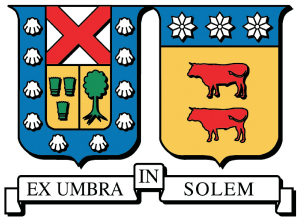
UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES
VALPARAÍSO - CHILE



DISEÑO Y PRUEBAS EXPERIMENTALES DE UN NUEVO SOPORTE DE ENCOFRADO DE MURO PARA MEJORAR SU CALIDAD SUPERFICIAL

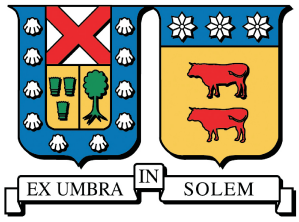
ANGELA PAMELA OLIVARES MONTECINOS

Memoria para optar al título de
Ingeniero Civil

Profesor Guía
Leonhard E. Bernold

Enero 2018

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES
VALPARAÍSO - CHILE



DISEÑO Y PRUEBAS EXPERIMENTALES DE UN NUEVO SOPORTE DE ENCOFRADO DE MURO PARA MEJORAR SU CALIDAD SUPERFICIAL

Memoria de titulación presentada por

ANGELA PAMELA OLIVARES MONTECINOS

Como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero Civil

Profesor Guía

Leonhard E. Bernold

Enero 2018

Agradecimientos

La realización de esta memoria se llevó a cabo con la ayuda de muchas personas de diferentes áreas, y las nombro a continuación:

En el área de construcción quiero agradecer a la empresa constructora Inpromec, en especial a Carlos Seemann, administrador de obra, y a Juan Vidal, carpintero de encofrado, quien me enseñó el proceso de instalación de encofrado de losa. Luego, a la empresa de encofrados Soinsa, que nos permitió tener una reunión para entender el problema de esta memoria. También a la empresa constructora Viconsa, a Camilo Ramírez, administrador de obra, y Jorge Tirado, jefe de terreno, por permitir hacer las observaciones y mediciones de terreno. Y a la empresa de encofrados Peri Chile, en especial a Jaime Ugarte, por recibir a los memoristas en la empresa para conversar sobre los problemas tratados en las memorias y ayudar en la etapa de modelación del problema de esta memoria.

En la universidad, quiero agradecer al laboratorio LEMCO, donde se facilitó espacio y equipos para realizar la prueba de laboratorio, en especial a don Tomás, quien facilitó herramientas y espacios para la prueba.

También agradezco mucho a mi familia con su paciencia y apoyo, ya que ha sido un largo proceso, y nunca dejaron de apoyarme.

Y finalmente, a mi Coach B. Leonhard Bernold, que si bien es mi profesor guía, cumplió más que rol de guía, fue un apoyo constante, especialmente en situaciones difíciles durante el desarrollo de esta memoria, por ejemplo, el efecto de la falta de autoconfianza, debido a mis dificultades durante la universidad, que solo ha podido ir superándose al comprender sobre cómo funciona el cerebro en el proceso de aprendizaje, y al desarrollar habilidades de estudio, cosas que nadie fue capaz de enseñar durante todo mi período estudiantil, y que impactan de forma directa al rendimiento y el bienestar psicológico de un estudiante.

a mi Coach B.

Resumen

A lo largo de los últimos 50 años, la productividad de la industria de la construcción en Estados Unidos disminuyó en un 50 %, y es el mismo nivel de 1947.

Muchas publicaciones muestran que el factor crítico de esta caída es la baja calidad del proceso constructivo. Un ejemplo son las irregularidades superficiales en los muros de hormigón que exceden las tolerancias permitidas, llevando a reparaciones que retrasan el trabajo siguiente.

Esta memoria se enfocó en el problema de resaltes producidos en las áreas de anclaje de vigas en muros de hormigón. El objetivo general fue diseñar, fabricar y ensayar una nueva solución para ser probada en terreno. Asimismo, eliminar el tiempo consumido en las reparaciones.

