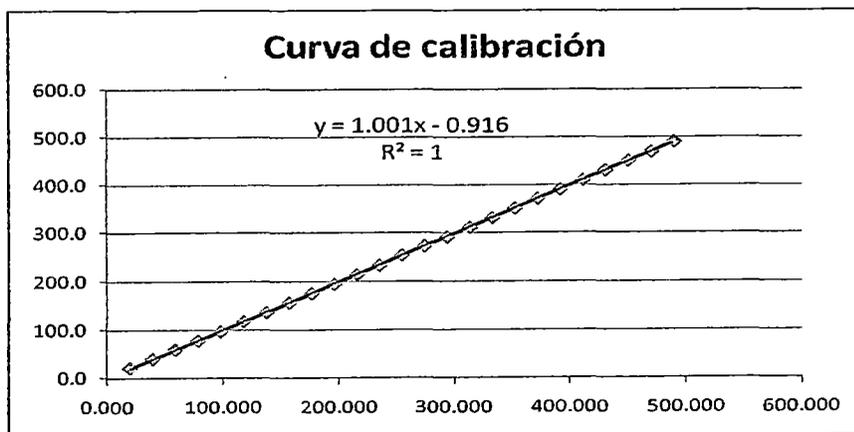
**Transductor 1**

**Strain Gage: Central**

**Cuadro 4.-** Calibración cada 2000 kg/m2 (T1C)

kg/m2	Presión Experimental (kPa)	$\mu\epsilon$	Momento	Presión Teórica (kPa)	Ajuste
2000	19.608	34	48027.6	21.0	21.94
4000	39.216	64	90404.9	39.6	40.50
6000	58.824	95	134194.8	58.8	59.67
8000	78.431	125	176572.0	77.4	78.23
10000	98.039	156	220361.9	96.6	97.40
12000	117.647	189	266976.9	117.0	117.81
14000	137.255	219	309354.2	135.6	136.36
16000	156.863	252	355969.2	156.0	156.77
18000	176.471	283	399759.1	175.2	175.94
20000	196.078	314	443549.0	194.4	195.12
22000	215.686	346	488751.4	214.2	214.91
24000	235.294	378	533953.9	234.0	234.70
26000	254.902	412	581981.5	255.1	255.73
28000	274.510	442	624358.7	273.6	274.28
30000	294.118	472	666736.0	292.2	292.84
32000	313.725	505	713351.1	312.6	313.25
34000	333.333	537	758553.5	332.5	333.04
36000	352.941	569	803755.9	352.3	352.83
38000	372.549	602	850371.0	372.7	373.24
40000	392.157	632	892748.2	391.3	391.79
42000	411.765	664	937950.7	411.1	411.59
44000	431.373	698	985978.3	432.1	432.61
46000	450.980	730	1031180.7	451.9	452.41
48000	470.588	760	1073558.0	470.5	470.96
50000	490.196	794	1121585.6	491.6	491.99

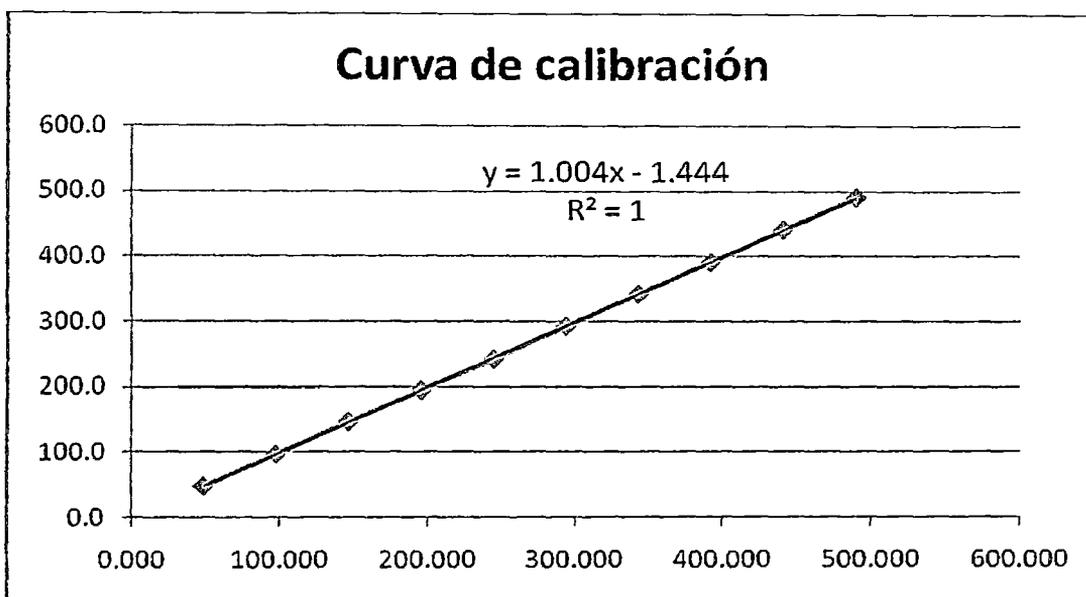
**Grafico 22.-** Recta de calibración con datos cada 2000 kg/m2 (T1C)



**Cuadro 5.- Calibración cada 5000 kg/m2 (T1C)**

kg/m2	Presión Experimental (kPa)	$\mu\varepsilon$	Momento	Presión Teórica (kPa)	Ajuste
5000	49.020	78	110181.0	48.3	49.71
10000	98.039	157	221774.5	97.2	98.60
15000	147.059	238	336193.2	147.3	148.73
20000	196.078	315	444961.5	195.0	196.38
25000	245.098	392	553729.9	242.7	244.03
30000	294.118	474	669561.2	293.5	294.78
35000	343.137	554	782567.3	343.0	344.29
40000	392.157	633	894160.8	391.9	393.18
45000	441.176	714	1008579.5	442.0	443.30
50000	490.196	794	1121585.6	491.6	492.81

**Grafico 23.- Recta de calibración con datos cada 5000 kg/m2 (T1C)**



Con estos resultados se pudo obtener una precisión de:

**Cuadro 6.- Precisión de Transductor (T1C)**

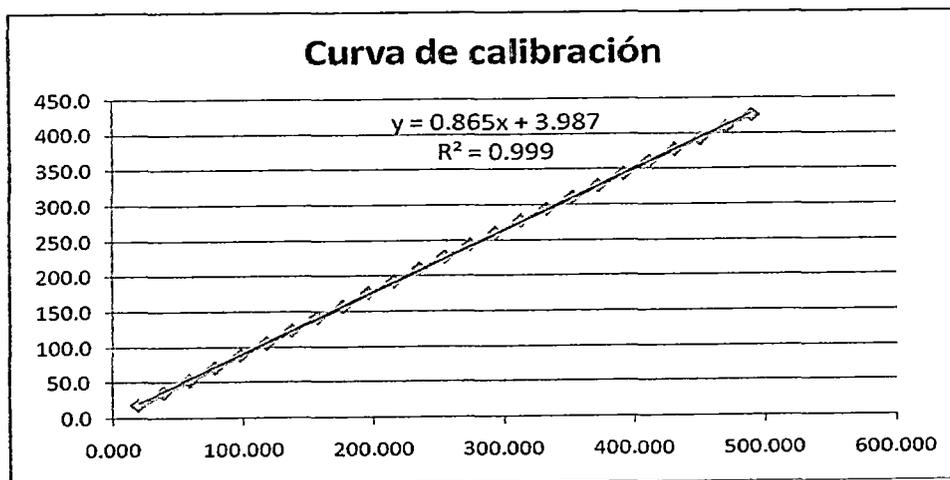
Secuencia	$\mu\varepsilon$	Presión (KPa)
0.2 kg/cm2	1	0.61919505
0.5 kg/cm2	1	0.61616826

**Strain Gage: Lateral**

**Cuadro 7.-** Calibración cada 2000 kg/m2 (T1L)

kg/m2	Presión Experimental (kPa)	$\mu\epsilon$	Momento	Presión Teórica (kPa)	Ajuste
2000	19.608	-30	-42377.3	18.6	16.86
4000	39.216	-58	-81929.4	35.9	36.90
6000	58.824	-85	-120069.0	52.6	56.23
8000	78.431	-114	-161033.7	70.6	76.98
10000	98.039	-143	-201998.4	88.5	97.74
12000	117.647	-170	-240138.0	105.2	117.06
14000	137.255	-199	-281102.7	123.2	137.82
16000	156.863	-228	-322067.4	141.2	158.58
18000	176.471	-253	-357381.8	156.6	176.47
20000	196.078	-284	-401171.7	175.8	198.66
22000	215.686	-310	-437898.7	191.9	217.26
24000	235.294	-339	-478863.4	209.9	238.02
26000	254.902	-366	-517002.9	226.6	257.34
28000	274.510	-393	-555142.5	243.3	276.67
30000	294.118	-420	-593282.1	260.0	295.99
32000	313.725	-448	-632834.2	277.4	316.03
34000	333.333	-474	-669561.2	293.5	334.64
36000	352.941	-501	-707700.7	310.2	353.97
38000	372.549	-527	-744427.7	326.3	372.58
40000	392.157	-554	-782567.3	343.0	391.90
42000	411.765	-582	-822119.4	360.3	411.94
44000	431.373	-609	-860259.0	377.0	431.26
46000	450.980	-633	-894160.8	391.9	448.44
48000	470.588	-660	-932300.4	408.6	467.77
50000	490.196	-687	-970439.9	425.3	487.09

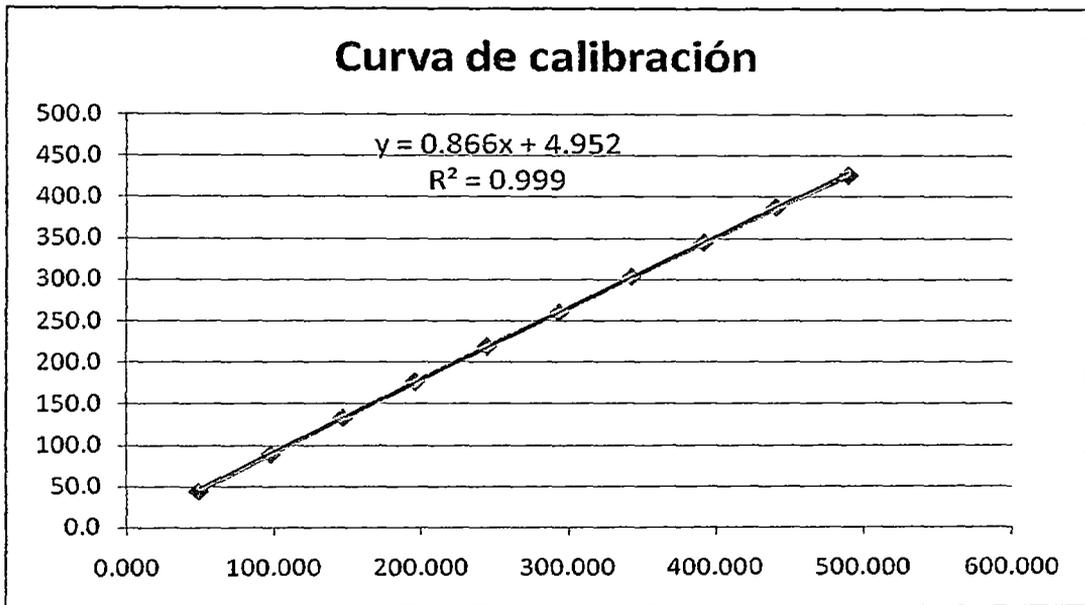
**Grafico 24.-** Recta de calibración con datos cada 2000 kg/m2 (T1L)



**Cuadro 8.-** Calibración cada 5000 kg/m<sup>2</sup> (T1L)

kg/m <sup>2</sup>	Presión Experimental (kPa)	με	Momento	Presión Teórica (kPa)	Ajuste
5000	49.020	-72	-101705.5	44.6	45.75
10000	98.039	-144	-203411.0	89.2	97.23
15000	147.059	-215	-303703.9	133.1	147.98
20000	196.078	-285	-402584.3	176.4	198.03
25000	245.098	-354	-500052.0	219.2	247.35
30000	294.118	-421	-594694.6	260.6	295.25
35000	343.137	-490	-692162.4	303.4	344.58
40000	392.157	-557	-786805.0	344.8	392.48
45000	441.176	-626	-884272.8	387.6	441.81
50000	490.196	-689	-973265.1	426.6	486.84

**Grafico 25.-** Recta de calibración con datos cada 5000 kg/m<sup>2</sup> (T1L)



Con estos resultados se pudo obtener una precisión de:

**Cuadro 9.-** Precisión de Transductor (T1L)

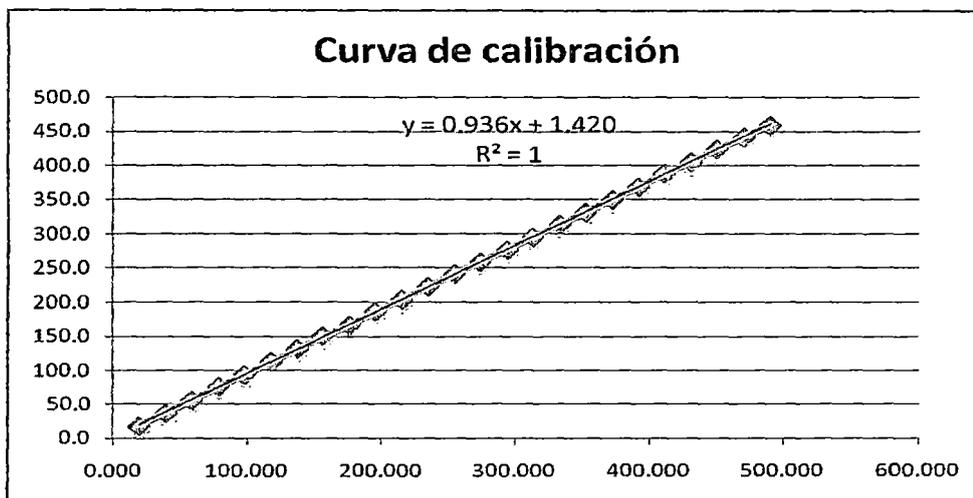
Secuencia	με	Presión (kPa)
0.2 kg/cm <sup>2</sup>	1	0.71626824
0.5 kg/cm <sup>2</sup>	1	0.7150348

**Strain Gage: ½ Punte**

**Cuadro 10.- Calibración cada 2000 kg/m2 (T1)**

kg/m2	Presión Experimental (kPa)	$\mu\epsilon$	Media de $\mu\epsilon$	Momento	Presión Teórica (kPa)	Ajuste
2000	19.608	-60	-30	-42377.3	18.6	18.33
4000	39.216	-121	-60.5	-85460.9	37.5	38.50
6000	58.824	-180	-90	-127131.9	55.7	58.01
8000	78.431	-243	-121.5	-171628.0	75.2	78.85
10000	98.039	-300	-150	-211886.5	92.9	97.70
12000	117.647	-361	-180.5	-254970.0	111.7	117.87
14000	137.255	-422	-211	-298053.6	130.6	138.04
16000	156.863	-483	-241.5	-341137.2	149.5	158.22
18000	176.471	-536	-268	-378570.5	165.9	175.75
20000	196.078	-601	-300.5	-424479.2	186.0	197.24
22000	215.686	-658	-329	-464737.6	203.7	216.09
24000	235.294	-719	-359.5	-507821.2	222.6	236.27
26000	254.902	-780	-390	-550904.8	241.4	256.44
28000	274.510	-838	-419	-591869.5	259.4	275.62
30000	294.118	-894	-447	-631421.6	276.7	294.14
32000	313.725	-954	-477	-673798.9	295.3	313.99
34000	333.333	-1013	-506.5	-715469.9	313.6	333.50
36000	352.941	-1071	-535.5	-756434.6	331.5	352.68
38000	372.549	-1131	-565.5	-798811.9	350.1	372.52
40000	392.157	-1191	-595.5	-841189.2	368.7	392.36
42000	411.765	-1254	-627	-885685.4	388.2	413.20
44000	431.373	-1309	-654.5	-924531.2	405.2	431.39
46000	450.980	-1371	-685.5	-968321.1	424.4	451.89
48000	470.588	-1426	-713	-1007166.9	441.4	470.08
50000	490.196	-1484	-742	-1048131.6	459.4	489.26

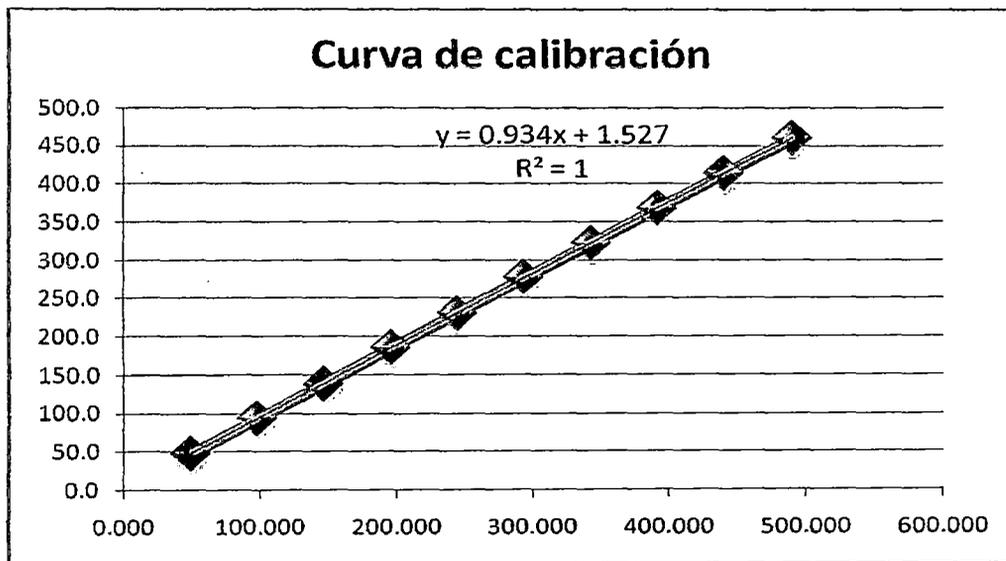
**Grafico 26.- Recta de calibración con datos cada 2000 kg/m2 (T1)**



**Cuadro 11.-** Calibración cada 5000 kg/m<sup>2</sup> (T1)

kg/m <sup>2</sup>	Presión Experimental (kPa)	μE	Media de μE	Momento	Presión Teórica (kPa)	Ajuste
5000	49.020	-153	-76.5	-108062.1	47.4	49.07
10000	98.039	-301	-150.5	-212592.7	93.2	98.12
15000	147.059	-448	-224	-316417.1	138.7	146.84
20000	196.078	-598	-299	-422360.3	185.1	196.56
25000	245.098	-745	-372.5	-526184.7	230.6	245.28
30000	294.118	-895	-447.5	-632127.9	277.0	294.99
35000	343.137	-1039	-519.5	-733833.4	321.6	342.71
40000	392.157	-1190	-595	-840482.9	368.4	392.76
45000	441.176	-1336	-668	-943601.0	413.6	441.15
50000	490.196	-1486	-743	-1049544.2	460.0	490.86

**Grafico 27.-** Recta de calibración con datos cada 5000 kg/m<sup>2</sup> (T1)



Con estos resultados se pudo obtener una precisión de:

**Cuadro 12.-** Precisión de Transductor (T1)

Secuencia	μE	Presión (kPa)
0.2 kg/cm <sup>2</sup>	1	0.330469
0.5 kg/cm <sup>2</sup>	1	0.33096509

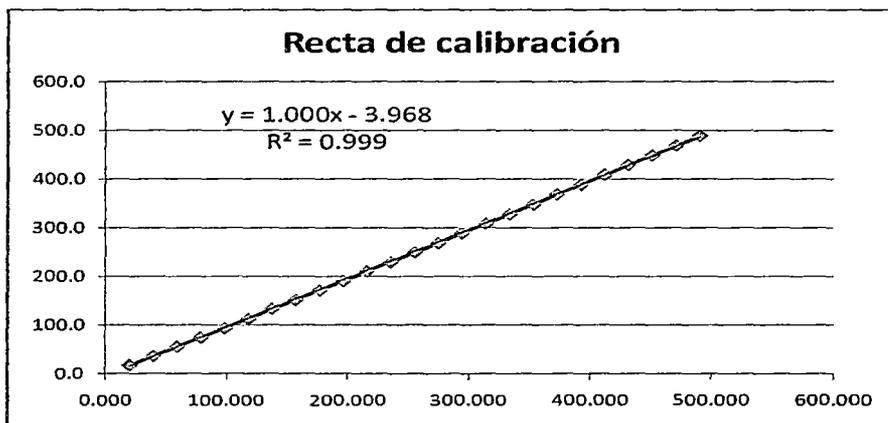
**Transductor 2**

**Strain Gage: Central**

**Cuadro 13.- Calibración cada 2000 kg/m2 (T2C)**

kg/m2	Presión Experimental (kPa)	$\mu\epsilon$	Momento	Presión Teórica (kPa)	Ajuste
2000	19.608	30	42377.3	18.6	22.54
4000	39.216	60	84754.6	37.1	41.11
6000	58.824	91	128544.4	56.3	60.31
8000	78.431	121	170921.7	74.9	78.88
10000	98.039	152	214711.6	94.1	98.07
12000	117.647	183	258501.5	113.3	117.26
14000	137.255	216	305116.5	133.7	137.69
16000	156.863	246	347493.8	152.3	156.27
18000	176.471	278	392696.2	172.1	176.08
20000	196.078	308	435073.5	190.7	194.65
22000	215.686	341	481688.5	211.1	215.08
24000	235.294	371	524065.8	229.7	233.65
26000	254.902	403	569268.3	249.5	253.46
28000	274.510	434	613058.1	268.7	272.66
30000	294.118	467	659673.2	289.1	293.09
32000	313.725	499	704875.6	308.9	312.90
34000	333.333	530	748665.5	328.1	332.09
36000	352.941	562	793867.9	347.9	351.90
38000	372.549	595	840482.9	368.4	372.33
40000	392.157	627	885685.4	388.2	392.14
42000	411.765	660	932300.4	408.6	412.57
44000	431.373	693	978915.4	429.0	433.00
46000	450.980	725	1024117.8	448.8	452.81
48000	470.588	757	1069320.3	468.7	472.63
50000	490.196	790	1115935.3	489.1	493.06

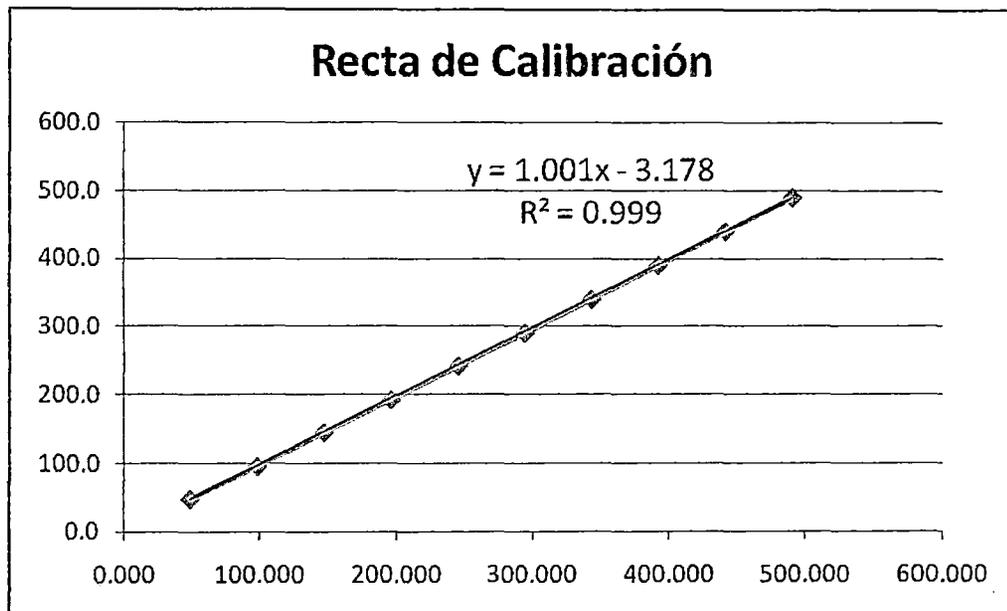
**Grafico 28.- Recta de calibración con datos cada 2000 kg/m2 (T2C)**



**Cuadro 14.-** Calibración cada 5000 kg/m2 (T2C)

kg/m2	Presión Experimental (kPa)	$\mu\varepsilon$	Momento	Presión Teórica (kPa)	Ajuste
5000	49.020	77	108768.4	47.7	50.80
10000	98.039	154	217536.8	95.3	98.42
15000	147.059	233	329130.3	144.2	147.28
20000	196.078	310	437898.7	191.9	194.90
25000	245.098	390	550904.8	241.4	244.38
30000	294.118	468	661085.7	289.7	292.62
35000	343.137	548	774091.8	339.3	342.10
40000	392.157	629	888510.5	389.4	392.20
45000	441.176	710	1002929.2	439.6	442.30
50000	490.196	790	1115935.3	489.1	491.77

**Grafico 29.-** Recta de calibración con datos cada 5000 kg/m2 (T2C)



Con estos resultados se pudo obtener una precisión de:

**Cuadro 15.-** Precisión de Transductor (T2C)

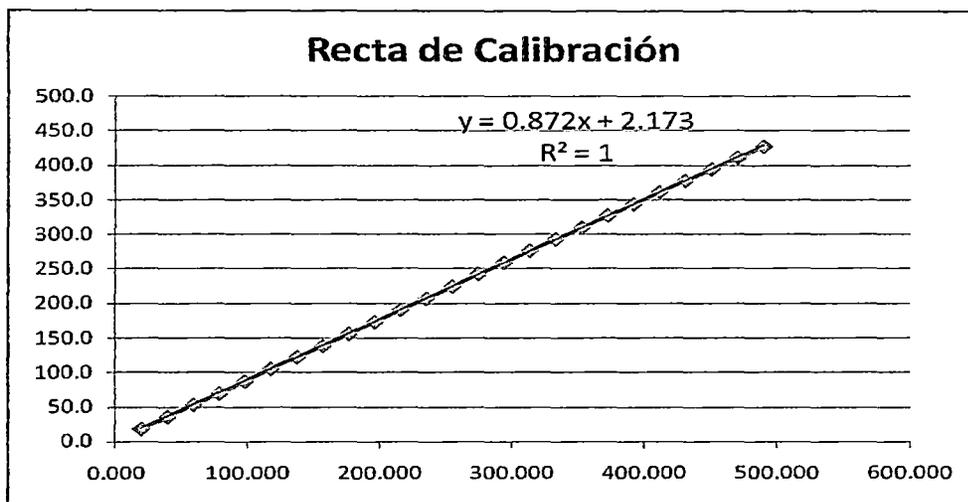
Secuencia	$\mu\varepsilon$	Presión (kPa)
0.2 kg/cm2	1	0.61919505
0.5 kg/cm2	1	0.61876083

**Strain Gage: Lateral**

**Cuadro 16.-** Calibración cada 2000 kg/m2 (T2L)

kg/m2	Presión Experimental (kPa)	$\mu\epsilon$	Momento	Presión Teórica (kPa)	Ajuste
2000	19.608	-30	-42377.3	18.6	18.81
4000	39.216	-58	-81929.4	35.9	38.69
6000	58.824	-86	-121481.6	53.2	58.57
8000	78.431	-112	-158208.6	69.3	77.03
10000	98.039	-141	-199173.3	87.3	97.61
12000	117.647	-170	-240138.0	105.2	118.20
14000	137.255	-198	-279690.1	122.6	138.08
16000	156.863	-224	-316417.1	138.7	156.54
18000	176.471	-252	-355969.2	156.0	176.42
20000	196.078	-280	-395521.4	173.3	196.30
22000	215.686	-308	-435073.5	190.7	216.18
24000	235.294	-335	-473213.1	207.4	235.35
26000	254.902	-363	-512765.2	224.7	255.23
28000	274.510	-392	-553729.9	242.7	275.82
30000	294.118	-419	-591869.5	259.4	294.99
32000	313.725	-447	-631421.6	276.7	314.87
34000	333.333	-474	-669561.2	293.5	334.04
36000	352.941	-501	-707700.7	310.2	353.21
38000	372.549	-529	-747252.9	327.5	373.08
40000	392.157	-556	-785392.4	344.2	392.25
42000	411.765	-584	-824944.6	361.6	412.13
44000	431.373	-611	-863084.1	378.3	431.30
46000	450.980	-638	-901223.7	395.0	450.47
48000	470.588	-665	-939363.3	411.7	469.64
50000	490.196	-691	-976090.3	427.8	488.10