La metodología establecida comenzó con observaciones en terreno y mediciones de la práctica actual, que se modelaron para estudiar las relaciones causa-efecto entre la calidad de los recursos y resultados. Se encontró que el diseño del soporte del encofrado es el factor clave para la calidad. Por ello, un nuevo soporte de encofrado fue diseñado, fabricado y ensayado en el laboratorio para medir su rendimiento. Debido al riesgo en la seguridad de una tecnología no certificada, las mediciones de terreno comparativas se realizaron con un dispositivo similar aprobado. Mediciones de los espesores de los resaltes se hicieron en siete muros para tres pisos consecutivos en el edificio de un hotel en Viña del Mar.

Los cálculos de diseño mostraron que el nuevo soporte de encofrado resistió la presión del hormigón prevista y mantuvo las deflexiones dentro de las tolerancias definidas por la Corporación de Desarrollo Tecnológico. Estos resultados se confirmaron con el ensayo de laboratorio. El análisis de los datos de terreno mostró que cinco superficies que usaron el nuevo soporte tuvieron espesores promedio bajo las tolerancias en un 83 %. Además, los resaltes disminuyeron en un 75 % cuando se cambió al nuevo soporte. Finalmente, las pruebas de terreno revelaron la importancia de la capacitación de la mano de obra, porque una buena tecnología con mala capacitación no producirá los resultados deseados.

Palabras clave: *construcción, hormigón, calidad, encofrado, resaltes.*

Abstract

Over the last 50 years, the productivity in the United States construction industry decreased by 50 % and is at the same level of 1947.

Many publications show that the critical factor for this decline is the low quality of the building process. One example of this are the irregularities on concrete wall surfaces that exceed the acceptable tolerances, leading to required repairs that delay the subsequent work.

This thesis focused on the problem of large offsets produced in the beam anchorage areas of concrete walls. The overall objective was to design, fabricate and test a new solution to be tested in the field. It also had to eliminate the time consumed to fix these offset problems.

The established methodology started with observations in the field and measuring the present practice, which was modeled to study the cause-effect relationships between the resources and output quality. It was found that the design of the formwork support is the key factor for quality. Because of this, a new formwork support was designed, fabricated and tested in the lab for its performance. Due to the safety risks of a non-certified technology, the comparative field measurements were made with a similar but approved and certified device. Thickness measurements in the offsets were made on seven wall surfaces for three consecutive levels in a multistory hotel building in Viña del Mar.

The design calculations showed that the new formwork support resisted the expected concrete pressure and kept the deflections within the tolerances established by the Corporación de Desarrollo Tecnológico. These results were confirmed by a laboratory test. The analysis of the data from the field showed that five surfaces using the new formwork support had average thicknesses below the tolerances in 83 %. In addition, they decreased by 75 % when the new support was used. Finally, the field test revealed the importance of worker training because a good technology with bad training will not produce desired results.

Keywords: *construction, concrete, quality, formwork, offsets.*

Glosario

anclaje de vigas Zona de anclaje del refuerzo de una viga

encofrado Molde formado con tableros o chapas de metal o de material análogo, en el que se vacía el hormigón hasta que fragua, y que se desmonta después

junta de hormigonado Unión de un hormigón endurecido con uno fresco, producto de la interrupción de la faena de hormigonado

pérdida Actividad que añade un costo pero no un valor al producto final

resalte Porción de materia que sobresale en la superficie de un objeto

tixotrópico Propiedad de algunos fluidos no newtonianos y pseudoplásticos que muestran un cambio de su viscosidad en el tiempo. Un fluido tarda un tiempo finito en alcanzar una viscosidad de equilibrio cuando hay un cambio instantáneo en el ritmo de cizalla.

tolerancias Variación permisible de las dimensiones, pendientes, alineamientos de los elementos a ser construidos.