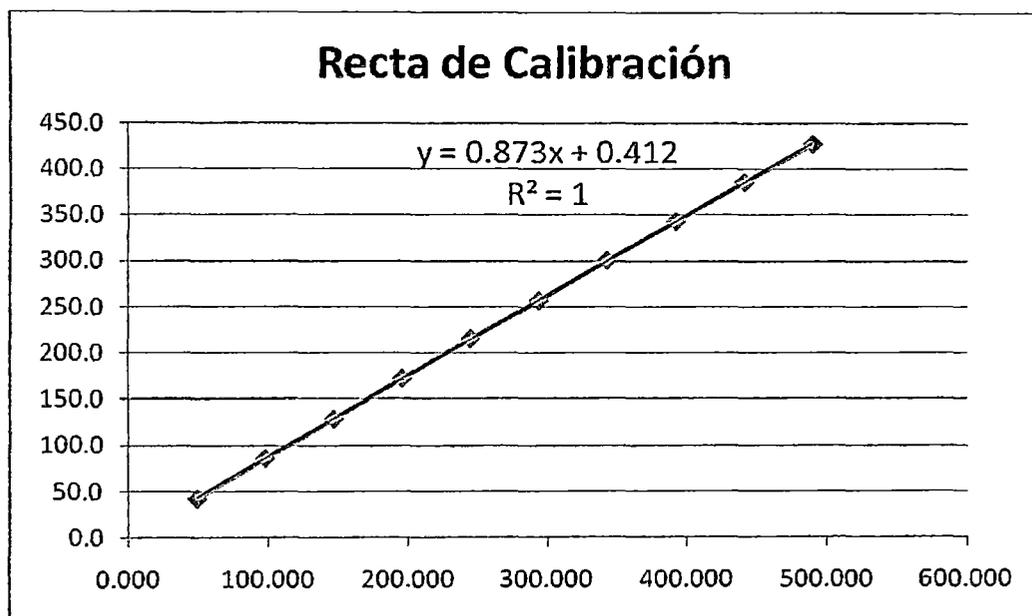
**Grafico 30.-** Recta de calibración con datos cada 2000 kg/m2 (T2L)



**Cuadro 17.-** Calibración cada 5000 kg/m<sup>2</sup> (T2L)

kg/m <sup>2</sup>	Presión Experimental (kPa)	μE	Momento	Presión Teórica (kPa)	Ajuste
5000	49.020	-68	-96055.2	42.1	47.75
10000	98.039	-139	-196348.1	86.1	98.10
15000	147.059	-208	-293815.9	128.8	147.03
20000	196.078	-278	-392696.2	172.1	196.68
25000	245.098	-348	-491576.6	215.4	246.32
30000	294.118	-415	-586219.2	256.9	293.83
35000	343.137	-486	-686512.1	300.9	344.18
40000	392.157	-554	-782567.3	343.0	392.40
45000	441.176	-623	-880035.1	385.7	441.34
50000	490.196	-690	-974677.7	427.2	488.85

**Gráfico 31.-** Recta de calibración con datos cada 5000 kg/m<sup>2</sup> (T2L)



Con estos resultados se pudo obtener una precisión de:

**Cuadro 18.-** Precisión de Transductor (T2L)

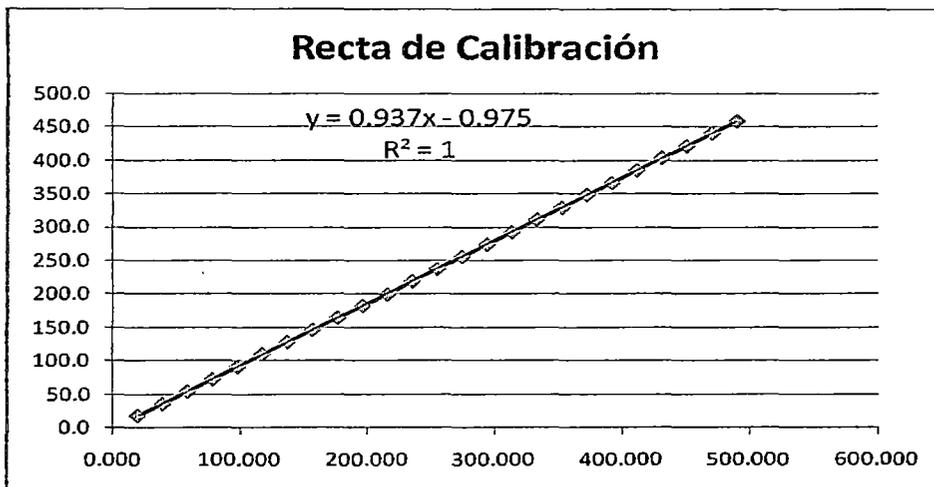
Secuencia	μE	Presión (kPa)
0.2 kg/cm <sup>2</sup>	1	0.71193379
0.5 kg/cm <sup>2</sup>	1	0.70928693

**Strain Gage: ½ Punte**

**Cuadro 19.-** Calibración cada 2000 kg/m2 (T2)

kg/m2	Presión Experimental (kPa)	$\mu\epsilon$	Media de $\mu\epsilon$	Momento	Presión Teórica (kPa)	Ajuste
2000	19.608	-59	-29.5	-41671.0	18.3	20.53
4000	39.216	-115	-57.5	-81223.1	35.6	39.03
6000	58.824	-175	-87.5	-123600.4	54.2	58.85
8000	78.431	-234	-117	-165271.4	72.4	78.35
10000	98.039	-293	-146.5	-206942.4	90.7	97.84
12000	117.647	-356	-178	-251438.6	110.2	118.65
14000	137.255	-414	-207	-292403.3	128.2	137.81
16000	156.863	-473	-236.5	-334074.3	146.4	157.30
18000	176.471	-532	-266	-375745.3	164.7	176.79
20000	196.078	-590	-295	-416710.0	182.6	195.95
22000	215.686	-645	-322.5	-455555.9	199.7	214.12
24000	235.294	-708	-354	-500052.0	219.2	234.94
26000	254.902	-767	-383.5	-541723.0	237.4	254.43
28000	274.510	-827	-413.5	-584100.3	256.0	274.25
30000	294.118	-886	-443	-625771.3	274.3	293.74
32000	313.725	-945	-472.5	-667442.3	292.5	313.23
34000	333.333	-1006	-503	-710525.9	311.4	333.38
36000	352.941	-1065	-532.5	-752196.9	329.7	352.88
38000	372.549	-1126	-563	-795280.5	348.6	373.03
40000	392.157	-1183	-591.5	-835538.9	366.2	391.86
42000	411.765	-1245	-622.5	-879328.8	385.4	412.34
44000	431.373	-1305	-652.5	-921706.1	404.0	432.16
46000	450.980	-1362	-681	-961964.5	421.6	450.99
48000	470.588	-1424	-712	-1005754.4	440.8	471.48
50000	490.196	-1482	-741	-1046719.1	458.8	490.64

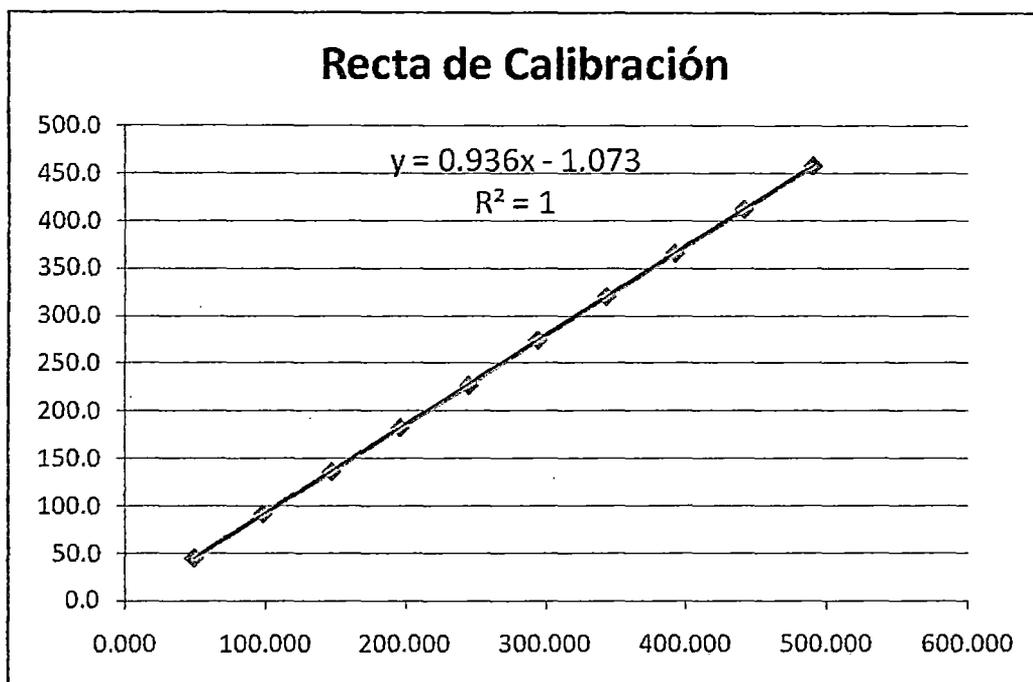
**Gráfico 32.-** Recta de calibración con datos cada 2000 kg/m2 (T2)



**Cuadro 20.-** Calibración cada 5000 kg/m2 (T2)

kg/m2	Presión Experimental (kPa)	$\mu\epsilon$	Media de $\mu\epsilon$	Momento	Presión Teórica (kPa)	Ajuste
5000	49.020	-145	-72.5	-102411.8	44.9	49.10
10000	98.039	-296	-148	-209061.3	91.6	99.04
15000	147.059	-440	-220	-310766.8	136.2	146.66
20000	196.078	-590	-295	-416710.0	182.6	196.27
25000	245.098	-734	-367	-518415.5	227.2	243.89
30000	294.118	-887	-443.5	-626477.6	274.6	294.49
35000	343.137	-1035	-517.5	-731008.3	320.4	343.44
40000	392.157	-1183	-591.5	-835538.9	366.2	392.38
45000	441.176	-1332	-666	-940775.8	412.3	441.66
50000	490.196	-1480	-740	-1045306.5	458.1	490.60

**Grafico 33.-** Recta de calibración con datos cada 5000 kg/m2 (T2)



Con estos resultados se pudo obtener una precisión de:

**Cuadro 21.-** Precisión de Transductor (T2)

Secuencia	$\mu\epsilon$	Presión (kPa)
0.2 kg/cm2	1	0.330702
0.5 kg/cm2	1	0.33046927

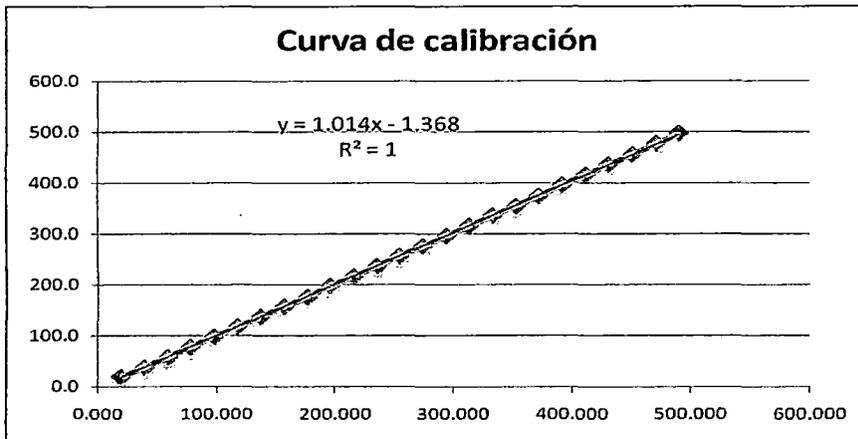
**Transductor 3**

**Strain Gage: Central**

**Cuadro 22.-** Calibración cada 2000 kg/m2 (T3C)

kg/m <sup>2</sup>	Presión Experimental (kPa)	με	Momento	Presión Teórica (kPa)	Ajuste
2000	19.608	31	43789.9	19.2	20.28
4000	39.216	63	88992.3	39.0	39.81
6000	58.824	95	134194.8	58.8	59.35
8000	78.431	127	179397.2	78.6	78.89
10000	98.039	159	224599.6	98.4	98.43
12000	117.647	190	268389.5	117.6	117.35
14000	137.255	223	315004.5	138.1	137.50
16000	156.863	255	360207.0	157.9	157.04
18000	176.471	286	403996.8	177.1	175.97
20000	196.078	320	452024.4	198.1	196.73
22000	215.686	350	494401.7	216.7	215.04
24000	235.294	383	541016.7	237.1	235.19
26000	254.902	415	586219.2	256.9	254.73
28000	274.510	446	630009.0	276.1	273.65
30000	294.118	479	676624.1	296.5	293.80
32000	313.725	511	721826.5	316.4	313.34
34000	333.333	543	767029.0	336.2	332.88
36000	352.941	574	810818.8	355.4	351.81
38000	372.549	606	856021.3	375.2	371.34
40000	392.157	640	904048.9	396.2	392.10
42000	411.765	672	949251.3	416.0	411.64
44000	431.373	705	995866.3	436.5	431.79
46000	450.980	738	1042481.3	456.9	451.94
48000	470.588	771	1089096.4	477.3	472.08
50000	490.196	804	1135711.4	497.8	492.23

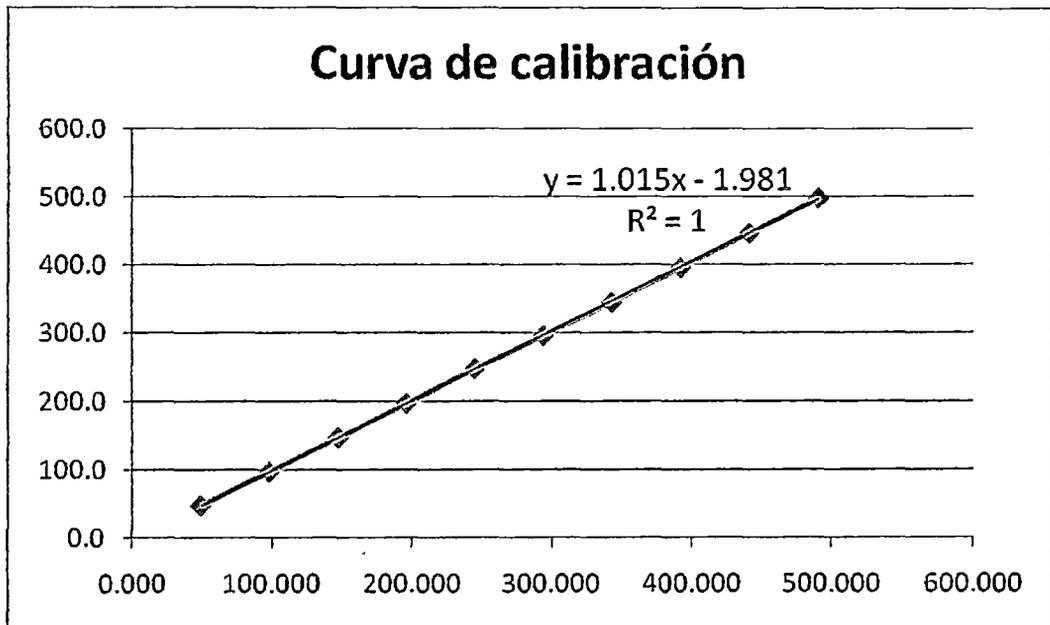
**Grafico 34.-** Recta de calibración con datos cada 2000 kg/m2 (T3C)



**Cuadro 23.-** Calibración cada 5000 kg/m2 (T3C)

kg/m2	Presión Experimental (kPa)	$\mu\epsilon$	Momento	Presión Teórica (kPa)	Ajuste
5000	49.020	78	110181.0	48.3	49.53
10000	98.039	158	223187.1	97.8	98.32
15000	147.059	238	336193.2	147.3	147.12
20000	196.078	319	450611.9	197.5	196.53
25000	245.098	400	565030.5	247.6	245.93
30000	294.118	478	675211.5	295.9	293.51
35000	343.137	557	786805.0	344.8	341.69
40000	392.157	639	902636.3	395.6	391.71
45000	441.176	721	1018467.5	446.4	441.73
50000	490.196	804	1135711.4	497.8	492.35

**Grafico 35.-** Recta de calibración con datos cada 5000 kg/m2 (T3C)



Con estos resultados se pudo obtener una precisión de:

**Cuadro 24.-** Precisión de Transductor (T3C)

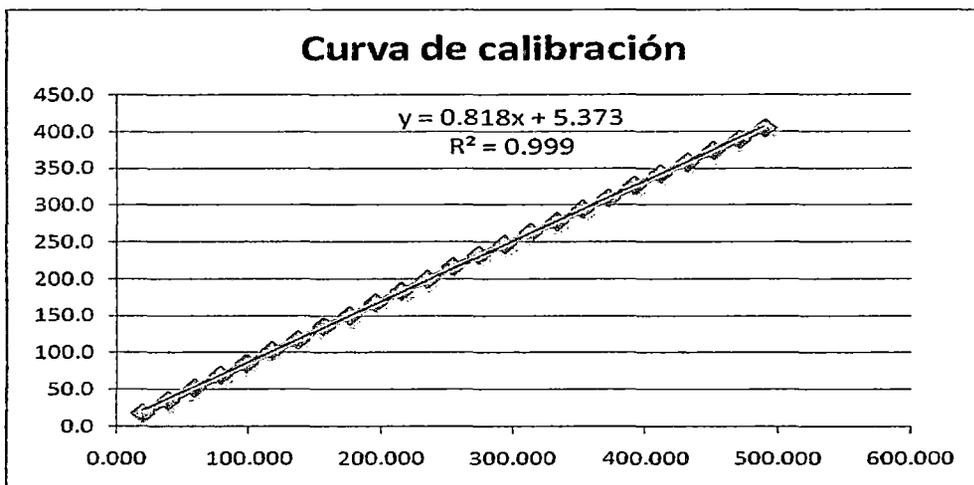
Secuencia	$\mu\epsilon$	Presión (kPa)
0.2 kg/cm2	1	0.60878168
0.5 kg/cm2	1	0.60768109

**Strain Gage: Lateral**

**Cuadro 25.-** Calibración cada 2000 kg/m2 (T3L)

kg/m2	Presión Experimental (kPa)	$\mu\epsilon$	Momento	Presión Teórica (kPa)	Ajuste
2000	19.608	-29	-40964.7	18.0	15.38
4000	39.216	-57	-80516.9	35.3	36.57
6000	58.824	-84	-118656.4	52.0	57.01
8000	78.431	-112	-158208.6	69.3	78.20
10000	98.039	-138	-194935.5	85.4	97.88
12000	117.647	-166	-234487.7	102.8	119.07
14000	137.255	-190	-268389.5	117.6	137.23
16000	156.863	-219	-309354.2	135.6	159.18
18000	176.471	-243	-343256.1	150.4	177.34
20000	196.078	-270	-381395.6	167.2	197.78
22000	215.686	-297	-419535.2	183.9	218.21
24000	235.294	-322	-454849.6	199.3	237.14
26000	254.902	-349	-492989.1	216.1	257.57
28000	274.510	-375	-529716.1	232.2	277.25
30000	294.118	-400	-565030.5	247.6	296.17
32000	313.725	-424	-598932.4	262.5	314.33
34000	333.333	-449	-634246.8	278.0	333.25
36000	352.941	-476	-672386.3	294.7	353.69
38000	372.549	-500	-706288.2	309.5	371.85
40000	392.157	-527	-744427.7	326.3	392.29
42000	411.765	-554	-782567.3	343.0	412.72
44000	431.373	-578	-816469.1	357.8	430.89
46000	450.980	-604	-853196.1	373.9	450.57
48000	470.588	-628	-887097.9	388.8	468.73
50000	490.196	-653	-922412.4	404.3	487.65

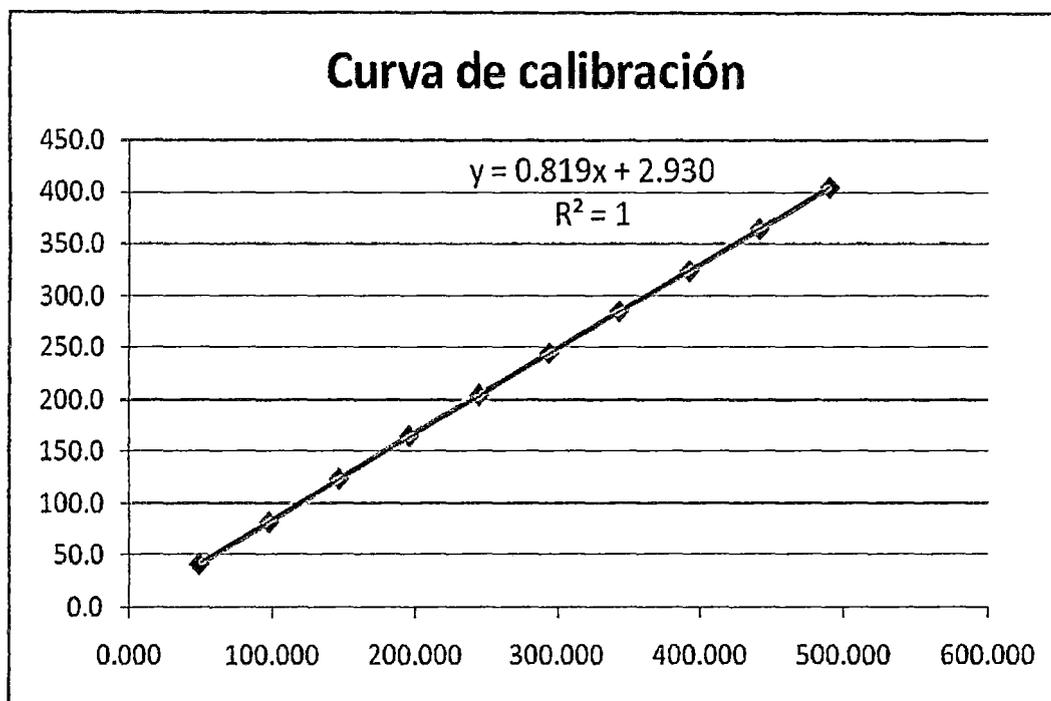
**Grafico 36.-** Recta de calibración con datos cada 2000 kg/m2 (T3L)



**Cuadro 26.-** Calibración cada 5000 kg/m2 (T3L)

kg/m2	Presión Experimental (kPa)	$\mu\epsilon$	Momento	Presión Teórica (kPa)	Ajuste
5000	49.020	-68	-96055.2	42.1	47.83
10000	98.039	-133	-187872.7	82.3	96.96
15000	147.059	-200	-282515.3	123.8	147.61
20000	196.078	-267	-377157.9	165.3	198.25
25000	245.098	-330	-466150.2	204.3	245.88
30000	294.118	-395	-557967.7	244.5	295.01
35000	343.137	-460	-649785.1	284.8	344.15
40000	392.157	-523	-738777.4	323.8	391.77
45000	441.176	-588	-830594.9	364.0	440.90
50000	490.196	-653	-922412.4	404.3	490.04

**Grafico 37.-** Recta de calibración con datos cada 5000 kg/m2 (T3L)



Con estos resultados se pudo obtener una precisión de:

**Cuadro 27.-** Precisión de Transductor (T3L)

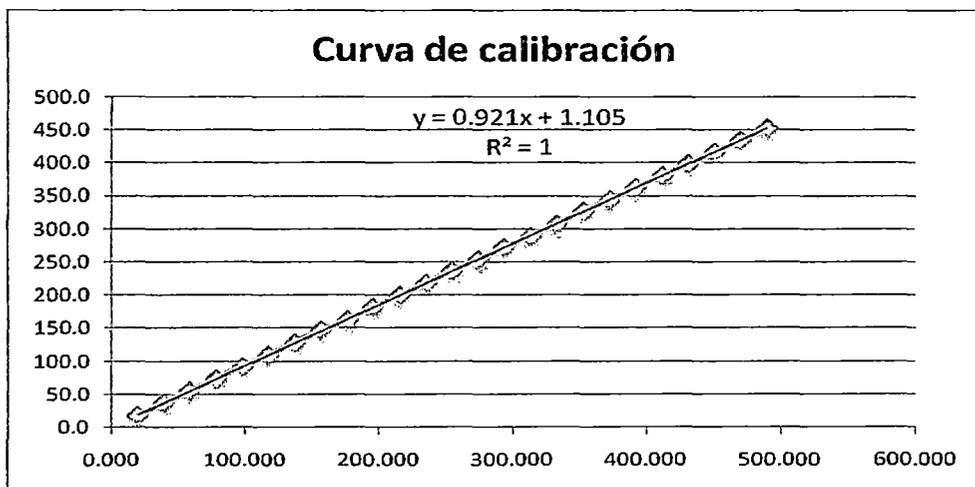
Secuencia	$\mu\epsilon$	Presión (kPa)
0.2 kg/cm2	1	0.75414781
0.5 kg/cm2	1	0.75414781

**Strain Gage: ½ Punte**

**Cuadro 28.-** Calibración cada 2000 kg/m2 (T3)

kg/m2	Presión Experimental (kPa)	$\mu\epsilon$	Media de $\mu\epsilon$	Momento	Presión Teórica (kPa)	Ajuste
2000	19.608	59	29.5	41671.0	18.3	18.63
4000	39.216	119	59.5	84048.3	36.8	38.80
6000	58.824	178	89	125719.3	55.1	58.63
8000	78.431	238	119	168096.6	73.7	78.79
10000	98.039	297	148.5	209767.6	91.9	98.62
12000	117.647	355	177.5	250732.3	109.9	118.12
14000	137.255	414	207	292403.3	128.2	137.95
16000	156.863	475	237.5	335486.9	147.0	158.45
18000	176.471	525	262.5	370801.3	162.5	175.25
20000	196.078	586	293	413884.9	181.4	195.76
22000	215.686	644	322	454849.6	199.3	215.25
24000	235.294	704	352	497226.9	217.9	235.42
26000	254.902	765	382.5	540310.5	236.8	255.92
28000	274.510	820	410	579156.3	253.8	274.40
30000	294.118	878	439	620121.0	271.8	293.90
32000	313.725	935	467.5	660379.4	289.4	313.05
34000	333.333	992	496	700637.9	307.1	332.21
36000	352.941	1055	527.5	745134.0	326.6	353.39
38000	372.549	1115	557.5	787511.3	345.1	373.55
40000	392.157	1170	585	826357.2	362.2	392.04
42000	411.765	1228	614	867321.9	380.1	411.53
44000	431.373	1288	644	909699.2	398.7	431.70
46000	450.980	1346	673	950663.9	416.7	451.19
48000	470.588	1404	702	991628.6	434.6	470.69
50000	490.196	1461	730.5	1031887.0	452.3	489.84

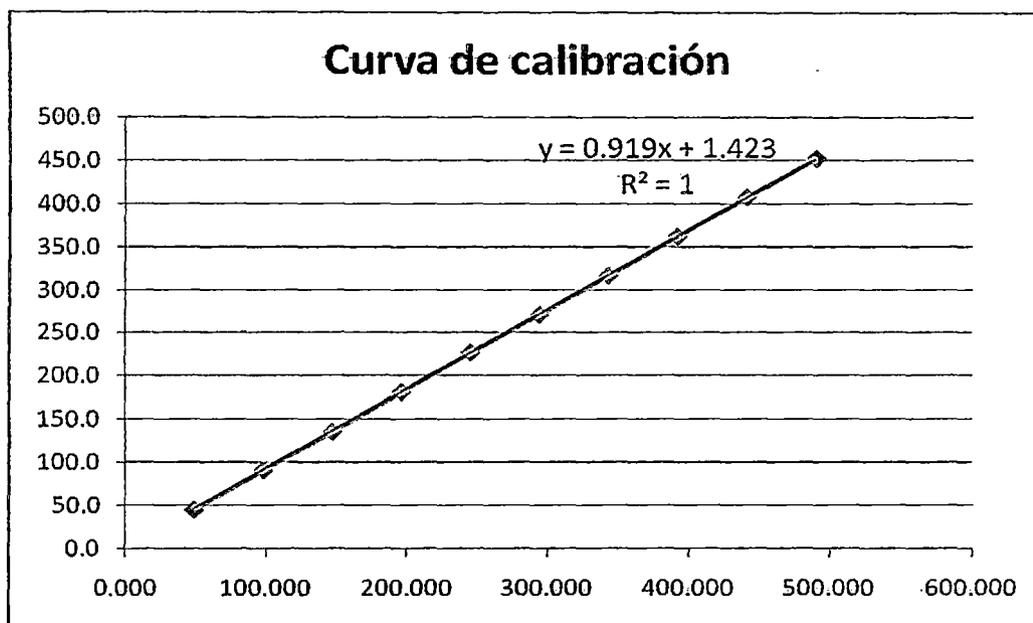
**Grafico 38.-** Recta de calibración con datos cada 2000 kg/m2 (T3)