CDT Corporación de Desarrollo Tecnológico

LEMCO Laboratorio de Ensaye de Materiales y Control de Obras

RHZAV Resaltes de Hormigón en la Zona de Anclaje de Vigas

Índice de Contenidos

1. Introducción **1**

2. Revisión de la Literatura **4**
2.1. Estudios sobre la presión que ejerce el hormigón sobre el encofrado 4
2.1.1. Métodos para medir de la presión del hormigón fresco 5
2.1.2. Modelos y ecuaciones para calcular la presión ejercida por el hormigón fresco 7
2.1.3. Estudios recientes sobre los factores que afectan la presión 9
2.1.4. Efecto de los materiales en la presión generada en la superficie del encofrado 10
2.2. Sistemas de encofrados usados en la construcción de edificios 10
2.2.1. Encofrado industrializado 11
2.3. Otra tecnología en encofrados: encofrado colaborante o Stay in Place 15
2.4. Calidad resultante con el uso de encofrados 16

3. Definición del problema y planteamiento de las hipótesis **19**
3.1. Definición del problema 19
3.2. Hipótesis 20

4. Estudio y modelación del problema **21**
4.1. Observaciones en terreno 21
4.2. Modelación del problema 24
4.2.1. Proceso constructivo de vigas 24
4.2.2. Modelo de fuerzas que actúan sobre el encofrado 26
4.2.3. Relaciones causa-efecto del problema 28

5. Diseño de una solución **31**
5.1. Criterios de diseño 31
5.2. Propuesta de diseño 32
5.3. Resistencia de diseño 33
5.3.1. Estado de cargas 33
5.3.2. Resistencia nominal 35
5.3.3. Resistencia requerida 36
5.3.4. Desplazamientos 38

6. Prueba del soporte **40**
6.1. Fabricación del prototipo . . . 40
6.2. Configuración del ensayo . . . 41
6.3. Ejecución del ensayo y resultados . . . 43

7. Observaciones y mediciones en terreno **44**
7.1. Metodología de observación y medición . . . 45
7.1.1. Denominación del método de encofrado utilizado . . . 46
7.1.2. Medición de los resaltes . . . 47
7.2. Uso no estructurado de la guía de borde . . . 48
7.3. Resultados de las mediciones . . . 50
7.3.1. Espesores promedio . . . 50
7.3.2. Distribución y relación de los espesores con respecto a la longitud medida 52
7.4. Evaluación del diseño propuesto . . . 60

8. Conclusiones **62**

Bibliografía **66**

A. Anexo: Especificaciones para calcular la presión del hormigón fresco **69**
A.1. ACI Committee 347 . . . 69
A.2. CIRIA Report 108 . . . 70
A.3. DIN 18218 . . . 70

B. Anexo: Cálculo de resistencia **72**
B.1. Resistencia nominal . . . 73
B.1.1. Resistencia a flexión . . . 73
B.1.2. Resistencia al corte . . . 74
B.2. Resistencia requerida . . . 75
B.2.1. Cálculo de solicitaciones . . . 75
B.2.2. Fuerzas internas . . . 75
B.2.3. Resultados . . . 76

C. Anexo: Mediciones de los espesores de los resaltes **78**
C.1. Espesores de los resaltes . . . 78
C.2. Detalle del encofrado instalado . . . 79
C.3. Reparaciones . . . 81

Índice de Tablas

2.1. Modelos más adecuados según tasa de colocación y recomendaciones 8
2.2. Tolerancias para la planeidad y variaciones respecto a ejes y en vanos de un muro de hormigón armado 17

4.1. Resumen situación y recursos para la instalación de encofrado observada en terreno 23
4.2. Cargas admisibles de clavo de fijación Hilti (Fuente: Hilti Inc. (2017)) 27

5.1. Criterios de diseño 31
5.2. Valores iniciales 37
5.3. Cálculo resistencia requerida en función de h_{pa} 38
5.4. Desplazamiento de los nudos 38

6.1. Dimensiones dadas para realizar el ensayo 41

7.1. Registro de las mediciones de los espesores 48
7.2. Promedio de resaltes de muros que no cambiaron de método de encofrado . . . 50
7.3. Promedio de resaltes para los muros que cambiaron de método actual a nuevo . 50
7.4. Evaluación del método de encofrado actual y nuevo 60