**Cuadro 29.-** Calibración cada 5000 kg/m<sup>2</sup> (T3)

kg/m <sup>2</sup>	Presión Experimental (kPa)	με	Media de με	Momento	Presión Teórica (kPa)	Ajuste
5000	49.020	149	74.5	-105236.9	46.1	48.64
10000	98.039	297	148.5	-209767.6	91.9	98.49
15000	147.059	440	220	-310766.8	136.2	146.66
20000	196.078	588	294	-415297.4	182.0	196.51
25000	245.098	735	367.5	-519121.8	227.5	246.02
30000	294.118	877	438.5	-619414.7	271.5	293.85
35000	343.137	1022	511	-721826.5	316.4	342.69
40000	392.157	1169	584.5	-825650.9	361.9	392.21
45000	441.176	1316	658	-929475.2	407.4	441.72
50000	490.196	1460	730	-1031180.7	451.9	490.23

**Grafico 39.-** Recta de calibración con datos cada 5000 kg/m<sup>2</sup> (T3)



Con estos resultados se pudo obtener una precisión de:

**Cuadro 30.-** Precisión de Transductor (T3)

Secuencia	με	Presión (kPa)
0.2 kg/cm <sup>2</sup>	1	-0.335655
0.5 kg/cm <sup>2</sup>	1	-0.33651905

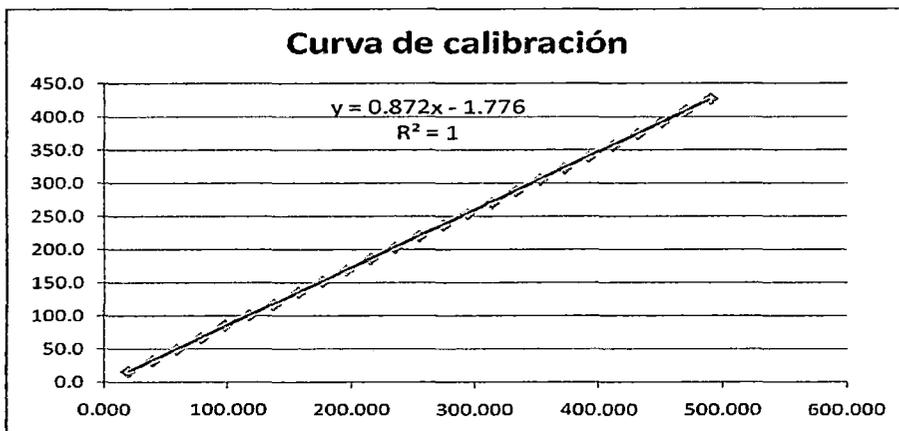
**Transductor 4**

**Strain Gage: Central**

**Cuadro 31.-** Calibración cada 2000 kg/m<sup>2</sup> (T4C)

kg/m <sup>2</sup>	Presión Experimental (kPa)	με	Momento	Presión Teórica (kPa)	Ajuste
2000	19.608	26	36727.0	16.1	20.50
4000	39.216	52	73454.0	32.2	38.96
6000	58.824	80	113006.1	49.5	58.83
8000	78.431	108	152558.2	66.9	78.71
10000	98.039	138	194935.5	85.4	100.01
12000	117.647	163	230249.9	100.9	117.76
14000	137.255	189	266976.9	117.0	136.22
16000	156.863	219	309354.2	135.6	157.52
18000	176.471	246	347493.8	152.3	176.69
20000	196.078	273	385633.3	169.0	195.86
22000	215.686	301	425185.5	186.3	215.74
24000	235.294	328	463325.0	203.1	234.91
26000	254.902	356	502877.2	220.4	254.79
28000	274.510	383	541016.7	237.1	273.96
30000	294.118	411	580568.9	254.4	293.84
32000	313.725	437	617295.9	270.5	312.30
34000	333.333	466	658260.6	288.5	332.89
36000	352.941	494	697812.7	305.8	352.76
38000	372.549	521	735952.3	322.6	371.93
40000	392.157	549	775504.4	339.9	391.81
42000	411.765	577	815056.6	357.2	411.69
44000	431.373	605	854608.7	374.6	431.57
46000	450.980	634	895573.4	392.5	452.16
48000	470.588	662	935125.5	409.8	472.04
50000	490.196	690	974677.7	427.2	491.92

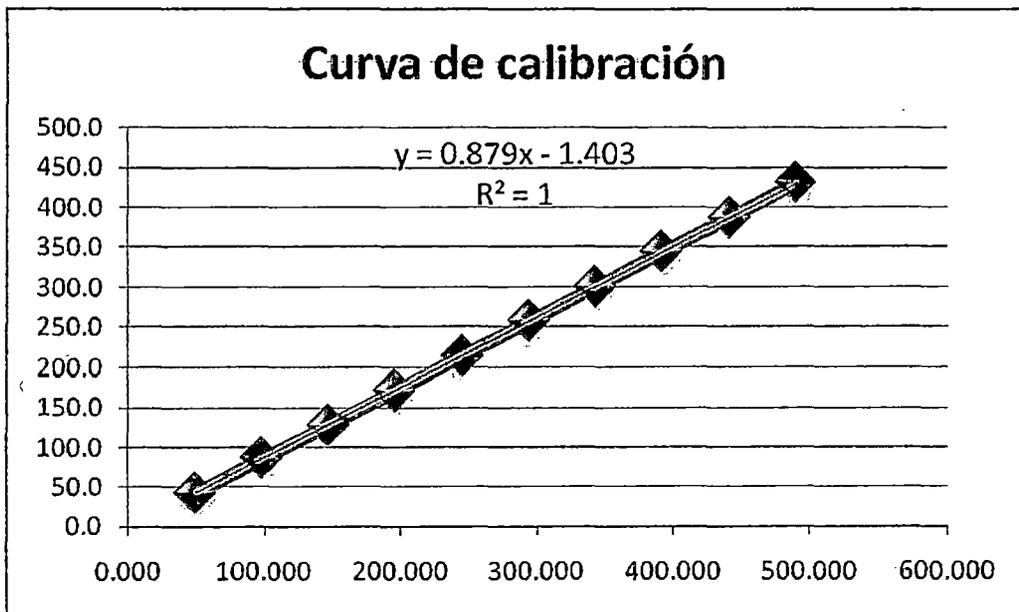
**Gráfico 40.-** Recta de calibración con datos cada 2000 kg/m<sup>2</sup> (T4C)



**Cuadro 32.-** Calibración cada 5000 kg/m<sup>2</sup> (T4C)

kg/m <sup>2</sup>	Presión Experimental (kPa)	με	Momento	Presión Teórica (kPa)	Ajuste
5000	49.020	68	96055.2	42.1	49.49
10000	98.039	138	194935.5	85.4	98.79
15000	147.059	206	290990.7	127.5	146.69
20000	196.078	275	388458.5	170.3	195.28
25000	245.098	346	488751.4	214.2	245.29
30000	294.118	415	586219.2	256.9	293.89
35000	343.137	485	685099.5	300.3	343.19
40000	392.157	555	783979.9	343.6	392.49
45000	441.176	624	881447.6	386.3	441.09
50000	490.196	695	981740.6	430.3	491.10

**Gráfico 41.-** Recta de calibración con datos cada 5000 kg/m<sup>2</sup> (T4C)



Con estos resultados se pudo obtener una precisión de:

**Cuadro 33.-** Precisión de Transductor (T4C)

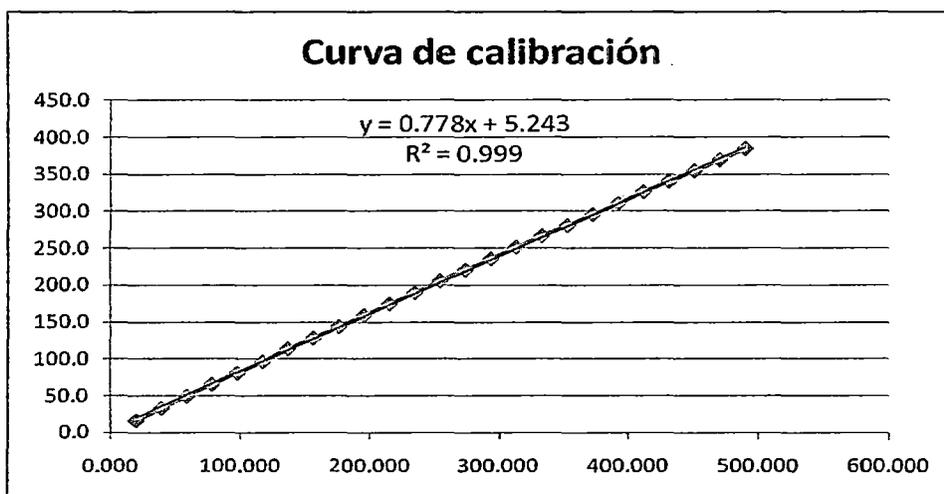
Secuencia	με	Presión (kPa)
0.2 kg/cm <sup>2</sup>	1	0.70871722
0.5 kg/cm <sup>2</sup>	1	0.70363073

**Strain Gage: Lateral**

**Cuadro 34.-** Calibración cada 2000 kg/m<sup>2</sup> (T4L)

kg/m <sup>2</sup>	Presión Experimental (kPa)	$\mu\epsilon$	Momento	Presión Teórica (kPa)	Ajuste
2000	19.608	-27	-38139.6	16.7	14.75
4000	39.216	-54	-76279.1	33.4	36.23
6000	58.824	-80	-113006.1	49.5	56.92
8000	78.431	-106	-149733.1	65.6	77.61
10000	98.039	-131	-185047.5	81.1	97.51
12000	117.647	-156	-220361.9	96.6	117.40
14000	137.255	-184	-259914.0	113.9	139.68
16000	156.863	-207	-292403.3	128.2	157.98
18000	176.471	-232	-327717.7	143.6	177.88
20000	196.078	-257	-363032.1	159.1	197.77
22000	215.686	-282	-398346.5	174.6	217.66
24000	235.294	-306	-432248.4	189.4	236.76
26000	254.902	-332	-468975.3	205.5	257.45
28000	274.510	-356	-502877.2	220.4	276.55
30000	294.118	-380	-536779.0	235.3	295.65
32000	313.725	-406	-573506.0	251.4	316.34
34000	333.333	-430	-607407.8	266.2	335.44
36000	352.941	-453	-639897.1	280.5	353.74
38000	372.549	-477	-673798.9	295.3	372.84
40000	392.157	-501	-707700.7	310.2	391.93
42000	411.765	-526	-743015.2	325.6	411.83
44000	431.373	-549	-775504.4	339.9	430.13
46000	450.980	-572	-807993.7	354.1	448.43
48000	470.588	-596	-841895.5	369.0	467.53
50000	490.196	-620	-875797.3	383.8	486.63

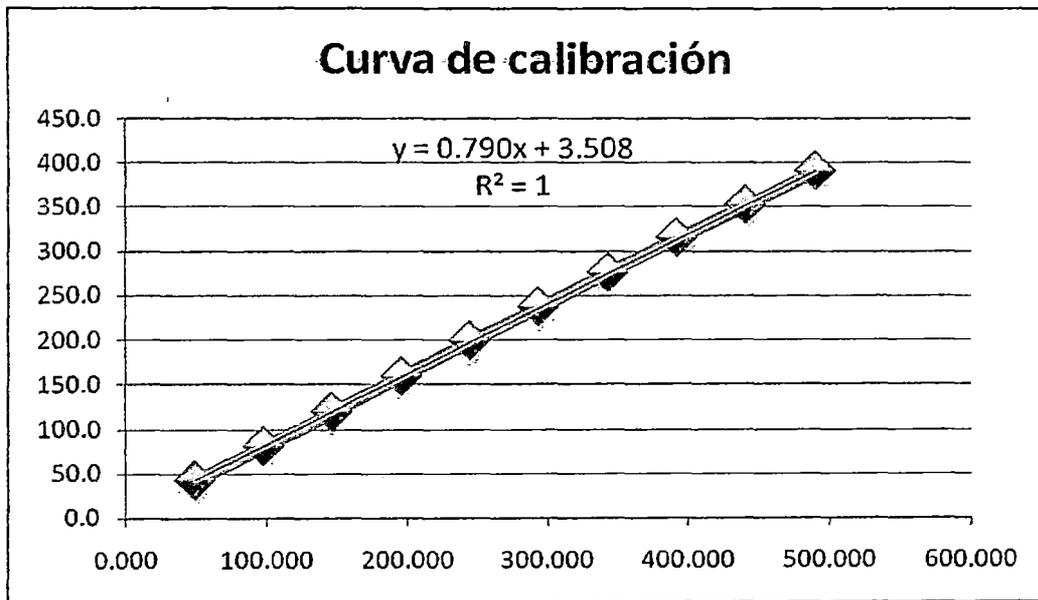
**Grafico 42.-** Recta de calibración con datos cada 2000 kg/m<sup>2</sup> (T4L)



**Cuadro 35.-** Calibración cada 5000 kg/m<sup>2</sup> (T4L)

kg/m <sup>2</sup>	Presión Experimental (kPa)	μE	Momento	Presión Teórica (kPa)	Ajuste
5000	49.020	-68	-96055.2	42.1	48.85
10000	98.039	-130	-183634.9	80.5	97.44
15000	147.059	-192	-271214.7	118.9	146.02
20000	196.078	-257	-363032.1	159.1	196.96
25000	245.098	-320	-452024.4	198.1	246.33
30000	294.118	-382	-539604.2	236.5	294.92
35000	343.137	-445	-628596.5	275.5	344.29
40000	392.157	-508	-717588.8	314.5	393.66
45000	441.176	-568	-802343.4	351.6	440.68
50000	490.196	-630	-889923.1	390.0	489.27

**Grafico 43.-** Recta de calibración con datos cada 5000 kg/m<sup>2</sup> (T4L)



Con estos resultados se pudo obtener una precisión de:

**Cuadro 36.-** Precisión de Transductor (T4L)

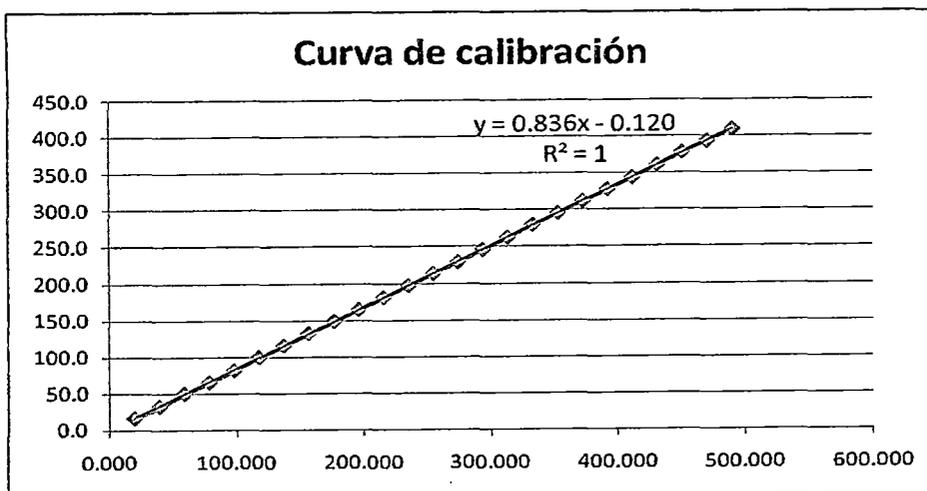
Secuencia	μE	Presión (kPa)
0.2 kg/cm <sup>2</sup>	1	0.79357207
0.5 kg/cm <sup>2</sup>	1	0.78501151

**Strain Gage: ½ Punte**

**Cuadro 37.-** Calibración cada 2000 kg/m2 (T4)

kg/m2	Presión Experimental (kPa)	με	Media de με	Momento	Presión Teórica (kPa)	Ajuste
2000	19.608	-51	-25.5	-36020.7	15.8	19.03
4000	39.216	-103	-51.5	-72747.7	31.9	38.28
6000	58.824	-160	-80	-113006.1	49.5	59.39
8000	78.431	-209	-104.5	-147614.2	64.7	77.53
10000	98.039	-262	-131	-185047.5	81.1	97.16
12000	117.647	-320	-160	-226012.2	99.1	118.63
14000	137.255	-372	-186	-262739.2	115.2	137.89
16000	156.863	-426	-213	-300878.8	131.9	157.88
18000	176.471	-479	-239.5	-338312.0	148.3	177.50
20000	196.078	-530	-265	-374332.7	164.1	196.39
22000	215.686	-583	-291.5	-411766.0	180.5	216.01
24000	235.294	-635	-317.5	-448493.0	196.6	235.27
26000	254.902	-688	-344	-485926.3	213.0	254.89
28000	274.510	-738	-369	-521240.7	228.4	273.41
30000	294.118	-793	-396.5	-560086.5	245.5	293.77
32000	313.725	-846	-423	-597519.8	261.9	313.40
34000	333.333	-902	-451	-637071.9	279.2	334.13
36000	352.941	-953	-476.5	-673092.6	295.0	353.01
38000	372.549	-1005	-502.5	-709819.6	311.1	372.27
40000	392.157	-1058	-529	-747252.9	327.5	391.89
42000	411.765	-1110	-555	-783979.9	343.6	411.15
44000	431.373	-1165	-582.5	-822825.7	360.6	431.51
46000	450.980	-1220	-610	-861671.6	377.7	451.88
48000	470.588	-1270	-635	-896986.0	393.1	470.39
50000	490.196	-1322	-661	-933713.0	409.2	489.65

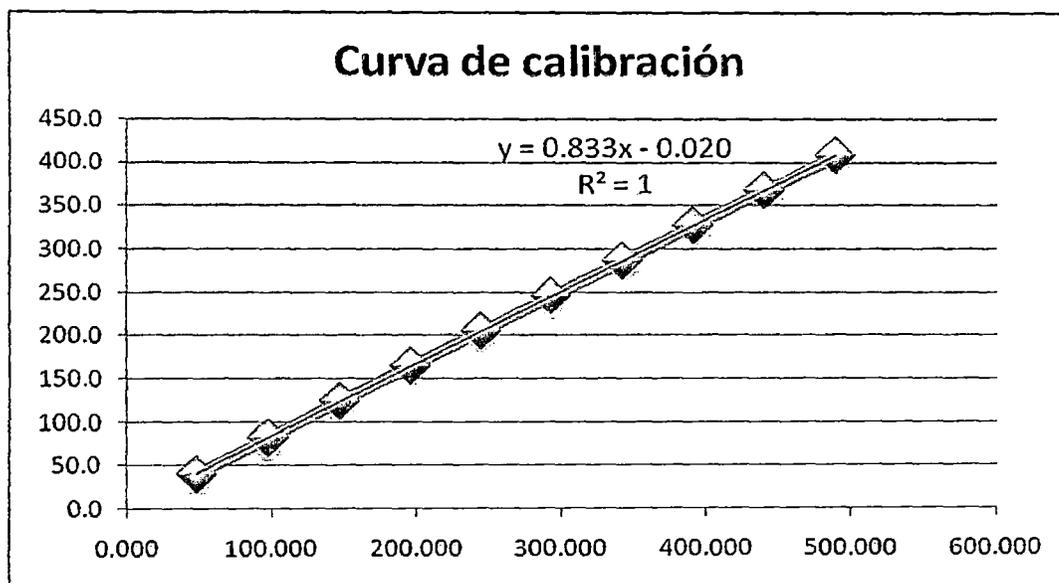
**Grafico 44.-** Recta de calibración con datos cada 2000 kg/m2 (T4)



**Cuadro 38.-** Calibración cada 5000 kg/m<sup>2</sup> (T4)

kg/m <sup>2</sup>	Presión Experimental (kPa)	μE	Media de μE	Momento	Presión Teórica (kPa)	Ajuste
5000	49.020	-129	-64.5	-91111.2	39.9	47.96
10000	98.039	-263	-131.5	-185753.8	81.4	97.76
15000	147.059	-398	-199	-281102.7	123.2	147.92
20000	196.078	-530	-265	-374332.7	164.1	196.98
25000	245.098	-661	-330.5	-466856.5	204.6	245.66
30000	294.118	-793	-396.5	-560086.5	245.5	294.71
35000	343.137	-924	-462	-652610.3	286.0	343.39
40000	392.157	-1057	-528.5	-746546.6	327.2	392.81
45000	441.176	-1188	-594	-839070.3	367.7	441.49
50000	490.196	-1318	-659	-930887.8	408.0	489.80

**Grafico 45.-** Recta de calibración con datos cada 5000 kg/m<sup>2</sup> (T4)



Con estos resultados se pudo obtener una precisión de:

**Cuadro 39.-** Precisión de Transductor (T4)

Secuencia	μE	Presión (kPa)
0.2 kg/cm <sup>2</sup>	1	0.370250
0.5 kg/cm <sup>2</sup>	1	0.3710483

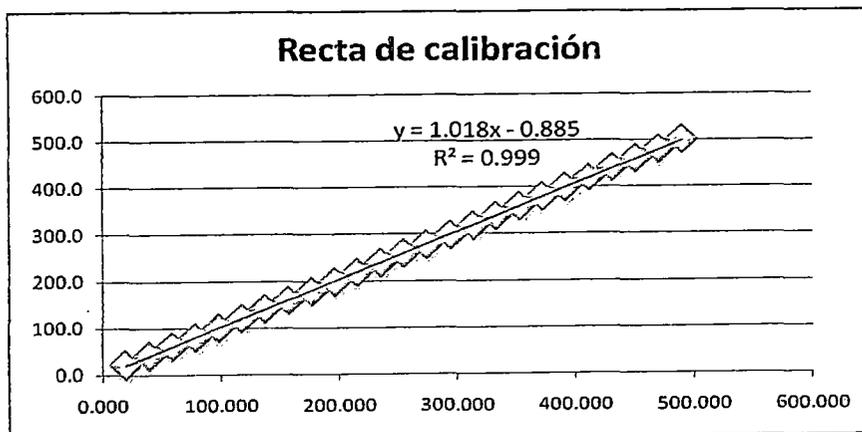
**Transductor 5**

**Strain Gage: Central**

**Cuadro 40.-** Calibración cada 2000 kg/m<sup>2</sup> (T5C)

kg/m <sup>2</sup>	Presión Experimental (kPa)	με	Momento	Presión Teórica (kPa)	Ajuste
2000	19.608	34	48027.6	21.0	21.55
4000	39.216	65	91817.5	40.2	40.40
6000	58.824	97	137019.9	60.1	59.86
8000	78.431	129	182222.3	79.9	79.32
10000	98.039	160	226012.2	99.1	98.17
12000	117.647	193	272627.2	119.5	118.24
14000	137.255	225	317829.7	139.3	137.70
16000	156.863	256	361619.5	158.5	156.56
18000	176.471	287	405409.4	177.7	175.41
20000	196.078	320	452024.4	198.1	195.48
22000	215.686	352	497226.9	217.9	214.94
24000	235.294	383	541016.7	237.1	233.79
26000	254.902	416	587631.8	257.5	253.86
28000	274.510	448	632834.2	277.4	273.32
30000	294.118	481	679449.2	297.8	293.39
32000	313.725	513	724651.7	317.6	312.85
34000	333.333	546	771266.7	338.0	332.92
36000	352.941	579	817881.7	358.5	352.99
38000	372.549	611	863084.1	378.3	372.45
40000	392.157	644	909699.2	398.7	392.52
42000	411.765	677	956314.2	419.1	412.59
44000	431.373	710	1002929.2	439.6	432.66
46000	450.980	742	1048131.6	459.4	452.12
48000	470.588	775	1094746.7	479.8	472.19
50000	490.196	809	1142774.3	500.9	492.86

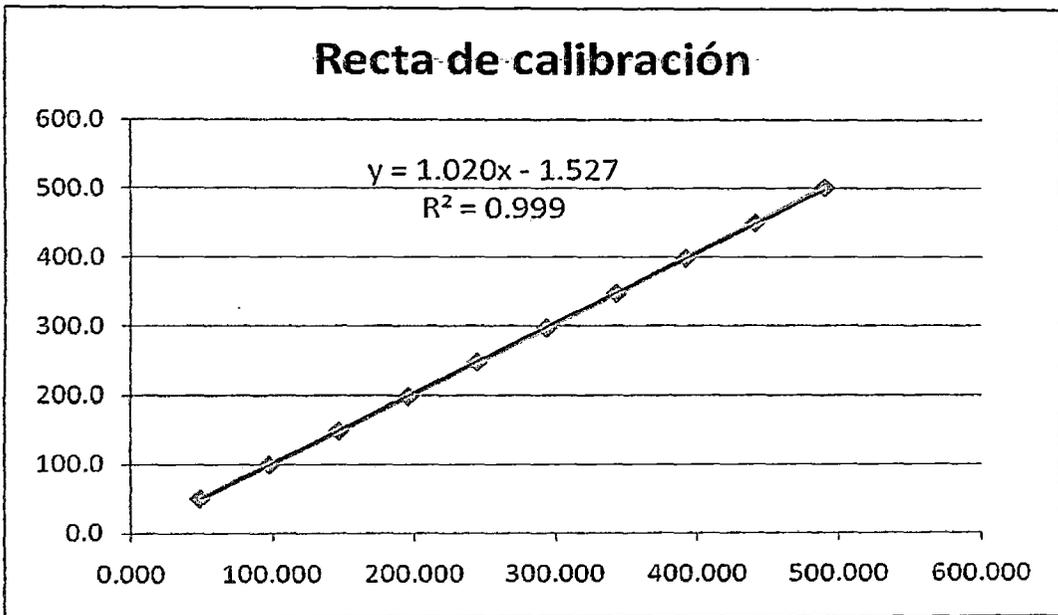
**Grafico 46.-** Recta de calibración con datos cada 2000 kg/m<sup>2</sup> (T5C)



**Cuadro 41.-** Calibración cada 5000 kg/m<sup>2</sup> (T5C)

kg/m <sup>2</sup>	Presión Experimental (kPa)	μE	Momento	Presión Teórica (kPa)	Ajuste
5000	49.020	81	114418.7	50.1	50.66
10000	98.039	160	226012.2	99.1	98.61
15000	147.059	240	339018.3	148.6	147.17
20000	196.078	320	452024.4	198.1	195.72
25000	245.098	400	565030.5	247.6	244.28
30000	294.118	480	678036.6	297.2	292.84
35000	343.137	561	792455.3	347.3	342.00
40000	392.157	644	909699.2	398.7	392.38
45000	441.176	726	1025530.4	449.5	442.15
50000	490.196	809	1142774.3	500.9	492.53

**Grafico 47.-** Recta de calibración con datos cada 5000 kg/m<sup>2</sup> (T5C)



Con estos resultados se pudo obtener una precisión de:

**Cuadro 42.-** Precisión de Transductor (T5C)

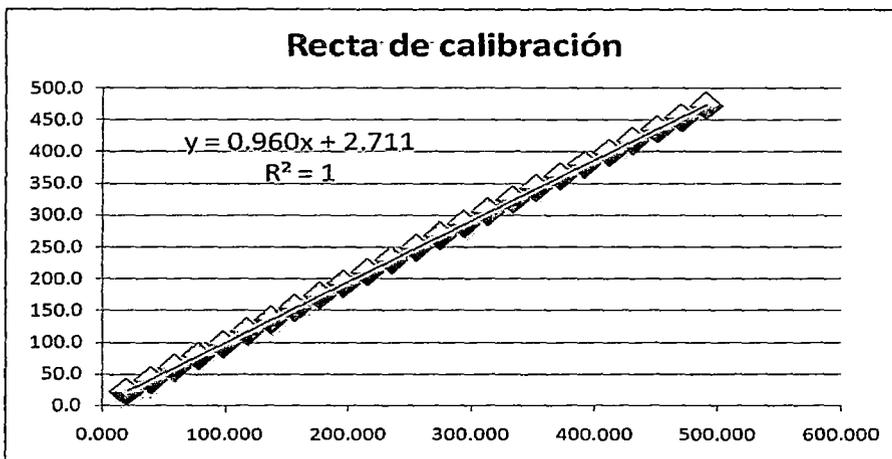
Secuencia	μE	Presión (kPa)
0.2 kg/cm <sup>2</sup>	1	0.60721063
0.5 kg/cm <sup>2</sup>	1	0.60601164

**Strain Gage: Lateral**

**Cuadro 43.-** Calibración cada 2000 kg/m2 (T5L)

kg/m2	Presión Experimental (kPa)	$\mu\epsilon$	Momento	Presión Teórica (kPa)	Ajuste
2000	19.608	-33	-46615.0	20.4	18.46
4000	39.216	-63	-88992.3	39.0	37.80
6000	58.824	-95	-134194.8	58.8	58.44
8000	78.431	-126	-177984.6	78.0	78.43
10000	98.039	-156	-220361.9	96.6	97.78
12000	117.647	-187	-264151.8	115.8	117.77
14000	137.255	-218	-307941.6	135.0	137.76
16000	156.863	-248	-350318.9	153.5	157.11
18000	176.471	-279	-394108.8	172.7	177.10
20000	196.078	-309	-436486.1	191.3	196.45
22000	215.686	-339	-478863.4	209.9	215.80
24000	235.294	-370	-522653.2	229.1	235.79
26000	254.902	-401	-566443.1	248.3	255.78
28000	274.510	-431	-608820.4	266.8	275.13
30000	294.118	-462	-652610.3	286.0	295.12
32000	313.725	-492	-694987.6	304.6	314.46
34000	333.333	-522	-737364.9	323.2	333.81
36000	352.941	-552	-779742.1	341.7	353.16
38000	372.549	-583	-823532.0	360.9	373.15
40000	392.157	-612	-864496.7	378.9	391.85
42000	411.765	-643	-908286.6	398.1	411.84
44000	431.373	-673	-950663.9	416.7	431.19
46000	450.980	-703	-993041.2	435.2	450.54
48000	470.588	-733	-1035418.5	453.8	469.88
50000	490.196	-762	-1076383.2	471.8	488.59

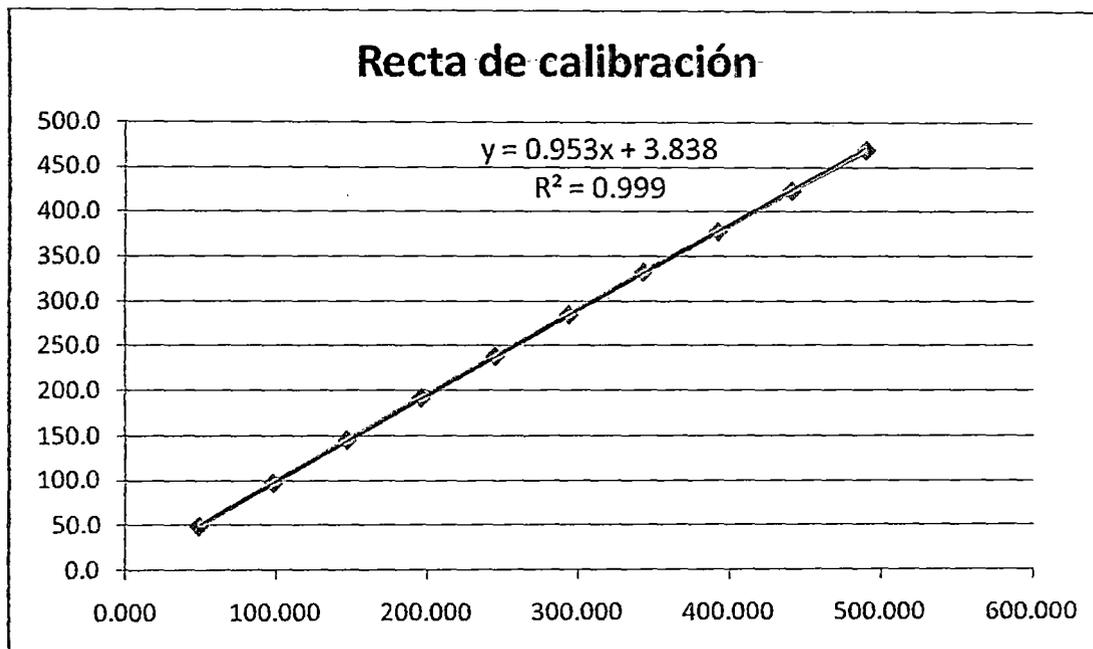
**Gráfico 48.-** Recta de calibración con datos cada 2000 kg/m2 (T5L)



**Cuadro 44.-** Calibración cada 5000 kg/m2 (T5L)

kg/m2	Presión Experimental (kPa)	$\mu\epsilon$	Momento	Presión Teórica (kPa)	Ajuste
5000	49.020	-79	-111593.5	48.9	47.29
10000	98.039	-156	-220361.9	96.6	97.32
15000	147.059	-234	-330542.9	144.9	147.99
20000	196.078	-309	-436486.1	191.3	196.71
25000	245.098	-385	-543841.9	238.4	246.08
30000	294.118	-460	-649785.1	284.8	294.80
35000	343.137	-537	-758553.5	332.5	344.82
40000	392.157	-610	-861671.6	377.7	392.25
45000	441.176	-685	-967614.8	424.1	440.97
50000	490.196	-758	-1070732.9	469.3	488.39

**Grafico 49.-** Recta de calibración con datos cada 5000 kg/m2 (T5L)



Con estos resultados se pudo obtener una precisión de:

**Cuadro 45.-** Precisión de Transductor (T5L)

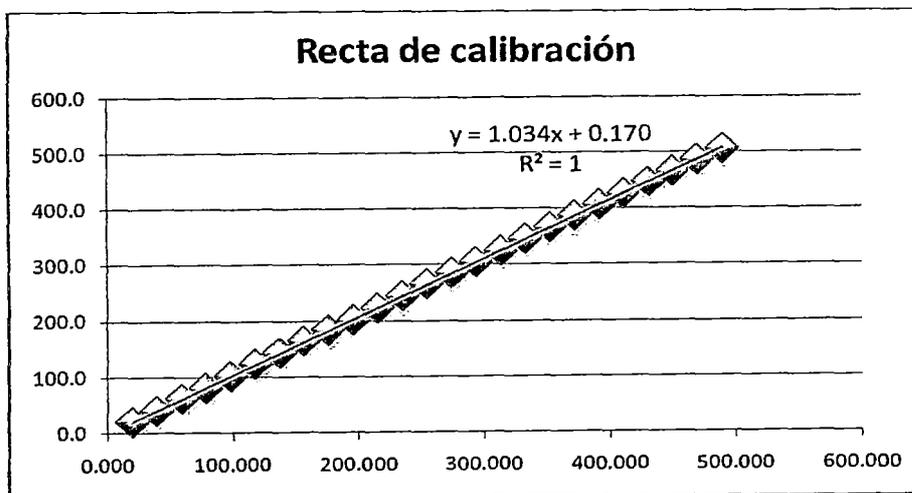
Secuencia	$\mu\epsilon$	Presión (kPa)
0.2 kg/cm2	1	0.6455257
0.5 kg/cm2	1	0.64974443

**Strain Gage: ½ Punte**

**Cuadro 46.-** Calibración cada 2000 kg/m<sup>2</sup> (T5)

kg/m <sup>2</sup>	Presión Experimental (kPa)	με	Media de με	Momento	Presión Teórica (kPa)	Ajuste
2000	19.608	-63	-31.5	-44496.2	19.5	18.70
4000	39.216	-129	-64.5	-91111.2	39.9	38.45
6000	58.824	-196	-98	-138432.5	60.7	58.51
8000	78.431	-260	-130	-183634.9	80.5	77.67
10000	98.039	-330	-165	-233075.1	102.2	98.63
12000	117.647	-397	-198.5	-280396.4	122.9	118.69
14000	137.255	-461	-230.5	-325598.8	142.7	137.85
16000	156.863	-527	-263.5	-372213.9	163.1	157.60
18000	176.471	-592	-296	-418122.6	183.3	177.06
20000	196.078	-649	-324.5	-458381.0	200.9	194.13
22000	215.686	-722	-361	-509940.1	223.5	215.98
24000	235.294	-786	-393	-555142.5	243.3	235.14
26000	254.902	-857	-428.5	-605289.0	265.3	256.40
28000	274.510	-918	-459	-648372.5	284.2	274.66
30000	294.118	-986	-493	-696400.1	305.2	295.02
32000	313.725	-1050	-525	-741602.6	325.0	314.17
34000	333.333	-1116	-558	-788217.6	345.5	333.93
36000	352.941	-1180	-590	-833420.0	365.3	353.09
38000	372.549	-1248	-624	-881447.6	386.3	373.45
40000	392.157	-1311	-655.5	-925943.8	405.8	392.31
42000	411.765	-1376	-688	-971852.5	425.9	411.77
44000	431.373	-1439	-719.5	-1016348.7	445.4	430.63
46000	450.980	-1505	-752.5	-1062963.7	465.9	450.39
48000	470.588	-1573	-786.5	-1110991.3	486.9	470.75
50000	490.196	-1636	-818	-1155487.4	506.4	489.61

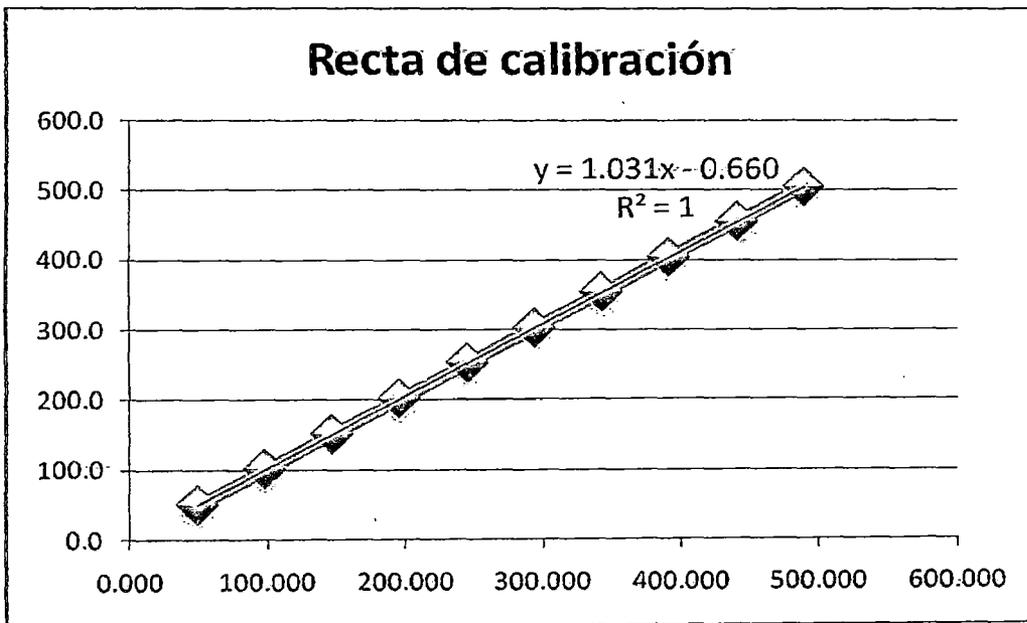
**Grafico 50.-** Recta de calibración con datos cada 2000 kg/m<sup>2</sup> (T5)



**Cuadro 47.-** Calibración cada 5000 kg/m2 (T5)

kg/m2	Presión Experimental (kPa)	$\mu\epsilon$	Media de $\mu\epsilon$	Momento	Presión Teórica (kPa)	Ajuste
5000	49.020	-161	-80.5	-113712.4	49.8	48.98
10000	98.039	-326	-163	-230249.9	100.9	98.52
15000	147.059	-490	-245	-346081.2	151.7	147.76
20000	196.078	-649	-324.5	-458381.0	200.9	195.50
25000	245.098	-813	-406.5	-574212.3	251.7	244.74
30000	294.118	-978	-489	-690749.8	302.7	294.28
35000	343.137	-1140	-570	-805168.5	352.9	342.92
40000	392.157	-1305	-652.5	-921706.1	404.0	392.46
45000	441.176	-1469	-734.5	-1037537.3	454.7	441.70
50000	490.196	-1632	-816	-1152662.3	505.2	490.63

**Grafico 51.-** Recta de calibración con datos cada 5000 kg/m2 (T5)



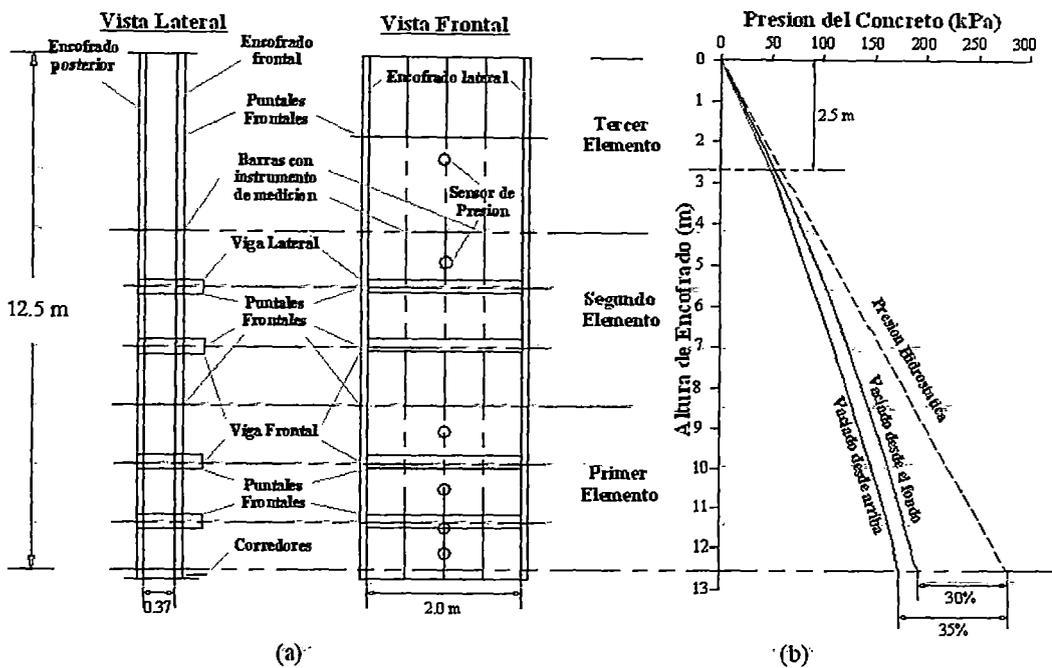
Con estos resultados se pudo obtener una precisión de:

**Cuadro 48.-** Precisión de Transductor (T5)

Secuencia	$\mu\epsilon$	Presión (kPa)
0.2 kg/cm2	1	0.299166
0.5 kg/cm2	1	0.29991602

### 3.2 Casos de medidas de presión lateral empleando concreto fluido

El centro de investigación francés en edificios e infraestructuras (CEBTP) reportó en 1999 en los resultados de un estudio experimental que determina la presión lateral ejercida por un concreto autocompactante en una pared experimental de 12.5m. de altura. (Figura 33-a). La presión del concreto fue medida usando siete sensores colocados en las alturas diversas. El concreto contuvo 350 kg/m<sup>3</sup> de cemento y 100 kg/m<sup>3</sup> de pasta para relleno de caliza, un relación (a/c) de 0.46 y aditivos reductores de agua de alto rango. La consistencia con el ensayo de slump flow fue de 700 mm.



**Figura 33:** Sensores de Presión colocados en los encofrados (a) y la grafica de la Presión Medida vs. Altura de concreto (b)

El concreto autocompactante fue vaciado desde lo alto usando una velocidad de 18 m/h. Esta velocidad fue 25 m/h para la segunda pared donde el concreto fue bombeado desde el fondo. Las lecturas laterales resultantes de presión son mostradas en la Figura 33-b y señala que la distribución de presión no es lineal y está más abajo que la presión hidrostática. Una desviación neta de la presión hidrostática teórica fue observada más allá de 2.5 m de la parte superior de la pared. En la base del encofrado, la desviación de la distribución hidrostática fue

30% en el caso de concreto autocompactante infundido del fondo y 35% para encofrados en el que el concreto es vaciado desde lo alto. La diferencia entre la presión hidrostática y las presiones medidas fue atribuida a la reducción en la velocidad de vaciado debido a la fricción entre el concreto naciente durante la colocación y la superficie del encofrado metálico.

Estudios similares fueron realizados en Sweden Skarendahl, 1999 durante el vaciado de muelles de un puente que midieron 5 m. de altura. El muelle fue llenado en estratos sucesivos de aproximadamente 0.5 m en la altura con períodos de descanso que estaban no especificados, resultando una velocidad baja de colocación. Para estas condiciones de colocación, la presión lateral ejercida por el SCC en la base del encofrado era aproximadamente la mitad de aquel resultado del concreto de consistencia normal consolidado por la vibración interna.

En el 2000, tres industrias incluyendo la Construcción GTM (Francia), NCC AB (Suecia), y Adiciones Sika (España) condujeron un programa grande de campaña experimental que trata con la calidad superficial y la presión lateral de SCC. El informe fue publicado en el 2000 como la parte del Proyecto de Brite-EuRam titulado " La Producción Racional y el Ambiente Mejorador Trabajador por la Utilización del Concreto Autocompactante " [Tejeda - Dominguez et al., 2005]. El énfasis especial fue el colocado sobre el efecto de geometría de la pared y la influencia de la velocidad de llenado del concreto sobre la presión lateral ejercida por SCC.

El GTM Construction ensayo dos tipos de SCC, se prepararon con y sin VMA. El cemento (CPA CEM I 52.5 R) y contenidos de la pasta para relleno (Caliza Picketty de Tipo A) fueron fijados en 290 y 174 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente. La arena para totalizar la proporción del agregado fue 0.46, por masa. Fue usada una dosis fija de 9 kg/m<sup>3</sup> de HRWRA (Sikament 10). El contenido de agua estaba entonces ajustado para obtener valor de fluidez entre 700 a 880 mm. Diferentes dimensiones de encofrados fueron usados: El largo tenía una longitud de 1.25 y 2.5 m, la altura de 2.8 y 5.6 m, y la anchura de 0.25 y 0.40 m. Una malla de acero de refuerzo fue colocada en el encofrado correspondiente a 50 o 80 kg/m<sup>3</sup> para placas teniendo una anchura de 0.40 o 0.25 m, respectivamente. Un rango

grande de velocidad de llenado entre 10 y 150 m/h fue probado durante las pruebas. Los diferentes métodos de colocación fueron estudiados, lo cual incluyó el bombeo del concreto desde la base del encofrado y la colocación por bomba o cubo desde lo alto. Las medidas laterales de presión estaban hechas usando dos sistemas diferentes. El principio del primer sistema (GTM ejerza presión sobre equipo) constó de lanzar agua en un sistema hecho de tuberías rígidas y las bolsas del caucho y medir presión SCC directamente con el manómetro. El segundo sistema constó de sensores electrónicos de presión de 200 mm. en el diámetro que posibilita medidas laterales instantáneas de presión. Los datos experimentales señalaron que ambos sistemas condujeron a los resultados equivalentes. Para la mayor parte de las mezclas probadas con SCC, la presión lateral medida estaba próxima a la presión hidrostática. Esto puede ser debido a la velocidad muy alta de llenado y la alta fluidez del concreto. En general, se dijo que para un flujo dado de concreto y una velocidad de llenado, conteniendo mezclas de VMA exhibieron una más alta presión inicial y un menor decrecimiento de presión con el tiempo; Esto adecuadamente puede ser por el contenido mayor de agua de estas mezclas desde que la dosis HRWRA fuese mantenida de manera constante, y el contenido de agua estaba ajustado para obtener la consistencia requerida en el concreto. Lanzar el concreto utilizando cubos desde lo alto del elemento, mostro que reduce ligeramente la presión máxima, a pesar de la velocidad de llenado relativamente alta de 50 m/h. Cuando se realizo un vaciado desde la base, se observo una presión lateral significativamente más alta.

En el caso del NCC AB Company, 10 pruebas de tamaño natural que los vaciados fueron dirigidos en elementos de placas en Billeberga, Suecia. Ocho de las pruebas fueron conllevadas fuera en un elemento de la pared midiéndole 2.65 m en la altura, 5.7 m de largo, y 0.16 m de ancho. Las últimas dos pruebas fueron realizadas en placas teniendo alturas superiores de 5.3 y 8 m. Una sola mezcla SCC se usó para llenar todas las paredes. El cemento y contenidos de la pasta para relleno de caliza (Ignaberg 500) fueron determinados en 330 y 125 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente. El *a/c* fue 0.55. Los contenidos de arena (0-8 mm) y el agregado grueso (8-16 mm) fueron de 1,047 y 702 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente. Un polycarboxylate-base HRWRA (Sika Viscocrete 2) fue usado en una dosis de 1.7%, por masa de cemento. La fluidez de las mezclas probadas varía de 620 a

780 mm. La presión lateral fue medida usando gatas hidráulicas localizadas en elevaciones diversas. Las técnicas diferentes se usaron para colocar el concreto en los encofrados. Una bomba se usó para colocar el concreto en siete placas, mientras los cubos se usaron para colocar las 3 placas restantes. Todas las colocaciones fueron de la parte superior del encofrado. Cuando la bomba fue usada, la manguera de un bombero se agregó al final de la línea de la bomba para limitar la caída libre del concreto de aproximadamente 750 mm. de fluidez a diferentes velocidades de llenado que varía de 6 a 120 m/h. A pesar de estas velocidades altas de llenado, los ingenieros NCC AB se dieron cuenta que la presión desarrollada inmediatamente después del fin del vaciado del elemento estaba considerablemente más abajo de la presión hidrostática. Por ejemplo, para la pared que midió 8 m. de altura y a una velocidad de llenado de 120 m/h, la presión medida a 550 mm de la base del encofrado fue 29% del valor hidrostático. En caso de la pared midiendo 5.3 m en la altura, esta presión fue 59% de la presión hidrostática.

Proske y Graubner [2002] evaluaron la influencia de la velocidad de llenado y el valor de la fluidez del concreto en la presión del encofrado desarrollada por el SCC. El proyecto, para verificar la influencia de la velocidad de llenado sobre la presión del encofrado, es apoyado por el Comité alemán para el concreto armado (DAfStb). Once pruebas experimentales sobre columnas delgadas han sido realizadas para verificar la presión del encofrado. 10 de las columnas fueron reforzadas. Todas las columnas tenían el mismo corte transversal 30/30 cm. así como una altura uniforme de 4,0 m. La mezcla de SCC usada para llenar las columnas tuvo un *a/c* de 0.43 y una proporción arena – agregado grueso de 0.48.

El programa de prueba fue dividido en tres series I, II y III. Los parámetros variados son representados en el cuadro 49.

Serie I: Influencia del aumento de velocidad sobre la presión del encofrado

Serie II: La influencia del valor de la consistencia en interacción con la velocidad

Serie III: Consolidación convencional por vibración y la influencia del refuerzo sobre la presión del encofrado

**Cuadro 49.- Sistema de la serie de prueba I – III**

Serie de prueba	Nº	V (m/h)	Slump flow (cm)	t <sub>50</sub> (s)
I	1a	12,5	75	2,5
	2a	25		2
	3a	40		2
	4a	80		2
	5a	160		2,5
II	2b	25	70	3
	2c	25	60	5
	3b	40	70	3
	4c	60	55	6
III	5b <sup>*1)</sup>	25	70	3
	5r <sup>2)</sup>	160	47,5	
1) Columna sin refuerzo				
2) Consolidación, usando vibrador en el concreto				

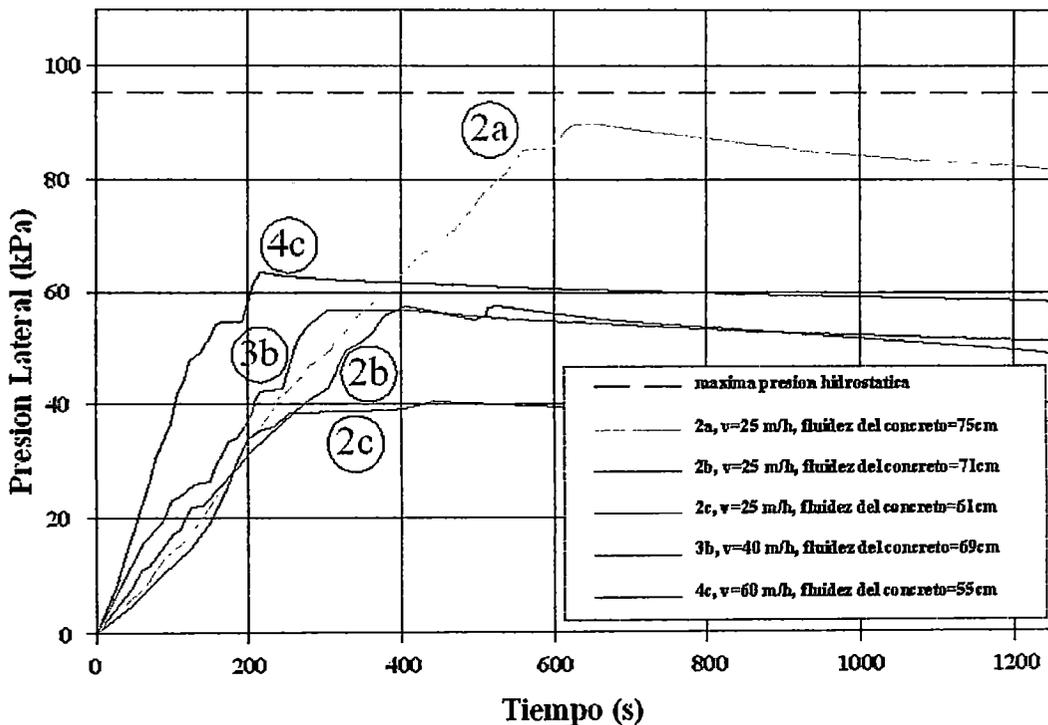
Las velocidades de vaciado (columnas v= 25 a 80 m/h y placas de v= 10 a 40 m/h) son valores de referencias tomados en la práctica.

En todas estas pruebas ha sido usada la misma mezcla. Era sólo el cambiado en el contenido de superplastificante para influir en el slump flow. El concreto fue vaciado a una altura de 4,3m.

Resultados: En la serie de prueba I la presión es casi hidrostática fue determinada en todos los puntos de medida. Aquí el valor de slump flow era aproximadamente 75 cm. Sólo para la columna con un tiempo de colocación de 25 minutos (v=12,5 m/h), obtuvo una reducción de presión de aproximadamente 23%.

En la serie de prueba II, con una velocidad definida de 25 m/h en la correlación con la disminución del valor de slump flow, fue determinada una reducción de la presión. Con un slump flow = 71 cm, una reducción de las presiones máximas de aproximadamente 40% en comparación con el valor hidrostático - fue observado

(columna II/2b) (Grafico 52). Reduciendo el slump flow, la influencia de velocidad sobre la presión aumenta significativamente.

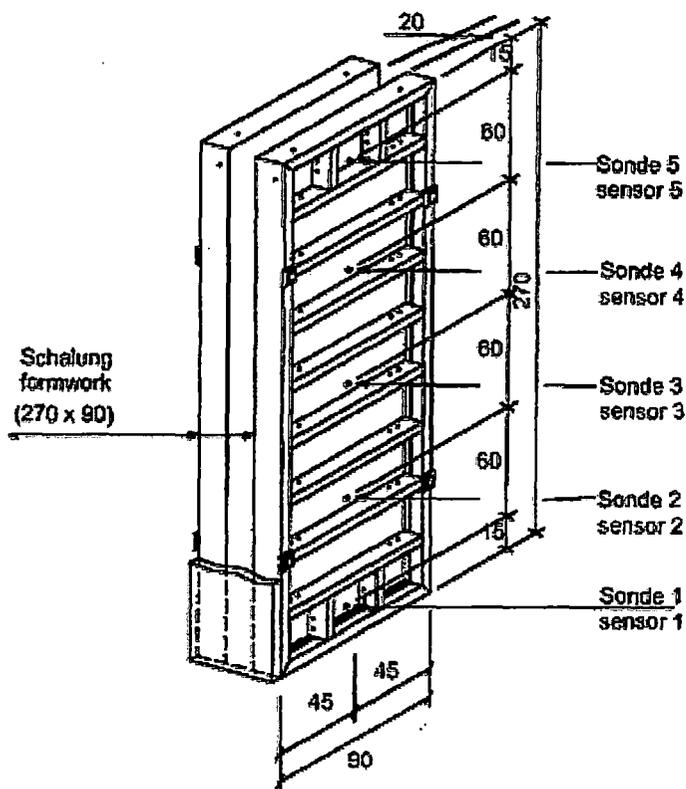


**Grafico 52.-** Presión del encofrado varía de acuerdo al valor del slump flow.

Andreas y Cathleen [2003] compararon las características de presión laterales de SCC de niveles de viabilidad que varían a él de concreto convencional vibrado. Elementos experimentales de la pared que miden 2.7 m en la altura, 0.75 m en la longitud, y 0.20 m de ancho fueron usados (Figura 34). Las placas fueron reforzadas con barras de 10 mm de diámetro empleadas en una densidad de 50 kg/m<sup>3</sup>. Cinco sensores de presión fueron usados para determinar la distribución de la presión lateral. Las placas fueron vaciadas a una velocidad aproximada de 8 m/h. Las placas fueron llenadas de dos vaciados, cada toma 1.5 minutos para echar con la rotura de 20 minutos entre los levantamientos. SCC molde de la cima mostrada entre el 87% y el 90% de la presión hidrostática. El concreto convencional desarrolló aproximadamente el 55% de la presión hidrostática. Dentro de los 20 primeros minutos, la presión decae en el sensor más bajo recorrido entre el 7% y el 20%. Dentro de dos horas, la presión del concreto alcanzó aproximadamente el 50% de la presión máxima inicial. Andreas y Cathleen [2003] también divulgaron que la consistencia del SCC no tenía

ninguna gran influencia sobre la presión máxima cuando la velocidad de llenado era aproximadamente 8 m/h. Sin embargo, esto no era el caso una velocidad de llenado lenta de 4 m/h fue intentada. Mostraron la incorporación de VMA para conducir una menor presión lateral.

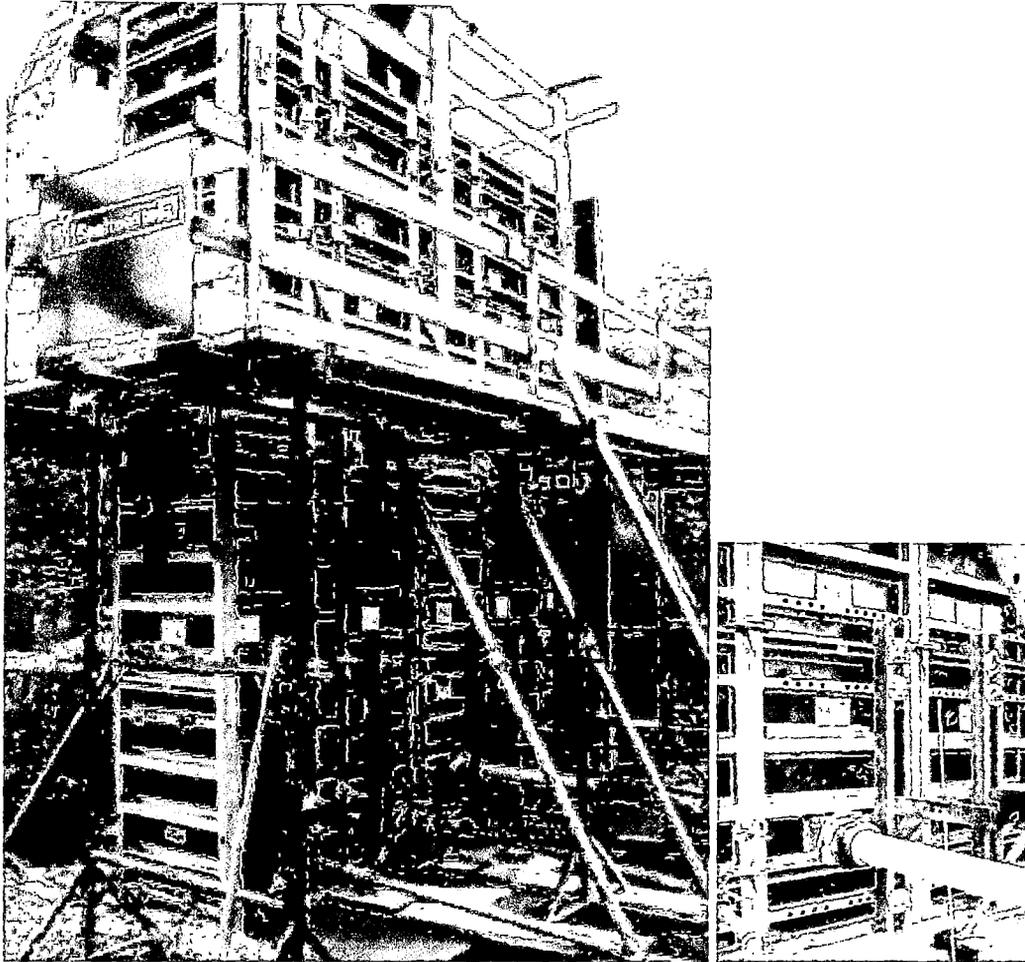
En el caso del SCC bombeado en el encofrado desde su base, mostraron que la presión lateral esta encima de los valores hidrostáticos y que la presión máxima podría ser dependiente de la presión de bomba.



**Figura 34.-** Estructuración de prueba para medidas de presión en laboratorio  
 (Placa 2.70 × 0.75 × 0.20 m) [Andreas and Cathleen, 2003]

El concreto autocompactante que se utilizó fue producido en una planta de concreto y transportado durante 1 hora antes de la colocación. El concreto fue entonces bombeado en una constante presión de aproximadamente 2.0 MPa (290 psi) en un encofrado de estas dimensiones 0.25x4.9x4.7 m (0.8x16.1x15.4 ft) a través de una válvula localizado a 0.6 m. (2 ft) por encima de la base. (Figura 35). Tomó 15 minutos llenar la placa, lo cual es propio de una velocidad

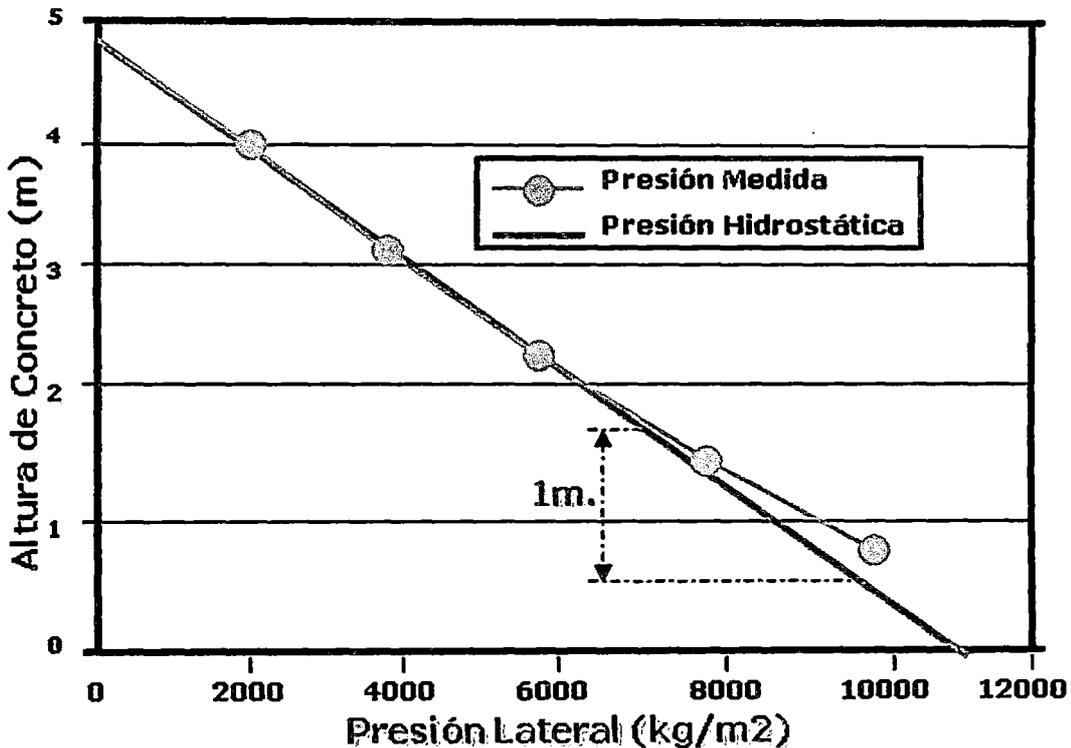
de llenado de 18.8 m/h (61.7 ft/h). La forma contenida acerca de 120 kg/m<sup>3</sup> (7.5 lb/ft<sup>3</sup>) de 10 y 12 mm (0.39 y 0.47 in) diámetro del acero de refuerzo. El primer sensor de presión estaba localizado a 200 mm (8 in) por encima de la válvula. El siguiente sensor estaba localizado a 700 mm (28 in) por encima de la primera parte. Todos los otros sensores fueron espaciados 800 mm (31.5 in).



**Figura 35.-** Encofrado de placa para pruebas que usan SCC bombeado de la base

Con el encofrado llenado y la bomba apagada, la presión en los 3 sensores superiores fue propia de la presión hidrostática calculada (Grafica 53). Sin embargo, las presiones de 77 y 97 kPa (11 y 14 psi) se midieron en los dos sensores inferiores, excediendo la presión hidrostática en 2.5 y 10%, respectivamente.

Cuándo el concreto autocompactante es bombeado al encofrado desde su base, está se da con un movimiento constante durante el vaciado. Por consiguiente, la presión no puede decrecer debajo de los valores hidrostáticos. Porque la bomba tiene que vencer el peso del concreto en el encofrado, la presión del encofrado puede exceder la presión hidrostática localmente. En las pruebas realizadas para este estudio, la bomba afectó presiones hasta cerca de 1m (3 ft) por encima de la entrada.



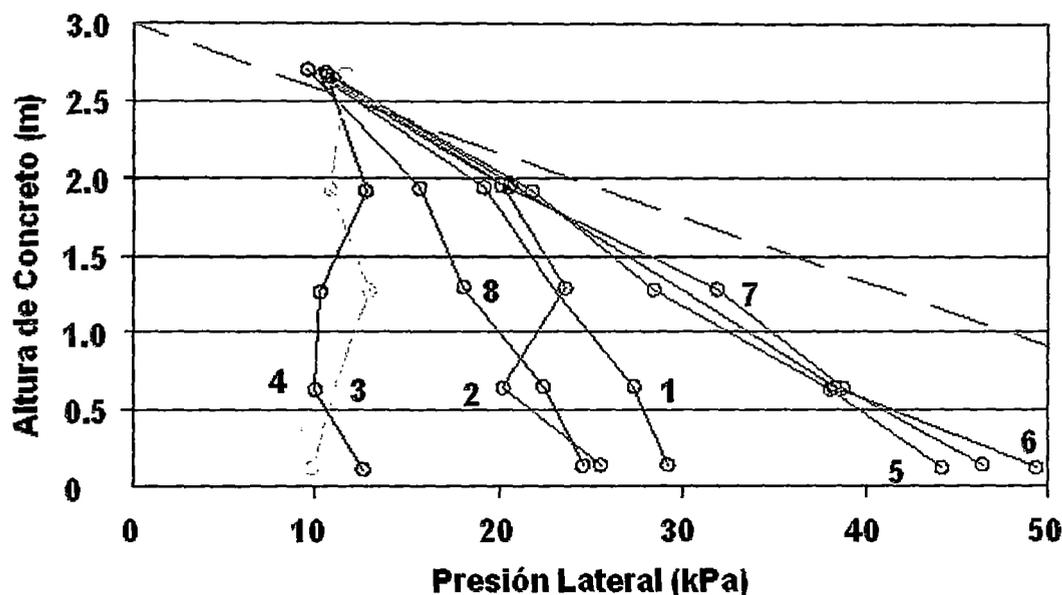
**Grafica 53.-** Diagrama de presión lateral del encofrado bombeado desde la base, inmediatamente después de finalizar el vaciado.

Billberg (2003) usa 2 mezclas de concreto autocompactante (SCC1 y SCC2 con una relación a/c de 0.40 y 0.45 respectivamente) y un concreto convencional para realizar el vaciado de 8 elementos experimentales de una placa de concreto armado que miden 3 m. de altura, 3.5 m. de longitud y 0.3 m. de ancho. La consistencia en el momento del vaciado fue de  $730 \pm 50$  y  $700 \pm 50$  para el SCC1 y SCC2, respectivamente. El material en la superficie del encofrado fue madera sobre un lado y chapeado sobre el otro. El concreto fue dejado caer de una altura de  $1 \pm 0.5$  m encima de la superficie de concreto. Vaciado a velocidades relativamente bajas en los elementos de la placa de concreto, como

esta indicado en la Cuadro 50. Las envolventes de presión para las ocho mezclas probadas son mostradas en la Grafica 54. La presión lateral para el concreto vibrado (CV) era ligeramente inferior que él de SCC colocado a la misma velocidad de llenado. El aumento de la velocidad de llenado condujo a una presión mayor. Una relación lineal fue establecida entre la presión lateral máxima inicial y la velocidad de llenado; esta relación fue presentada antes en el informe en el Grafico 14.

**Cuadro 50.- Variación de diseño de mezcla y velocidad de llenado**

Nº Ensayo	Tipo de Mezcla	Velocidad de llenado
1	1	1,4
2	2	1,3
3	2	1
4	1	0,8
5	1	1,5
6	2	2,2
7	1	2,3
8	CV	1,5

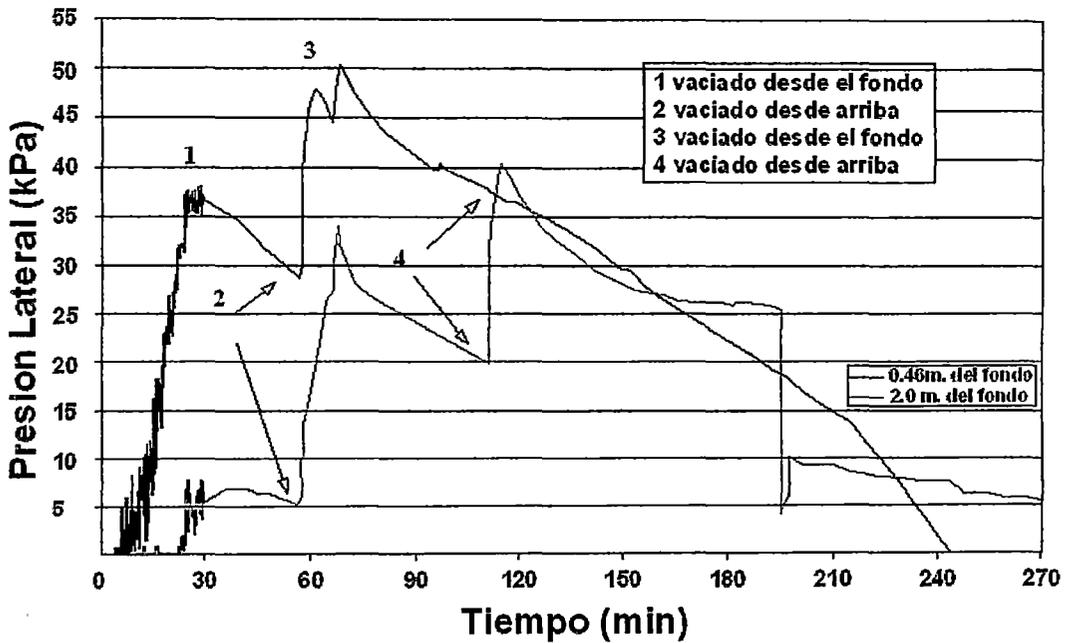


**Grafica 54.- Formas finales de las envolventes de presión para todas las placas de concreto que emplean SCC (Ensayos del No 1-7) y de vibrado convencional del concreto (Ensayo No 8) [Billberg, 2003]**

## Las Observaciones de Campo y las Pruebas de Gran Escala

Muchos ensayos en laboratorio y pruebas de campo han demostrado que los vaciados de concreto autocompactante no generan en la base de la estructura una presión hidrostática completa. Las pruebas realizadas por Vanhove y Djelal (2002) mostró una máxima presión del 64 % de la presión hidrostática máxima para una placa que fue llenada con una velocidad de 25 m/h desde arriba y un máximo de 68 % de la máxima presión hidrostática para una placa llenada a una velocidad de llenado a 19.5m/h bombeando desde el fondo de la placa. Realizando un análisis, la máxima presión no fue encontrada en la base de la placa sino a una altura de 1.5m. La máxima presión hidrostática fue determinada usando la altura total de la estructura.

El ensayo también ha sido llevado a instalaciones de campo. Una pared alta de 8.5 m. se construyó en el laboratorio de estructuras en la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign. La pared fue hecha con concreto autocompactante y llenada de manera continua durando aproximadamente siete horas. Fueron encontradas presiones cercanas a la presión hidrostática hasta los 1.25 m. medidos desde la parte alta del encofrado. La máxima presión a la que se llegó fue 3870 kg/m<sup>2</sup>, lo cual fue sólo aproximadamente 20% de la máxima presión hidrostática al punto de la medida. Esta pared fue llenada a una velocidad relativamente lenta, máximo de 1.67 m/hr, debido a las dimensiones grandes de la estructura (24.4 m de largo, 1.5 m de ancho y 8.5 m de altura). La pared requirió 318 m<sup>3</sup> de material. Una columna de prueba del acompañante fue fabricada que implicó llenar una columna alta 3.2 m. La columna se lleno a una velocidad de 18.3 m/hr y la presión más alta midió a 0.3 metros del fondo. La presión más alta registrada fue 80% de la presión hidrostática. La pared y la columna estaban llenas usando una bomba y la fluidez fue de 71 cm. excepto variaciones durante el día de 60 a 74 cm. durante el tiempo de vaciado y la densidad del material fue 2450 kg/m<sup>3</sup>.



**Gráfico 55.- Presión Lateral vs. Tiempo**

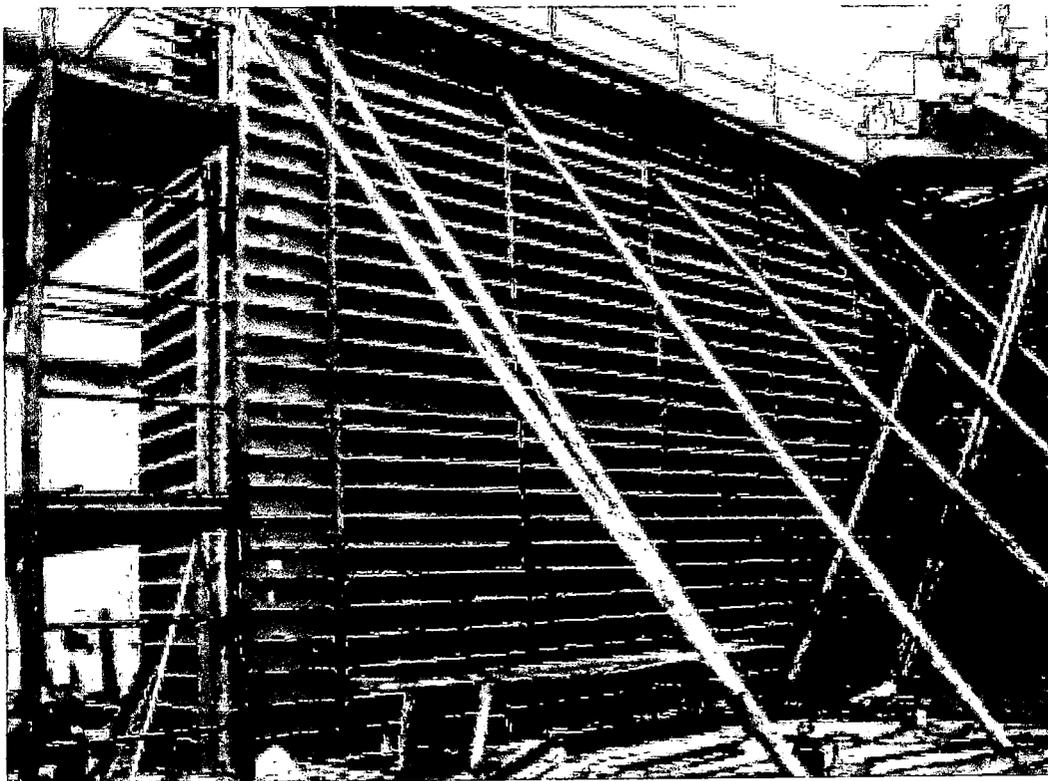
Un proyecto grande de reconstitución en Peoria, Illinois requirió la construcción de muchos muros de contención nuevos. El proyecto se forja con concreto autocompactante para las placas. Varios de estos muros fueron instrumentados con sensores de presión para estudiar el desarrollo de presión en el encofrado. En el Gráfico 55 se muestra los resultados del ensayo de una placa. Un sensor fue colocado 0.46 m. del fondo de la pared y el segundo sensor fue colocado 2 m. del fondo de la pared. La primera hora de vaciado estaba a una velocidad de 2.75 m/hr, la segunda hora en 1.37 m/hr y más lento para las horas finales. El sensor más bajo alcanzó una máxima presión de 4920 kg/m<sup>2</sup> de donde como la presión hidrostática habría sido 14060 kg/m<sup>2</sup>. Adicionalmente la presión más alta fue alcanzada mucho antes de que el vaciado hubiese acabado. Es también importante notar que en algún punto del vaciado el concreto adicional en la placa no causó que la presión aumente, como se muestra la máxima presión ocurre simplemente sobre la primera hora de vaciado el cual duró 4 hr.

### **El estudio de presión del encofrado en una pared firme**

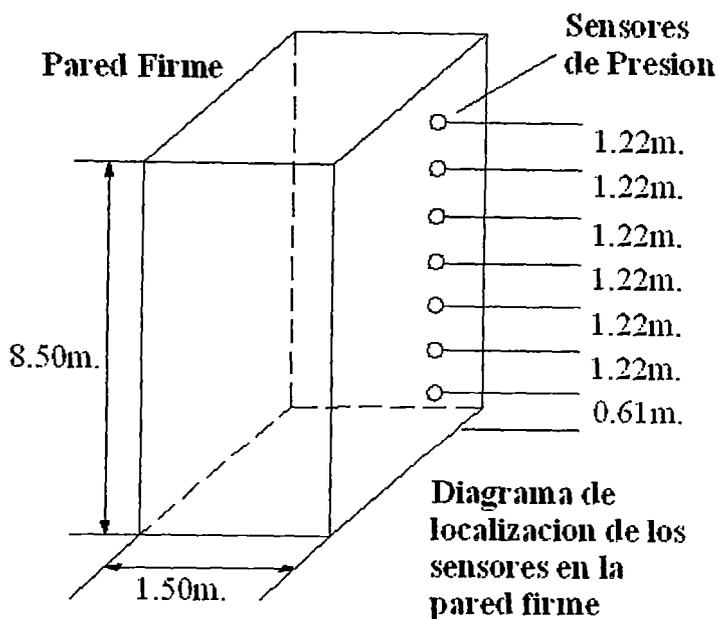
Tejeda-Dominguez [2005] evaluó la presión lateral ejercida por el concreto autocompactante durante el vaciado de una pared firme en las instalaciones del laboratorio de Ingeniería civil en la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign.

La pared era pesada reforzada y midió 24.4 m en la longitud, 1.5 m de ancho, y 8.5 m en la altura (Figura 36). El concreto fue colocado continuamente desde lo alto con una bomba a velocidad de vaciado pequeña de 1.22 m/h; la velocidad de llenado del concreto autocompactante en el encofrado fluctuó entre 0.61 a 1.68 m/h. La fluidez era de 710 mm con variaciones ocasionales de 600 mm a 735 mm. La temperatura del concreto en el momento del vaciado era de 16 °C sobre el promedio y alcanzó su punto máximo en 60 °C antes del segundo día después de la colocación.

La distribución de la presión lateral fue determinada usando siete sensores colocados a lo largo de la pared. Como se muestra en el Grafico 56, la presión hidrostática no fue alcanzada en todas partes de la altura de la pared. La presión máxima registrada era sólo el 20% de la presión máxima hidrostática. Las presiones más altas no fueron medidas en el fondo de la pared, donde la altura del concreto era más grande, pero correspondió a los períodos a tiempo donde las velocidades de vaciado eran más altas.



**Figura 36:** Encofrado de 8.5m de alto de la pared firme [Tejeda-Dominguez, 2005]



**Figura 37.-** Se colocó en la pared 7 sensores de presión.

**La máxima presión**

P (hidrostática) =

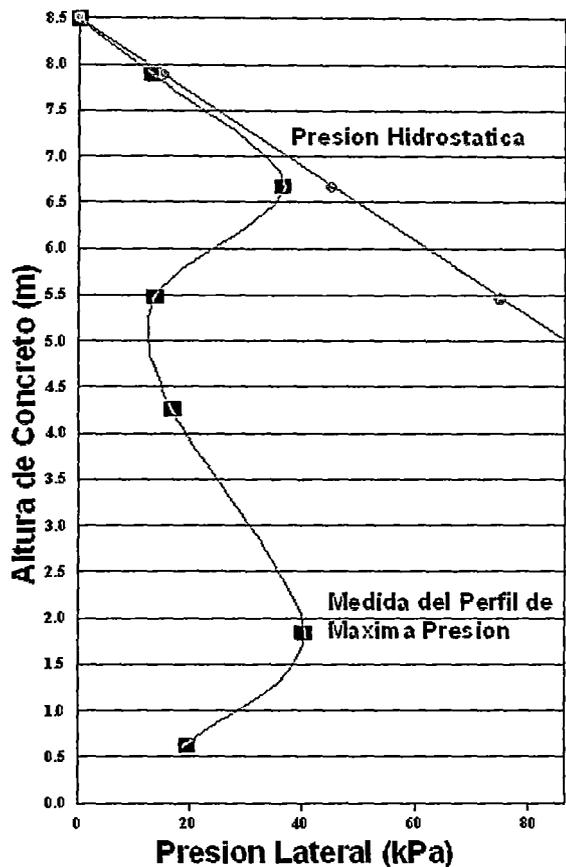
$$2400 \times 8.5 = 20400 \text{ kg/m}^2$$

P (máx. experimental) =

$$39500 \text{ kg/m}^2$$

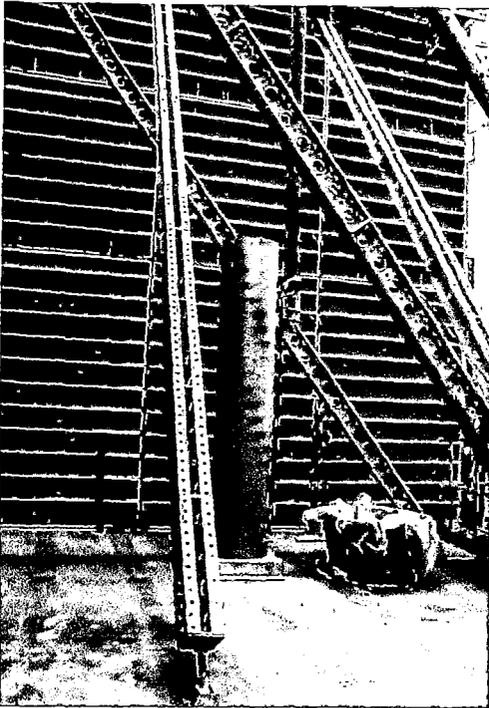
Se observa que la máxima presión experimental es aproximadamente el 20% de la presión hidrostática.

**Grafico 56:** Altura de concreto vs. Presión Lateral



## El estudio de presión del encofrado en una columna

Figura 38.- Encofrado de 3.2m de alto de la columna circular [Tejeda-Dominguez, 2005]



La columna tiene una altura de 3.2m. la cual fue vaciada el mismo día de construcción de la pared firme. Para su llenado se uso el mismo diseño de concreto que en la pared firme a una velocidad de vaciado muy rápida de 18.3 m/h.

- Aunque la columna fue sólo una tercera parte de la altura de la pared, las presiones medidas fueron superiores.
- La presión comenzó a decrecer tan pronto como el vaciado de concreto se detuvo finalmente.

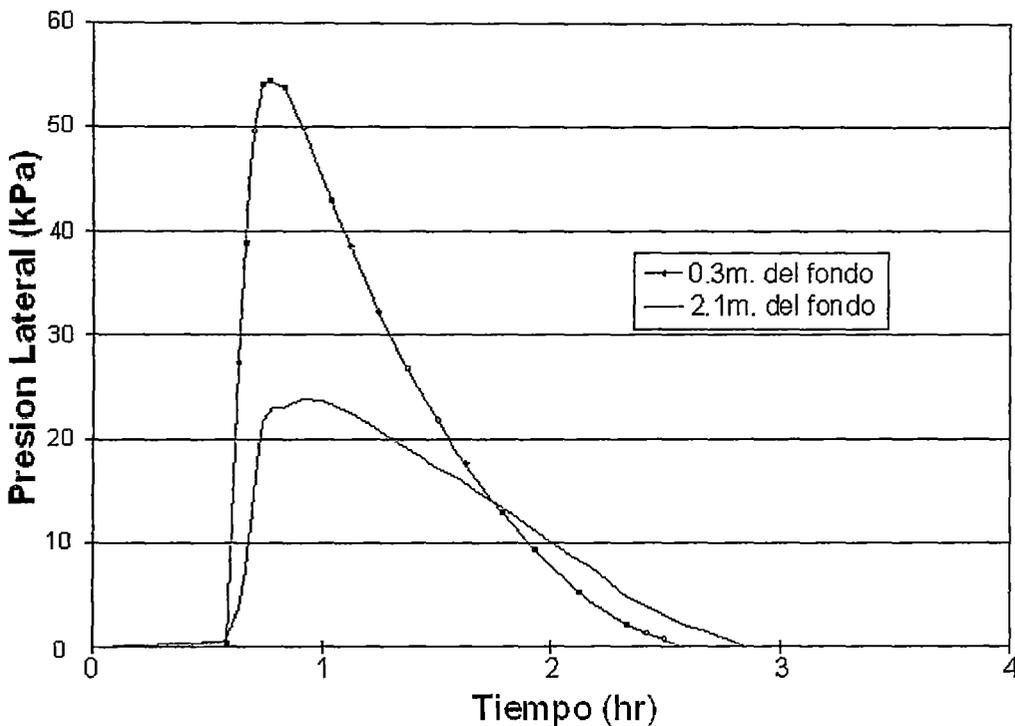
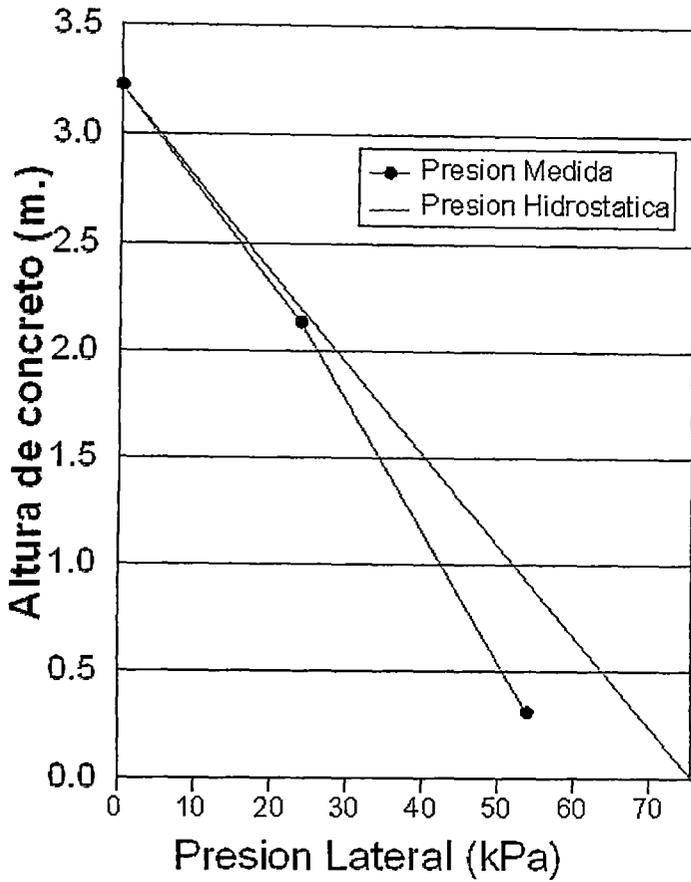
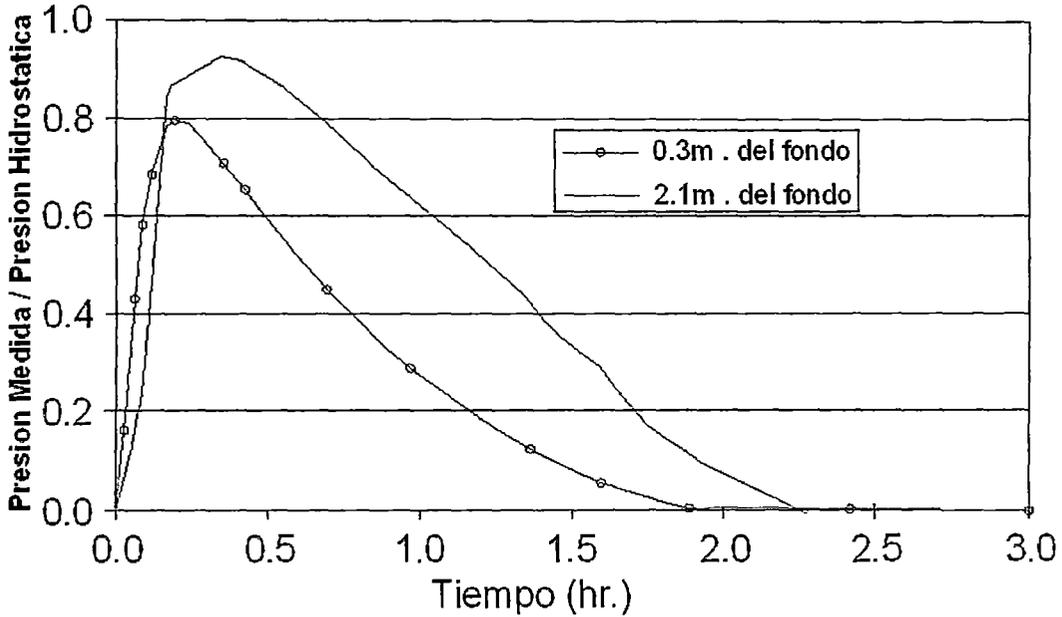


Grafico 57.- Tiempo vs. Presión Lateral



La máxima presión se encuentra en el rango del 80 al 93% de la presión hidrostática.

**Grafico 58.-** Altura de concreto vs. Presión Lateral



**Grafico 59.-** Tiempo vs. Presión Medida / Presión Hidrostática

## CAPÍTULO IV: ENSAYO DE PROTOTIPOS EXPERIMENTALES DE PLACAS DE CONCRETO

Según Khayat et al. University of Sherbrooke realizó una placa experimental para someterlo a condiciones de llenado no contempladas por la norma y observar la presión que ejerce el concreto.

### 4.1 Diseño de experimento

Se realizó el llenado en una placa que se usará en una obra real, los sensores de presión se colocaron donde se esperaba una presión máxima.

### 4.2 Características del concreto

Fue un concreto autocompactante con un slump flow de 720 mm.

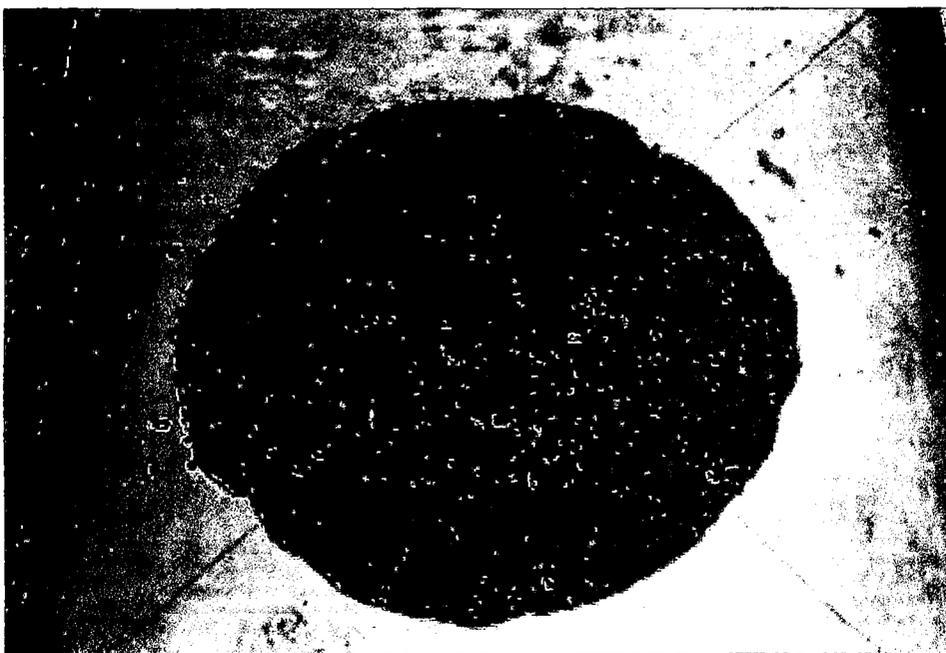


Figura 39.- Slump flow del concreto autocompactante

### 4.3 Características del encofrado

El encofrado fue metálico con unas dimensiones de:

- Largo = 7.0 m.
- Ancho = 0.19m.
- Alto = 5.8 m.
- Espesor = 1.8 cm.

#### 4.4 Colocación de los sensores de presión

Se colocaron 7 sensores en el encofrado de la siguiente manera.

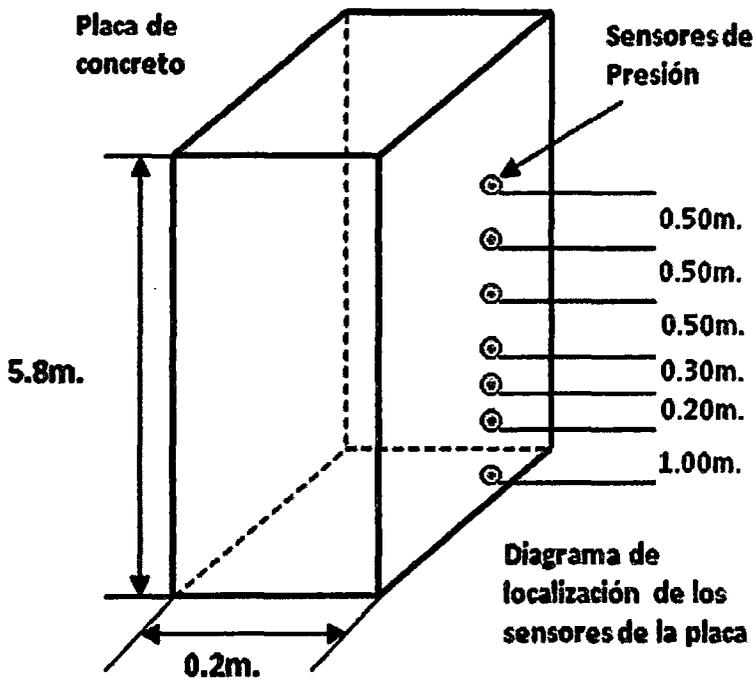


Figura 40.- Diagrama de la localización de los sensores en la placa

#### 4.5 Condiciones de colocación

La colocación del concreto se dio a una velocidad de 6.5 m/h, una cuantía de 0.4% y utilizando una bomba que nos asegura la velocidad constante.

El llenado de la placa se dio en 54 minutos a velocidad constante.

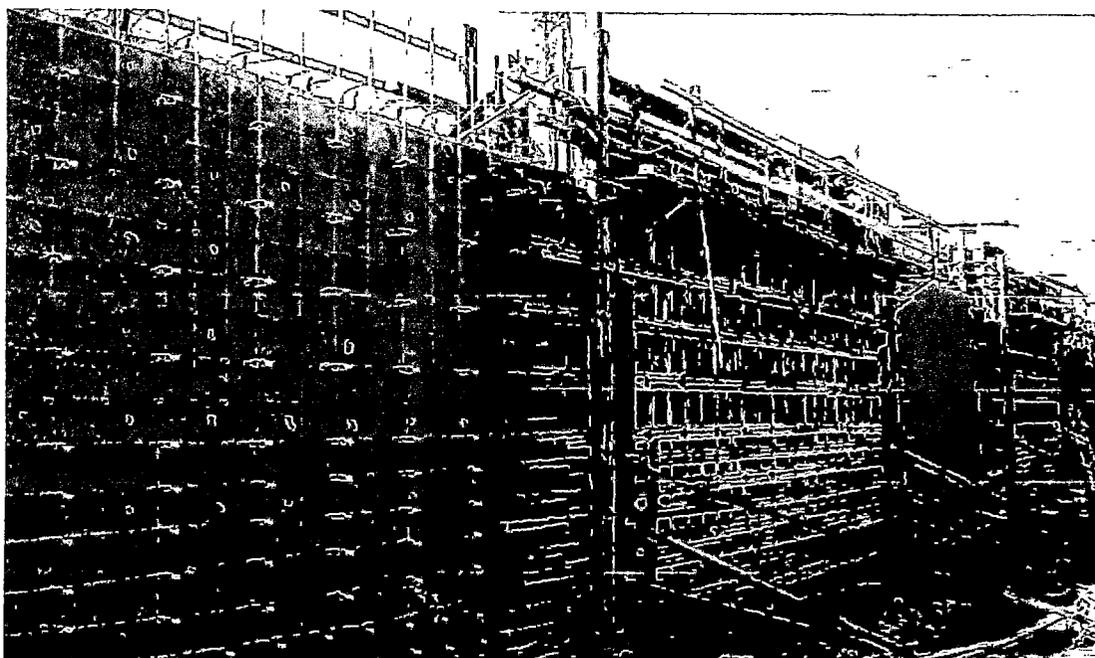


Figura 41.- Placa experimental

4.6 Grafica de presión lateral vs. Altura de concreto

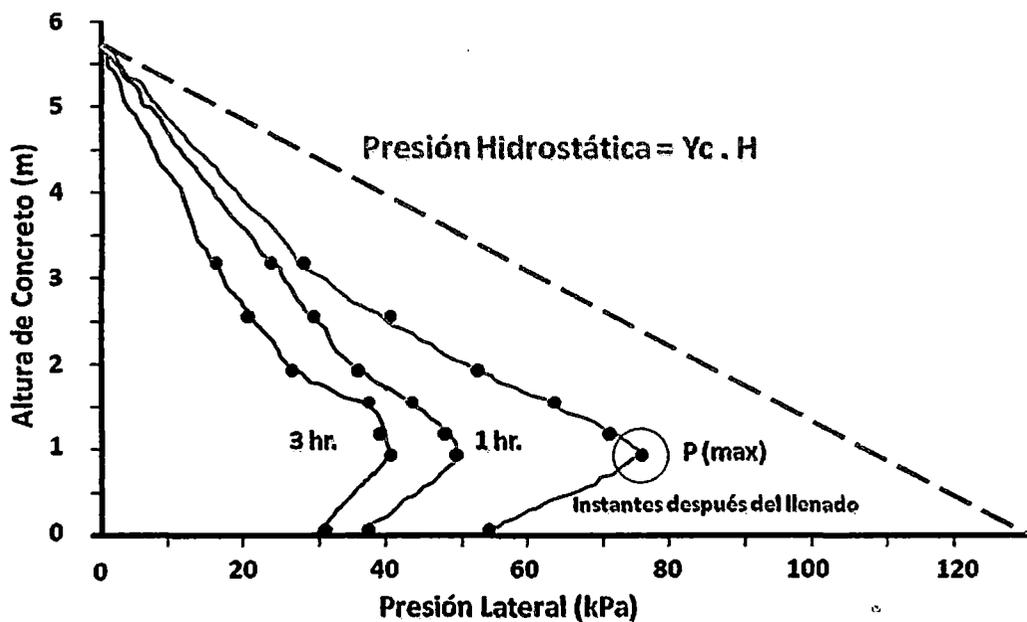


Grafico 60.- Presión Lateral vs. Altura de concreto

## CAPÍTULO V: ENSAYO DE PROTOTIPOS EXPERIMENTALES DE COLUMNAS DE CONCRETO

### 5.1 Diseño de experimento

Se utilizó un encofrado de madera para realizar estos ensayos, se colocaron los transductores cada 0.5m para obtener lectura de presión en toda la altura.

### 5.2 Características del concreto

Se realizaron 2 diseños de mezcla diferentes para el llenado de las columnas de concreto armado, este concreto fue dado por la concretera LIDERMIX.

#### Diseño 1

El concreto fue puesto en el elemento después de 50 min de haber salido de la planta.

Concreto de alta fluidez (Reoplastico)

- $f'c=210\text{kg/cm}^2$
- Slump="9"
- Cemento= 320 kg.
- Agua= 200 lt.
- Arena= 950 kg.
- Piedra= 980 kg.
- Aditivo plastificante= 1% P.C.



**Figura 42.- Concreto Reoplastico**

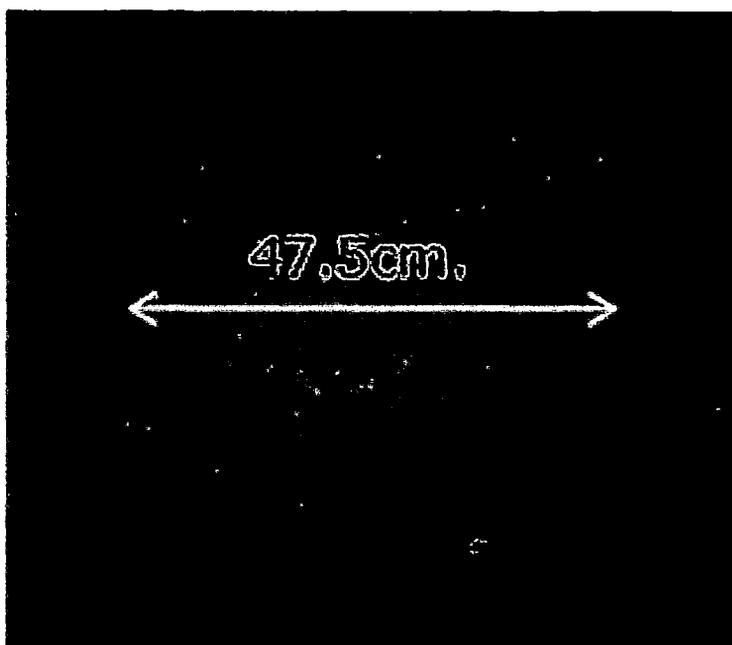
## Diseño 2

El concreto fue puesto en el elemento después de 90 min de haber salido de la planta.

Concreto de alta fluidez (Autonivelante)

- $f'c=400\text{kg/cm}^2$
- Slump flow= 47.5cm.
- Cemento= 450 kg.
- Agua= 150 lt.
- Arena= 885 kg.
- Piedra= 960 kg.
- Aditivo plastificante= 1.5% P.C.

Para determinar la fluidez se realizo el ensayo del cono invertido y luego se midió el diámetro de expansión.



**Figura 43.- Concreto Autonivelante**

### 5.3 Características del encofrado

El encofrado fue de madera con unas dimensiones de:

- Largo = 0.7m.
- Ancho = 0.4m.
- Alto = 3.6 m.
- Espesor = 1.8 cm.

### 5.4 Colocación de los sensores de presión

Se colocaron los transductores en el encofrado de la siguiente manera, asegurado con 6 pernos a su alrededor.

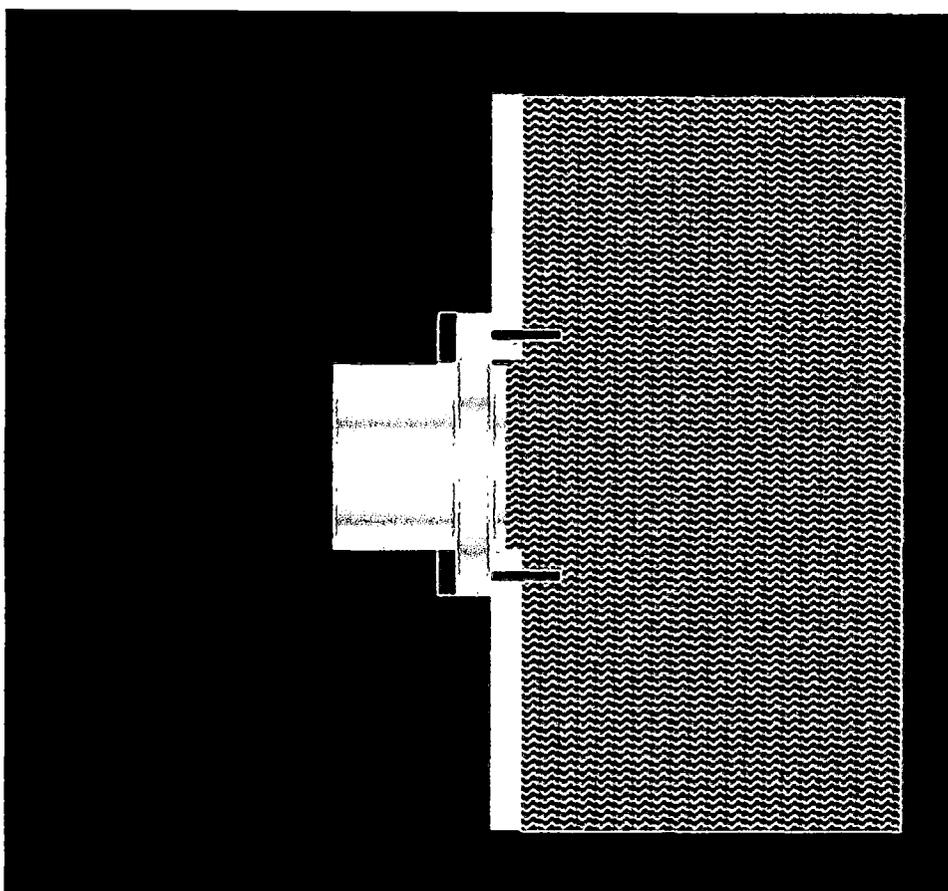


Figura 44.- Diagrama de la localización del transductores en el encofrado.

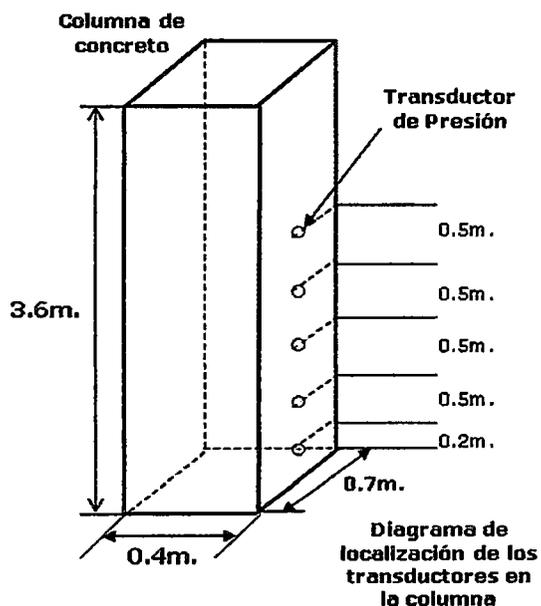


Figura 45.- Diagrama de la localización de los transductores en el encofrado.

Para realizar la colocación de los transductores se siguió los siguientes pasos:

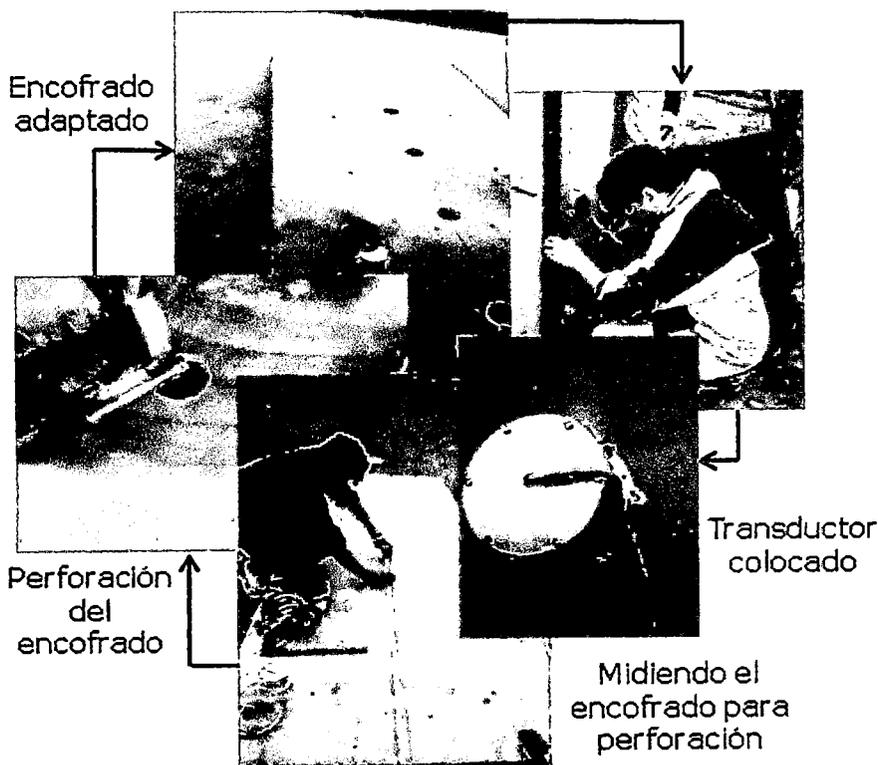


Figura 46.- Pasos seguidos para la colocación de los transductores en el encofrado.

Para luego tener 5 transductores colocados en el encofrado:



**Figura 47.-** Transductores colocados en el encofrado.

### 5.5 Condiciones de colocación

La colocación del concreto se dieron a altas velocidades, a temperaturas parecidas, una cuantía de 0.49% y utilizando una bomba que nos asegura la velocidad constante.

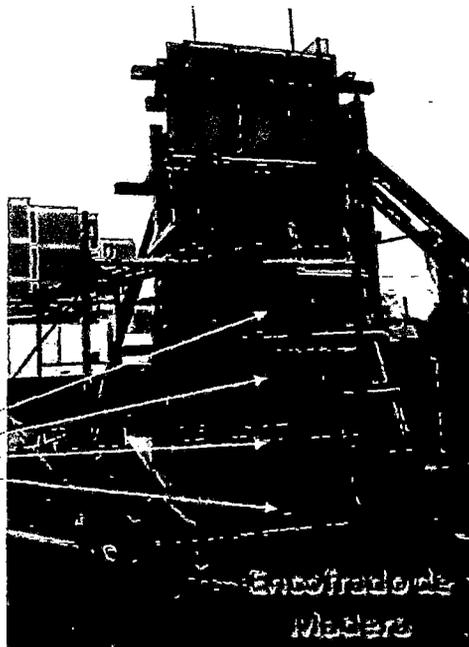
Las características para cada colocación fueron:

- Para el Diseño 1:  
Velocidad = 100 m/h  
Temperatura = 18 °C
- Para el Diseño 2:  
Velocidad = 90 m/h  
Temperatura = 17 °C

Solo se usaron 4 transductores en cada ensayo:

Columna Experimental 1:

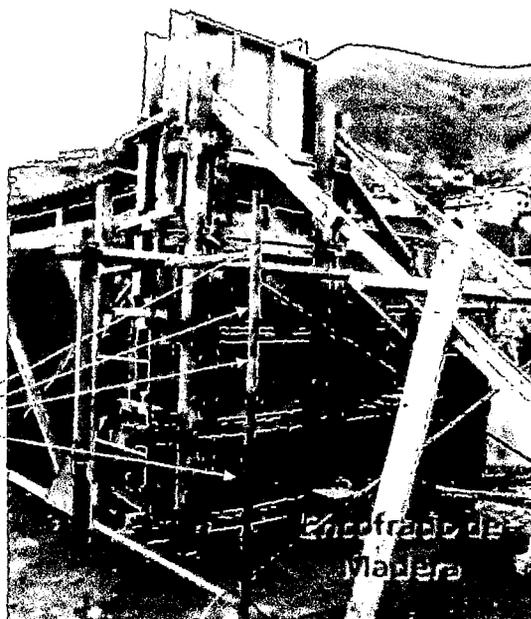
Se colocaron 4  
transductores de  
presión para medir la  
Presión Lateral



**Figura 48.-** Ubicación de los transductores en el encofrado.

Columna Experimental 2:

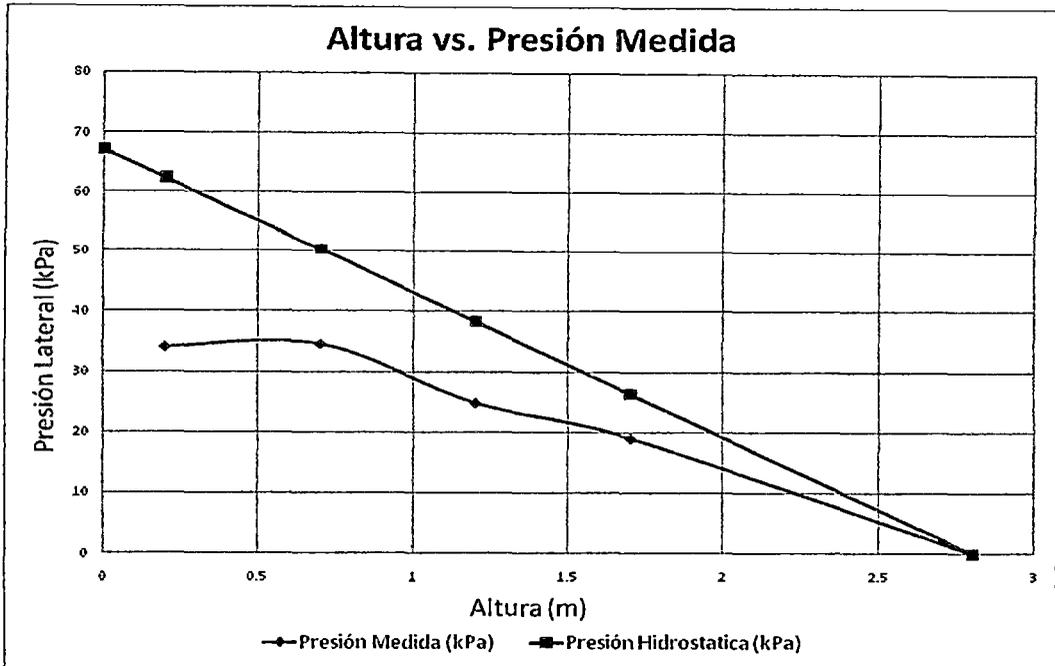
Se colocaron 4  
transductores de  
presión para medir la  
Presión Lateral



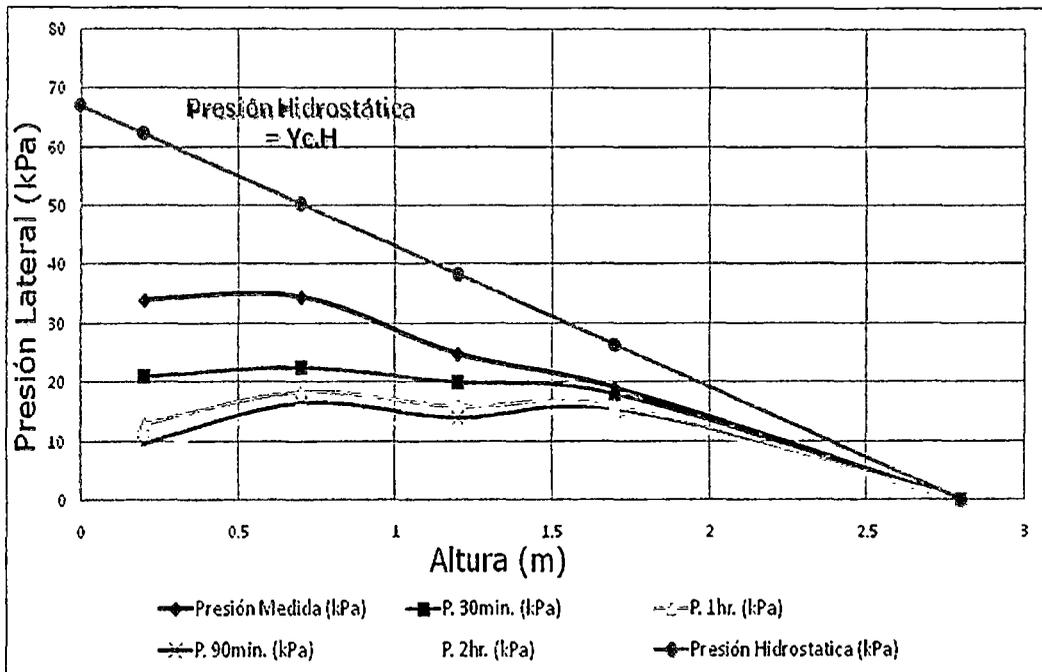
**Figura 49.-** Ubicación de los transductores en el encofrado.

### 5.6 Graficas de presión lateral vs. Altura de concreto

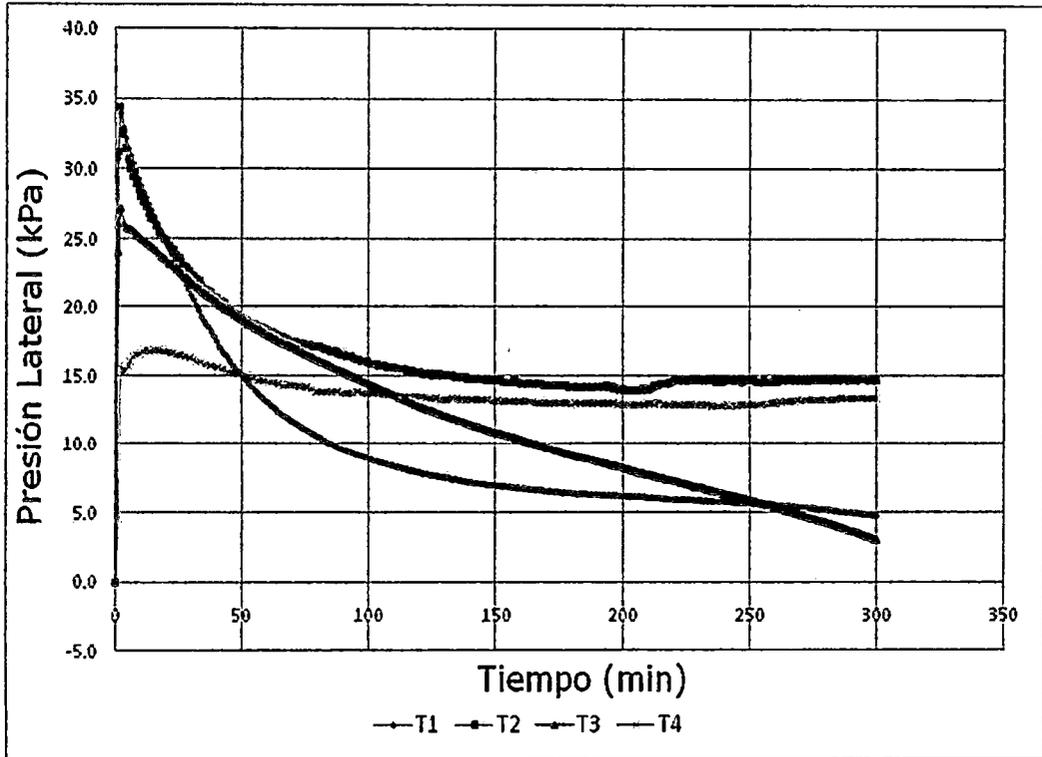
#### Columna Experimental 1:



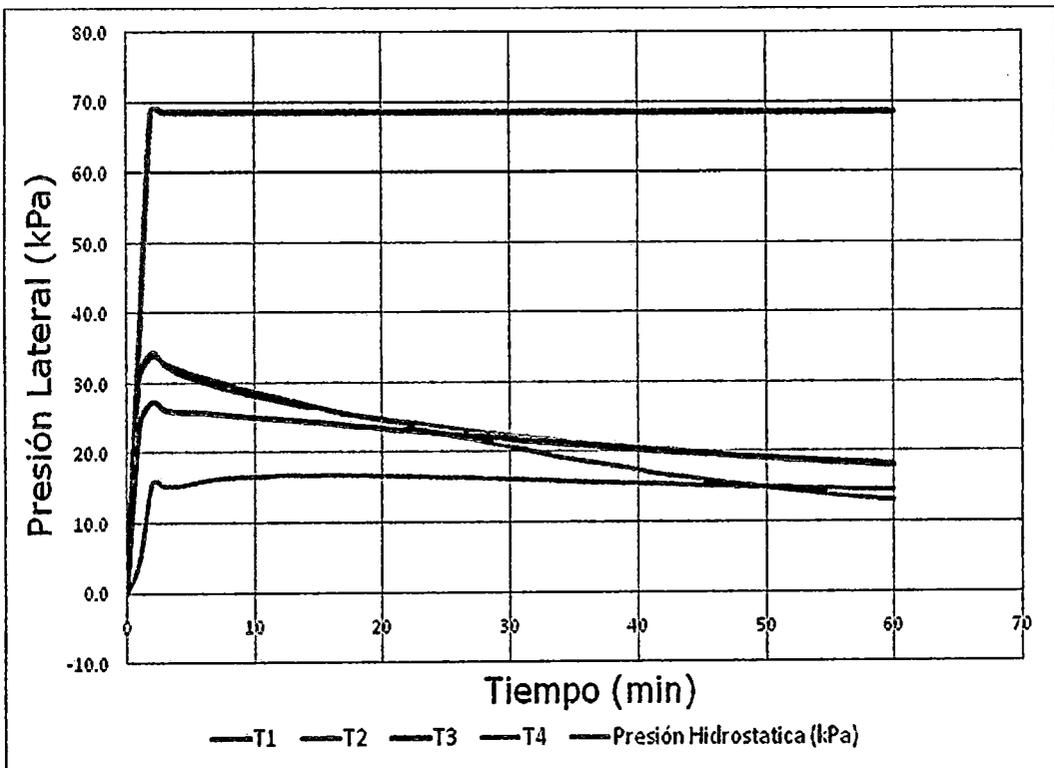
**Grafica 61.-** Presión medida en el momento de finalizar el llenado de la columna.



**Grafica 62.-** Decrecimiento de la presión con el tiempo

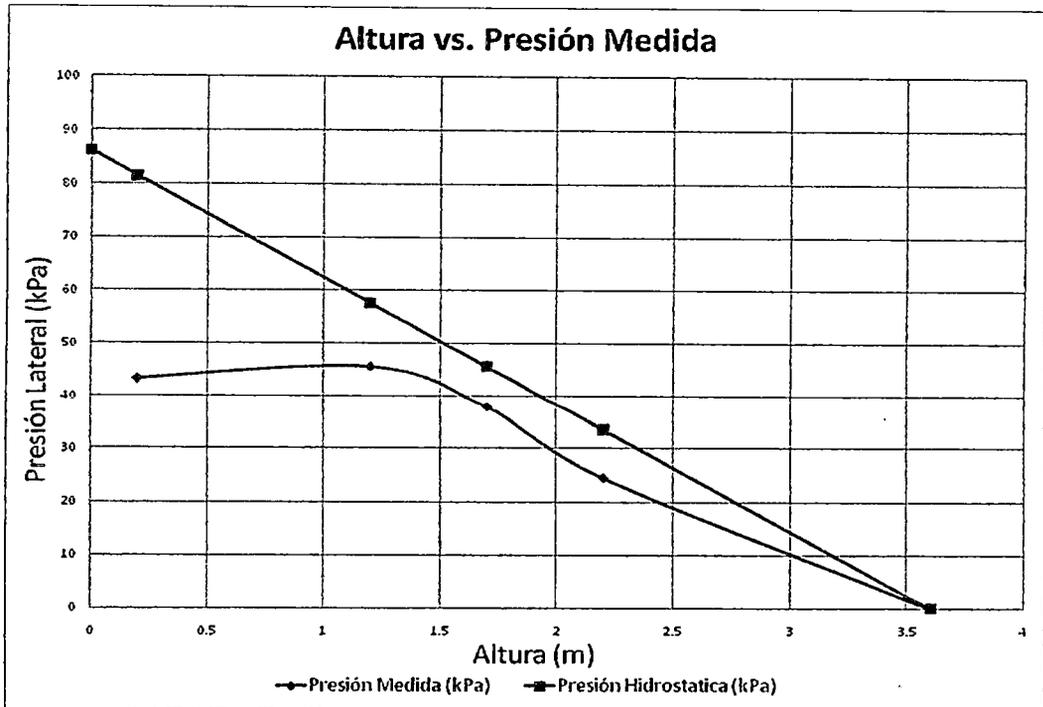


**Grafica 63.-** Decrecimiento de la presión lateral en el tiempo

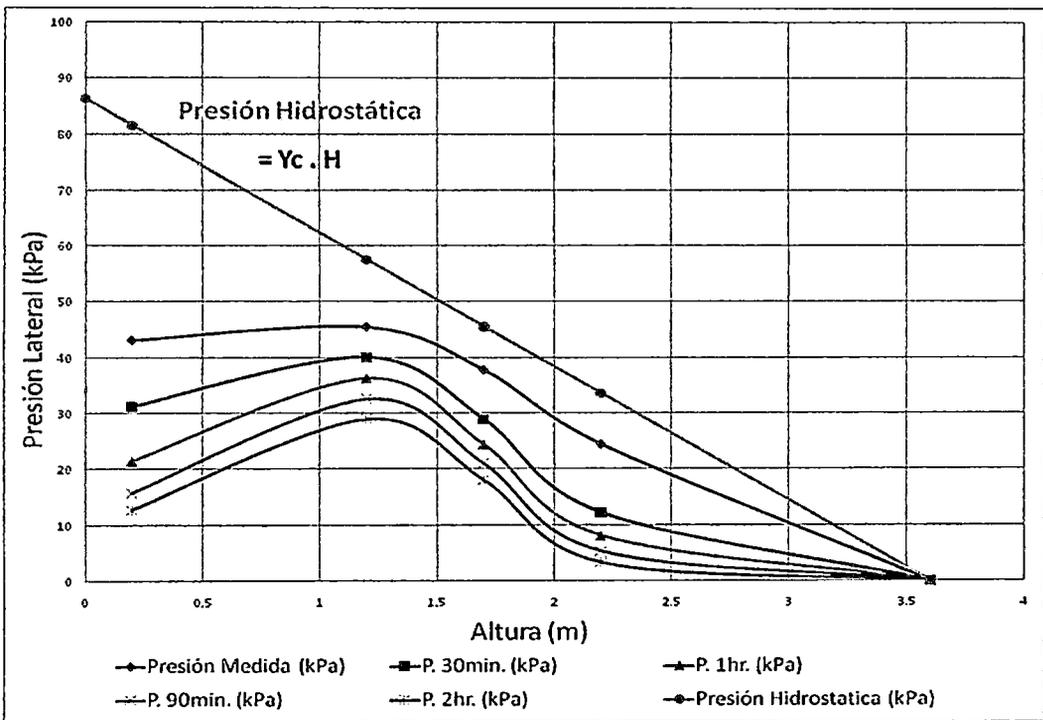


**Grafica 64.-** Decrecimiento de la presión lateral relativa en el tiempo

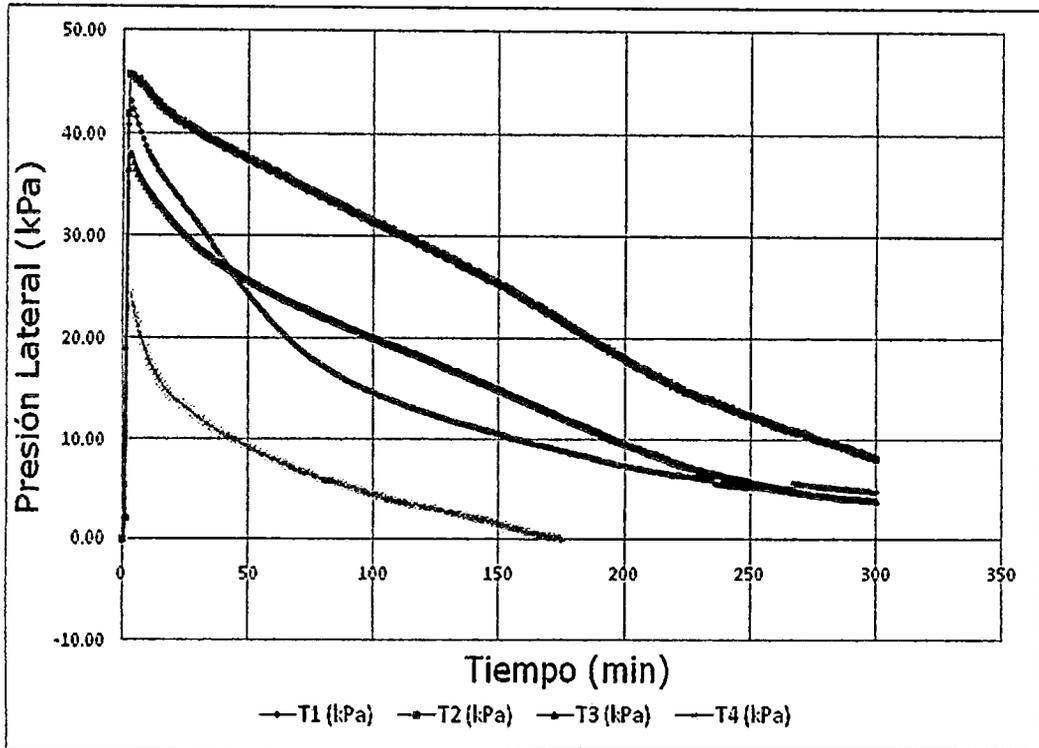
Columna Experimental 2:



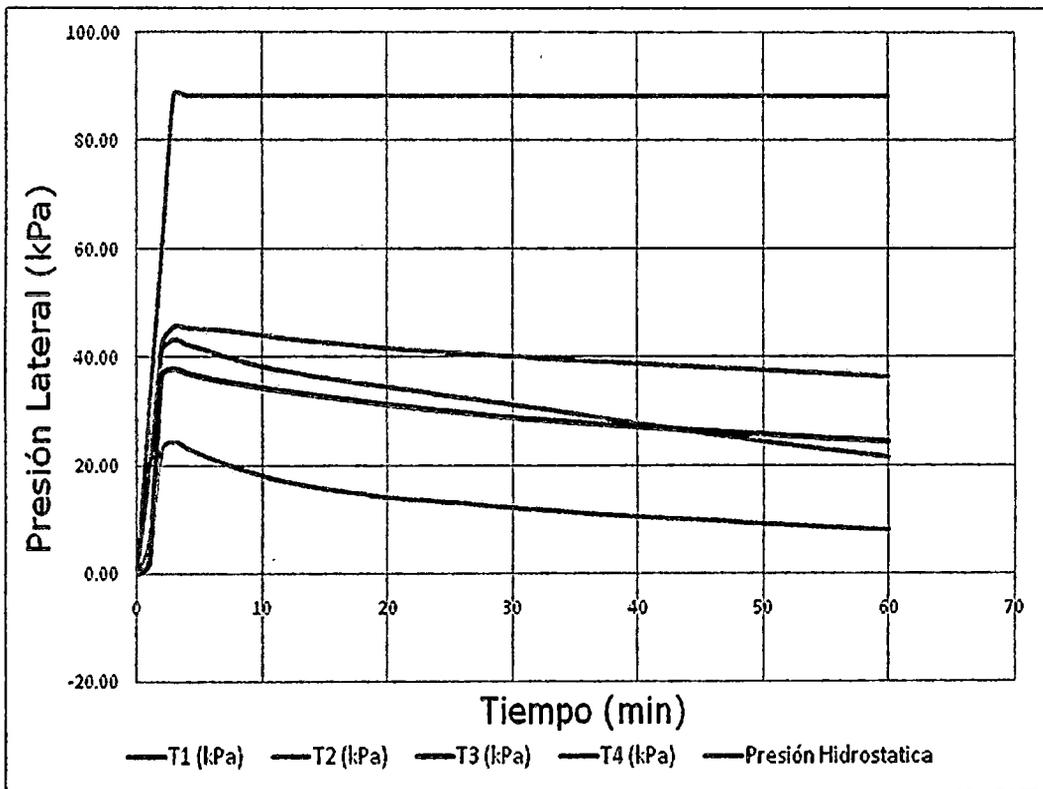
**Gráfica 65.-** Presión medida en el momento de finalizar el llenado de la columna.



**Gráfica 66.-** Decrecimiento de la presión con el tiempo



**Grafica 67.-** Decrecimiento de la presión lateral en el tiempo



**Grafica 68.-** Decrecimiento de la presión lateral relativa en el tiempo

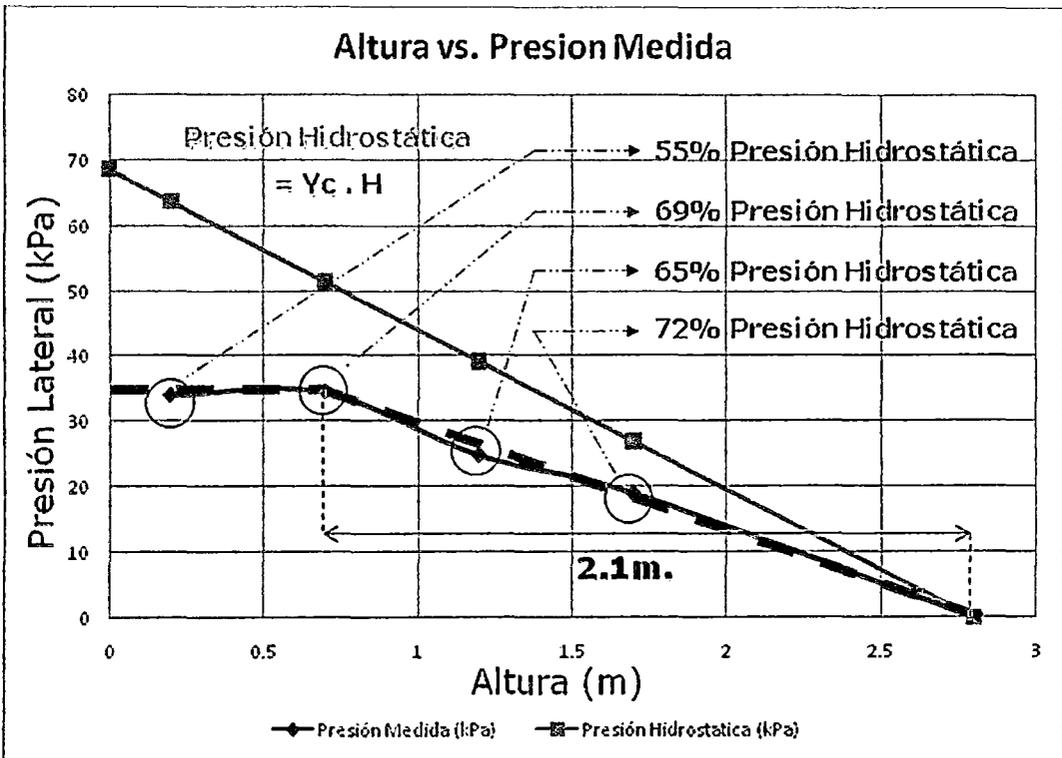
## CAPÍTULO VI: ANALISIS DE RESULTADOS

### 6.1 Análisis de Columnas

#### Columna Experimental 1:

En la grafica de Altura vs. Presión lateral observamos que el comportamiento de la presión lateral es bilineal que es indicada por una línea azul, notamos que la primera recta tiene una influencia de 2.1m de altura, y que no va siguiendo la presión hidrostática debido a que no es un fluido, la segunda recta muestra valores de presión casi constantes.

La presión máxima registra por los transductores es de 50% de la presión hidrostática, lo que significaría que el factor de seguridad para este caso es de 2, debido a que la norma indica que el diseño del encofrado debe hacerse considerando la presión hidrostática de la altura total del encofrado. Notamos que la presión máxima está entre el 50% y 72% de la presión hidrostática.

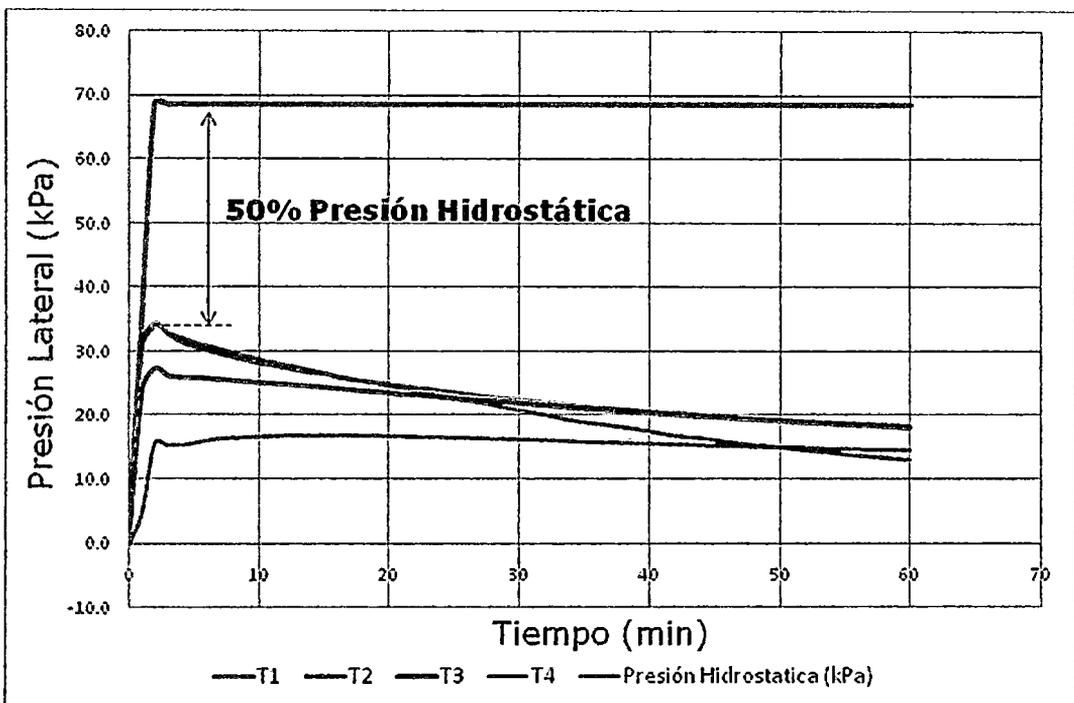


**Gráfico 69.- Presión Lateral vs. Altura (CE1)**

Haciendo la grafica presión lateral vs. Tiempo, notamos que la presión máxima es mucho menor que la presión hidrostática que es la indicada por la norma ACI-347 para el diseño del encofrado bajo estas condiciones.

Hay que tener en cuenta que el concreto no seguirá una envolvente de presión igual a la hidráulica puesto que no es un fluido.

Observamos que la presión máxima se da en el momento del llenado, luego de eso la presión comienza a bajar debido a la fragua del concreto.



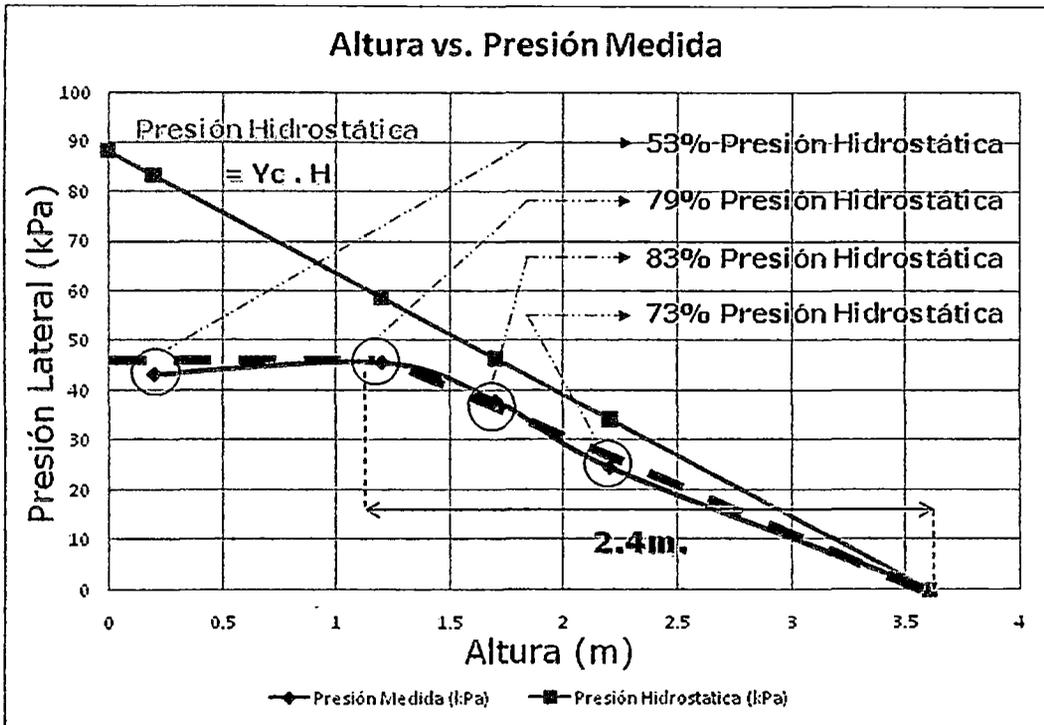
**Gráfico 70.- Presión Lateral vs. Tiempo (CE1)**

Columna Experimental 2:

En la grafica de Altura vs. Presión lateral observamos que el comportamiento de la presión lateral es bilineal que es indicada por una línea azul, notamos que la primera recta tiene una influencia de 2.4m de altura, que no va siguiendo la presión hidrostática debido a que no es un fluido, la segunda recta muestra valores de presión casi constantes.

La presión máxima registra por los transductores es de 50% de la presión hidrostática, lo que significaría que el factor de seguridad para este caso es de 2, debido a que la norma indica que el diseño del encofrado debe hacerse considerando la presión hidrostática de la altura total del encofrado.

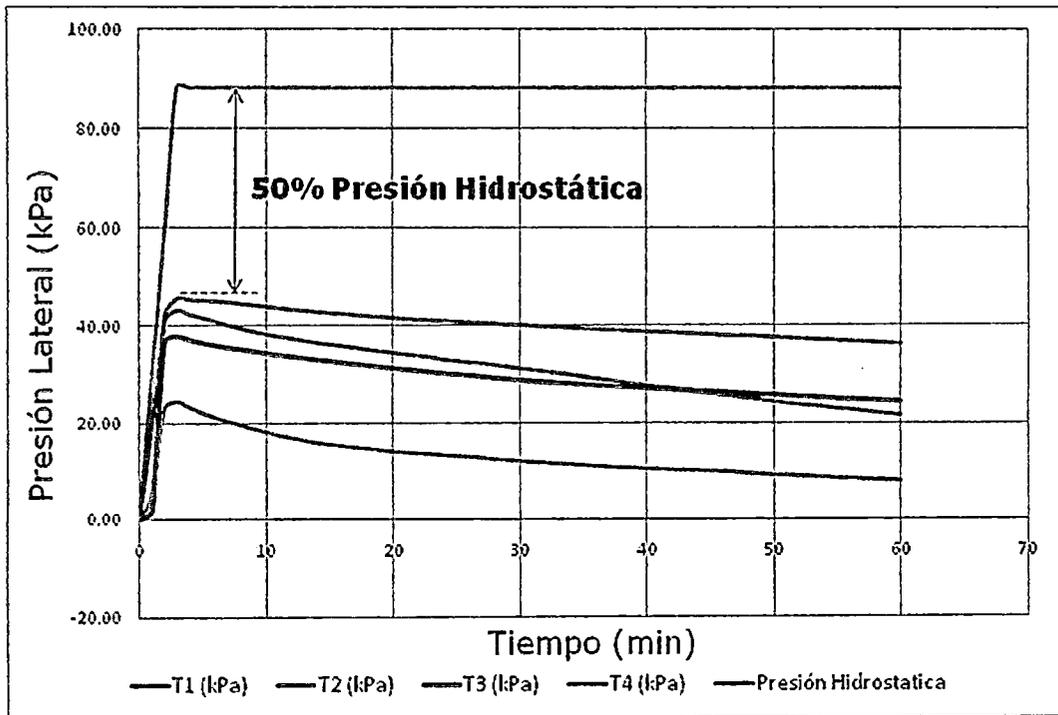
Notamos que la presión máxima está entre el 50% y 83% de la presión hidrostática.



**Gráfico 71.- Presión Lateral vs. Altura (CE2)**

Observamos el mismo comportamiento que en el ensayo 1, la presión máxima se da en el momento del vaciado, luego de eso notamos un decrecimiento de la presión.

También notamos un comportamiento parecido en el decrecimiento de la presión con el tiempo, lo que podría generar un modelamiento matemático de la presión con mayores ensayos.



**Gráfico 72.- Presión Lateral vs. Tiempo (CE2)**

## 6.2 Análisis de Placa

### Placa experimental:

En la grafica Presión lateral vs. Altura de concreto notamos que al igual que en las columnas, la presión máxima se da en el momento del llenado, luego de 1hr. Notamos un decrecimiento de la presión del 34% de la presión máxima medida y luego de 3hrs. Un decrecimiento del 47% de la presión máxima medida.

También se observa que la presión máxima es el 71% de la presión hidrostática, lo que muestra una sobre estimación para el diseño del encofrado en este caso.

El ACI347-04 indica que bajo estas condiciones, la presión de diseño debería ser la hidrostática.

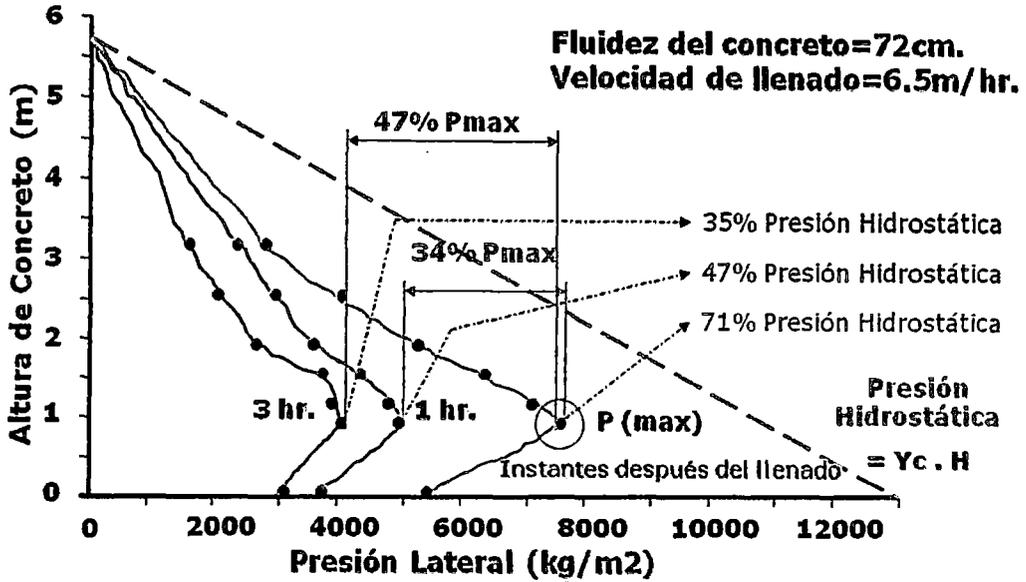


Gráfico 73.- Presión Lateral vs. Altura de concreto

### 6.3 Modelamiento matemático del decrecimiento de presión con el tiempo

Notamos que la presión lateral que ejerce el concreto sobre el encofrado es bilineal, entonces podemos graficarla así:

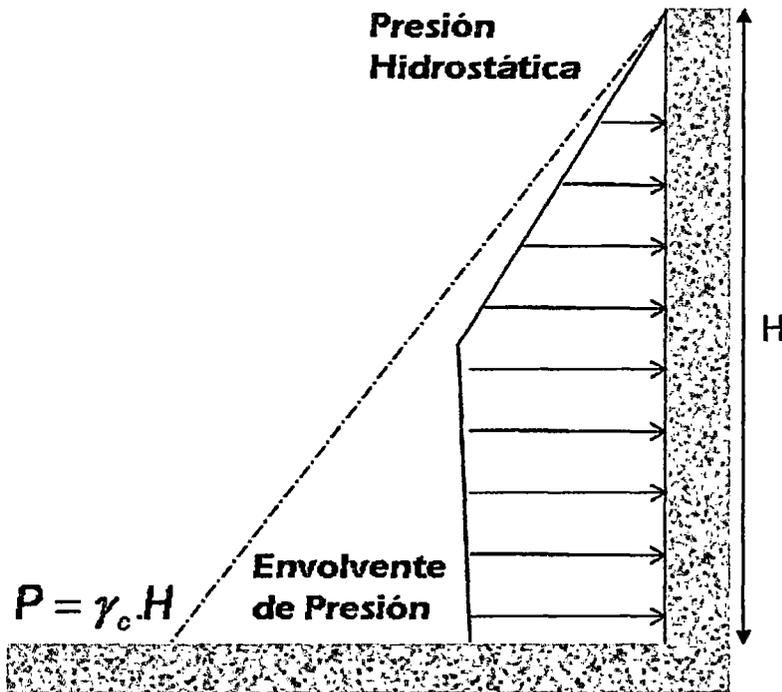


Figura 50.- Envoltente de presión lateral

Definimos la presión máxima con la siguiente expresión:

$$P_{\max} = \gamma_c \cdot H \cdot C_{(0)} \quad (1)$$

Donde  $C_{(0)}$  es el cociente de la presión máxima medida y la presión hidrostática.

David A. Lange et al. propusieron el siguiente modelamiento matemático para  $C_{(t)}$  y determinar el decrecimiento de la presión en el tiempo.

$$C_{(t)} = \frac{C_{(0)}}{(a \cdot t^2 + 1)^\alpha} \quad (2)$$

Donde:

$C_{(0)}$  : es el valor inicial.

$a, \alpha$  : Define el ángulo inicial y final del ángulo de la curva.

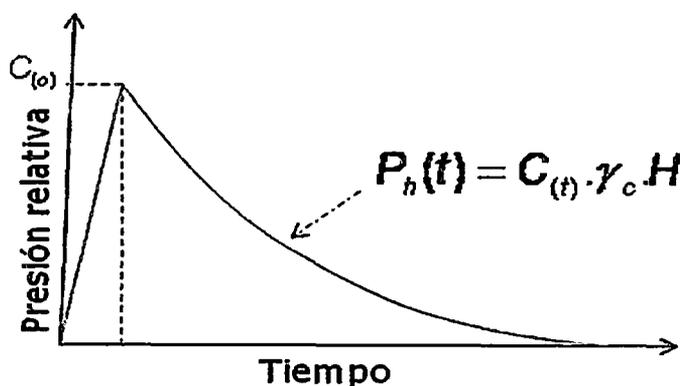


Figura 51.- Decrecimiento de la presión lateral

El tiempo depende de muchos factores como son los aditivos, temperatura del medio ambiente, cemento utilizado, etc.

---

## CONCLUSIONES

- La velocidad de llenado es el principal parámetro con el que se puede controlar la presión.
- La mayoría de los datos experimentales obtenidos en varios estudios ha concluido que a velocidades de llenado por encima de 5 m/h causa presiones que son por lo general superiores al 80% de la presión hidrostática. A causa de la facilidad de bombeo y el progreso rápido en la colocación debido a la carencia de vibración, las velocidades de llenado usadas para un concreto de alta fluidez son por lo general más altas que 4.5 m/h.
- El concreto fluido con el transcurrir del tiempo no mostró un desarrollo mayor de la presión que cuando se realiza el vaciado y por lo tanto, a no ser que la forma de diseño sea para altas presiones, el gran cuidado debería ser tomada cuando se realiza el vaciado en alta o posiblemente aún en moderada velocidad de vaciado.
- La fluidez del concreto es uno de los factores más importantes para el análisis de presión en el encofrado, el cual es directamente proporcional a la presión en encofrados de elementos laterales, pero este parámetro deja de tener mucha importancia a velocidades de vaciado mayores de 8 m/h.
- Se demostró que la Temperatura del Concreto no es un factor relevante para la obtención de la presión máxima pero si tiene mucha influencia para determinar el tiempo de fragua.
- Un mayor conocimiento de la presión del encofrado conducirá versiones mejoradas de modelos de presión de encofrados. Varios modelos de presión de encofrados han sido desarrollados, y un elemento común es que todos los modelos requieren ensayos particulares de concreto fluido y la obtención del valor de un parámetro representativo para describir la reología o fluidez. Tales modelos representan la gran oportunidad de mejorar la predicción de presiones de encofrados en la construcción, permitiendo realizar vaciados a velocidades

mayores con una confianza mayor. Estos avances harán la construcción más económica con concretos fluidos.

-Los 2 ensayos experimentales utilizando concreto de alta fluidez ha concluido que a velocidades de llenado muy altas (100m/h a 90 m/h) causa presiones que son por lo general nos da un máximo de 50% de la presión hidrostática.

-Se observo que la presión del concreto en el encofrado tiene un comportamiento bilineal.

## RECOMENDACIONES

- Se podría realizar un diseño de un concreto fluido de tal manera que la presión que ejerza sea mucho menor que la hidrostática pero esto se daría a costa de la pérdida del slump.
- En casos en que no se cuente con un encofrado que soporte la presión adecuada para la que fue diseñada, se podría hacer el vaciado a una menor velocidad.
- Se podría aumentar la velocidad de llenado realizando vaciados desde el fondo del elemento ya que genera menor presión que el vaciado desde la parte superior del elemento.
- Cuando se utilice concretos altamente fluidos se debe tener mayor precaución en las justas del encofrado para evitar fugas de concreto.
- Observando la presión ejercida por el concreto de alta fluidez a altas velocidades, notamos que podríamos llenar los elementos a velocidades superiores de 4.5 m/h para obtener mayor productividad en la construcción.

---

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Dr. Graubner Carl-Alexander, Dr. Proske Tilo, Self Compacting Concrete "PRESSURE ON FORMWORK AND ABILITY TO DEAEERATE" – EEUU, 2002.
- [2] Dr. Billberg Peter, Form Pressure Generated by Self-Compacting Concrete - Influence of Thixotropy and Structural Behaviour at Rest – EEUU, 2006.
- [3] PhD. Assaad Joseph J., Khayat Kamal H. "Effect of casting rate and concrete temperature on formwork pressure of self-consolidating concrete" – Materials and structures – EEUU, 2006.
- [4] Dr. Billberg Peter, Dr. Österberg Thomas y Dr. Silfwerbrand Johan - Form Pressures Generated by Self-Consolidating Concrete "Casting rate is a dominant factor" – ACI International – EEUU, 2005.
- [5] MSc. Leemann Andreas, MSc. Hoffmann Cathleen, y PhD. Winnefeld Frank "Pressure of Self-Consolidating Concrete on Formwork" – Concrete International – EEUU, 2006.
- [6] PhD. Assaad Joseph J., Khayat Kamal H. "Effect of Mixture Consistency on Formwork Pressure Exerted by Highly Flowable Concrete" - JOURNAL OF MATERIALS IN CIVIL ENGINEERING ASCE – EEUU, Noviembre 2006.
- [7] Dr. Khayat Kamal, Dr. Shah Surendra, Dr. Taylor Peter, SCC FORMWORK PRESSURE - THE NATIONAL READY-MIX CONCRETE RESEARCH FOUNDATION – EEUU, 2007.
- [8] Dr. Nmai, Charles K., ACI-PERU, Memorias del Seminario Internacional "Todo sobre Concreto autocompactante" – Lima, Perú – 2007.
- [9] Tomoshenki y Woinowsky Krieger, LIBRODOT, TEORÍA DE LÁMINAS Y PLACAS – Capítulo 3– EEUU – 2008.

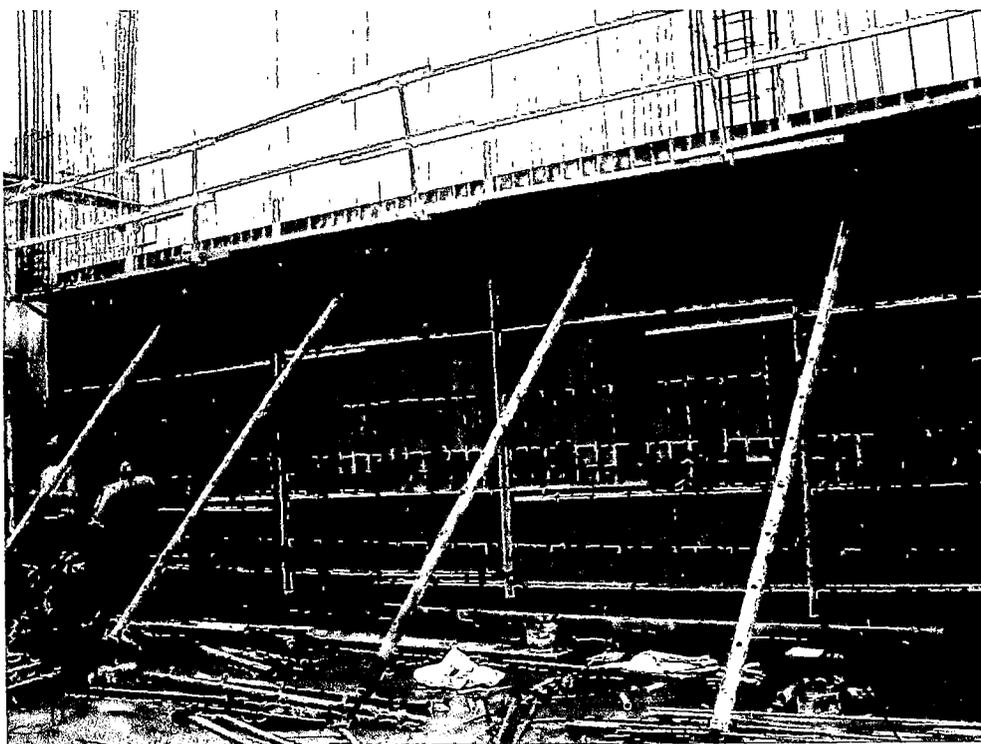
[10] VISHAY MICRO MEASUREMENTS, Design Considerations for Diaphragm Pressure Transducers– EEUU – Julio 2007.

[11] David A. Lange et al., BASF Chemical, MODELING FORMWORK PRESSURE OF SCC– EEUU – 2008.

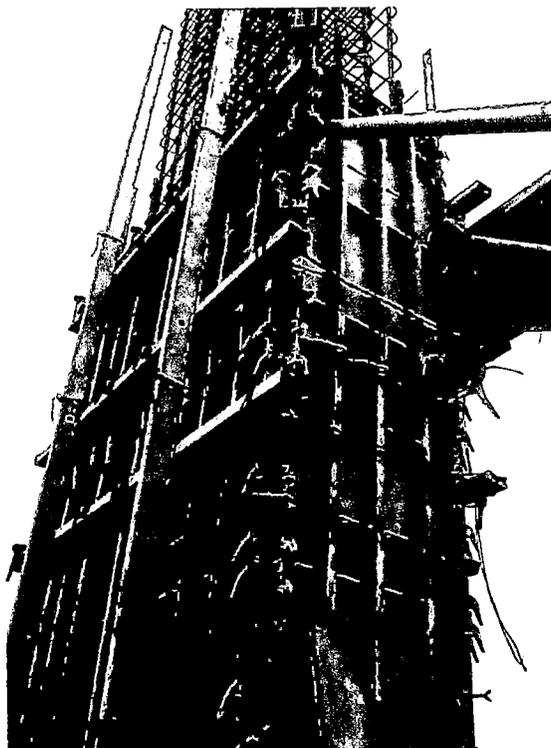
[12] Lucelly Reyes, Electronica y microelectrónica para científicos, Galgas Extensiometricas– Colombia – 2009.

## ANEXOS

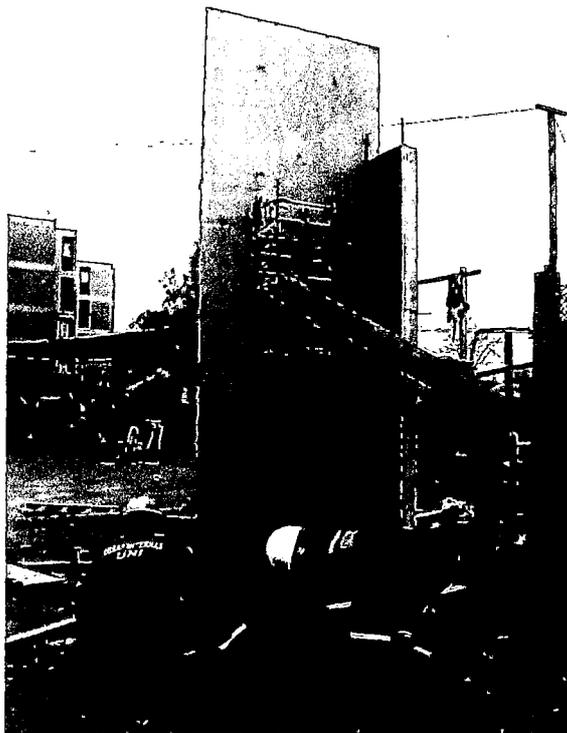
## ARCHIVOS FOTOGRÁFICOS



**Figura 52.-** Placa de Concreto Armado (GyM- Edificio Capital)



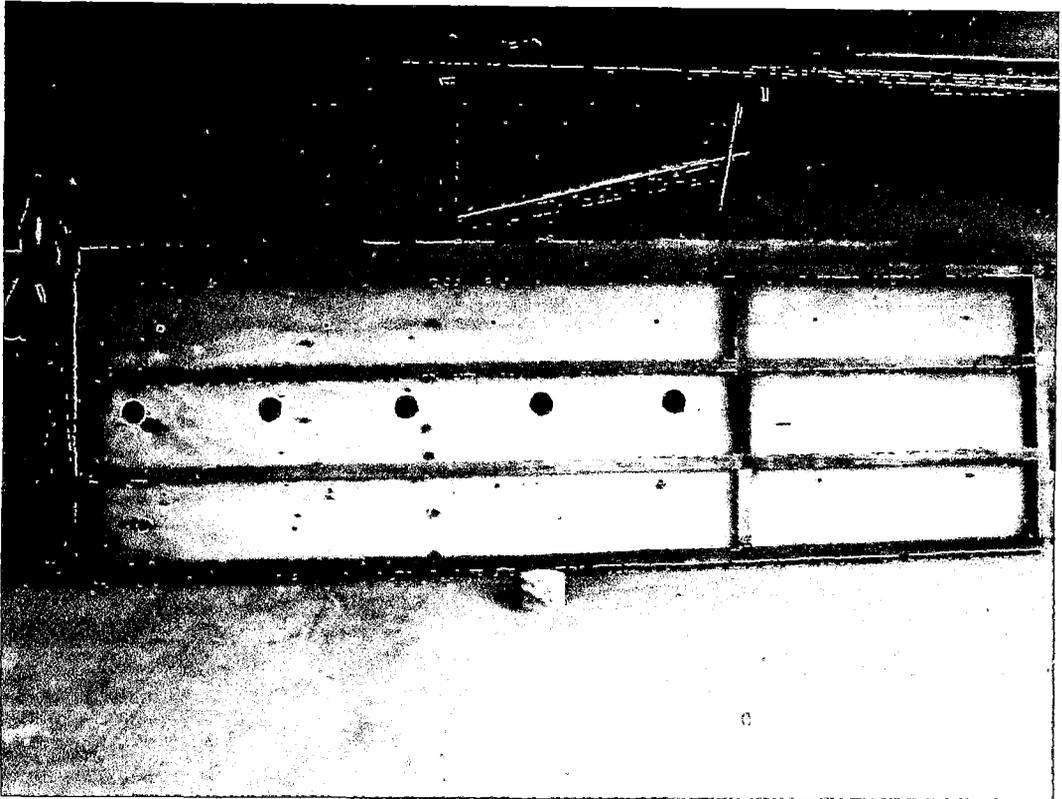
**Figura 53.-** Columna de Concreto Armado (GyM- Edificio Capital)



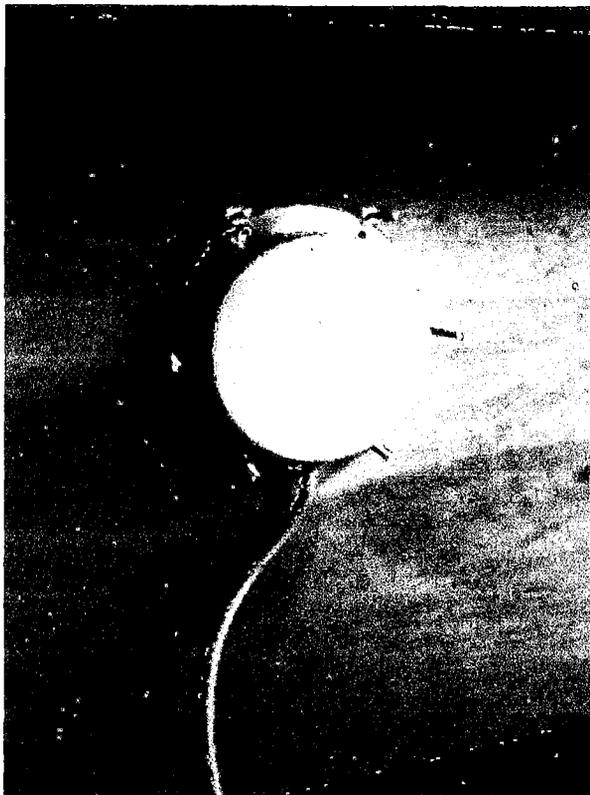
**Figura 54.-** Columna de Concreto Armado



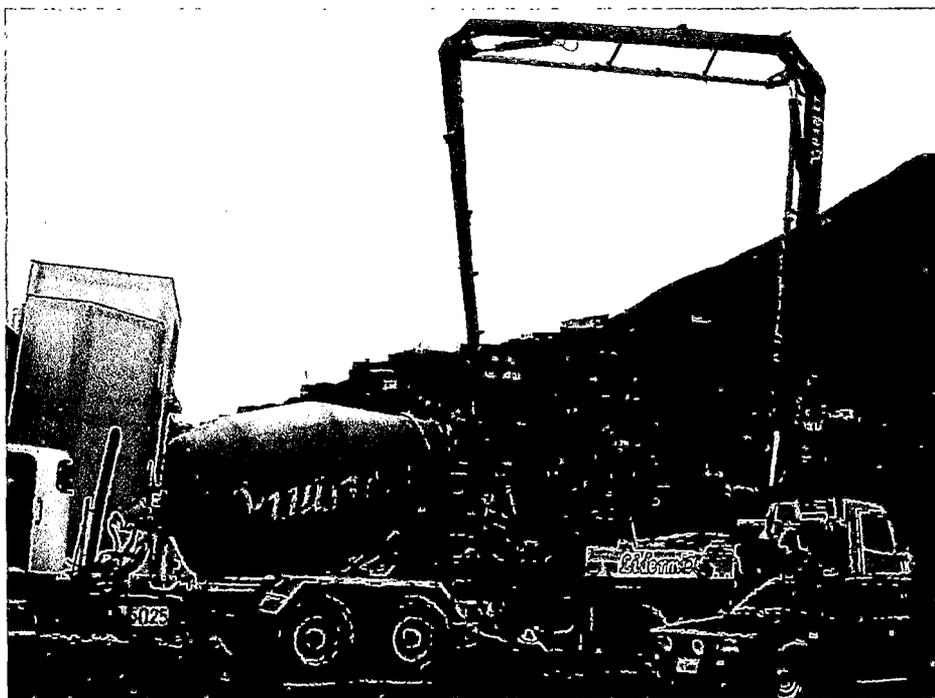
**Figura 55.-** Columna de Concreto Armado



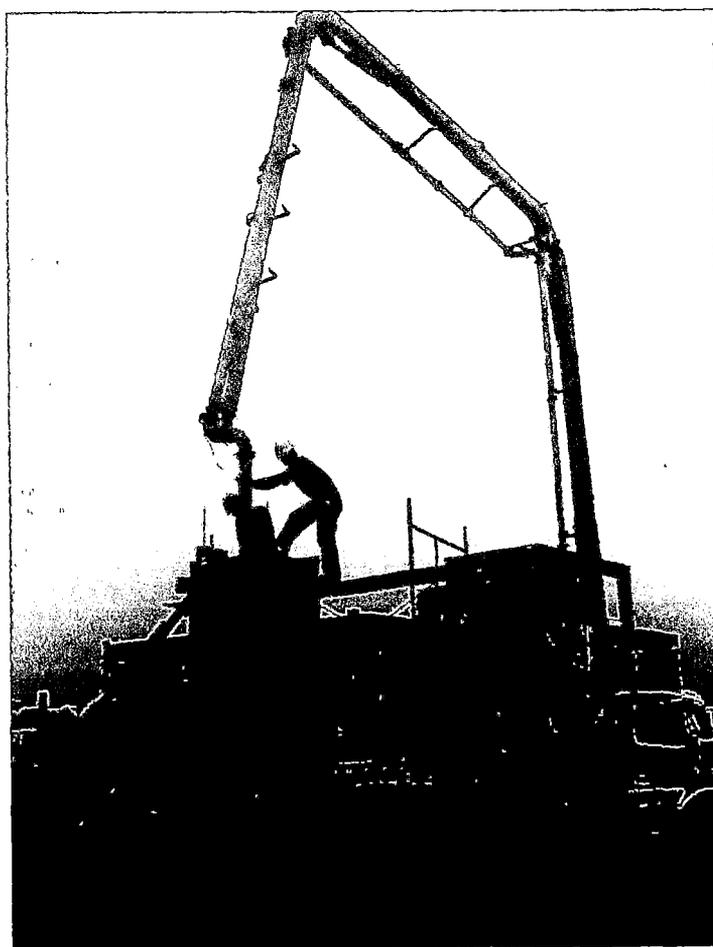
**Figura 56.-** Encofrado modificado



**Figura 57.-** Colocación del transductor en el encofrado



**Figura 58.- Mixer de la empresa LIDERMIX**



**Figura 59.- Llenado de la columna de concreto**