B.1. Cálculo resistencia requerida en función de h_{pa} 77

C.1. Mediciones de los espesores de los resaltes 78
C.2. Promedio y desviación estándar de los espesores de los resaltes 79
C.3. Detalle del encofrado instalado 80
C.4. Cubicación reparaciones efectuadas 81

Índice de Figuras

1.1. Variación de la productividad en diferentes industrias con el paso de los años . 1

2.1. Desarrollo de la envolvente de presión lateral 5
2.2. Envolvente típica de presión del hormigón y modelo experimental 6
2.3. Medición de la presión lateral del hormigón con un transductor de membrana deflectora 6
2.4. Encofrado modular de muro 11
2.5. Encofrado de losa 12
2.6. Encofrado para vigas 13
2.7. Encofrado para vigas en la zona de anclaje del refuerzo 13
2.8. Cierres frontales de la marca Peri 14
2.9. Sistemas de anclaje desde una sola cara 15

4.1. Encofrado de viga instalado 22
4.2. Muros desmoldados 23
4.3. Espesor de los resaltes 24
4.4. Diagrama de bloques del proceso constructivo de vigas y losa 24
4.5. Proceso instalación encofrado y enfierradura en vigas 25
4.6. Modelo entrada-salida de la instalación de moldaje de viga 25
4.7. Vista en corte de muro y losa con hormigón fresco 26
4.8. Diagrama de espina de pescado de RHZAV 29

5.1. Soporte diseñado 32
5.2. Estado de cargas 34
5.3. Diagrama de cuerpo libre del soporte 35
5.4. Deformada del soporte 38

6.1. Prototipo del soporte 41
6.2. Diagrama de configuración del ensayo con los instrumentos de medición 42
6.3. Soporte listo para ensayar 42
6.4. Curva fuerza-deformación realizada con las mediciones 43

7.1. Guia de borde 105 de PERI 45
7.2. Planta y elevación de los pisos 4, 5 y 6 46
7.3. Métodos de encofrar utilizados 47
7.4. Método de medición del espesor de los resaltes 48
7.5. Encofrado en superficie A1 49

7.6. Encofrado en A7 y N3 49
7.7. Espesor promedio de resaltes en superficies que no cambiaron el método de encofrar 51
7.8. Espesor promedio de resaltes en superficies que sí cambiaron el método de encofrar 52
7.9. Espesor de resaltes en superficies que se encofraron con método actual versus longitud de muro medida 53
7.10. Superficie A2 en piso 5 54
7.11. Espesor de resaltes en superficies que se encofraron con método nuevo 54
7.12. Espesores promedio de resaltes por superficie que se encofraron con método actual 55
7.13. Espesores promedio de resaltes por superficie que se encofraron con método nuevo 57
7.14. Desviación estándar de los espesores de los resaltes por superficie encofrada con método actual 58
7.15. Desviación estándar de los espesores de los resaltes por superficie encofrada con método nuevo 59

B.1. Sección transversal perfil 72

1 Introducción

Grand View Research (2016) publicó que la demanda en el mercado de la mezcla de hormigón listo fue de 4.093 millones de metros cúbicos (9.746 millones de toneladas) en 2015, y se anticipa a mostrar un gran aumento, principalmente debido a la expansión en infraestructura en países como China e India. Sin embargo, la construcción residencial fue el mayor usuario de hormigón y contabilizó un 35 % del volumen, es decir, 1.228 millones de metros cúbicos (3.411 millones de toneladas).

La importancia del hormigón como material de construcción ha ido aumentando con los años, tanto que la industria del cemento predice un crecimiento estable de un 4,5 % al año, lo cual produciría 5.2 mil millones de toneladas métricas en 2019. (WorldCement, 2016).

En Chile la situación es similar. Cifras de la Cámara Chilena de la Construcción muestran que a fines de 2015 se registró una demanda de 9,09 millones de metros cúbicos de hormigón despachado con una variación de 15.7 % en 12 meses. Por lo que el escenario actual del sector construcción a nivel nacional está marcado por una intensa demanda de mano de obra, lo que se ha traducido en la necesidad de optimizar el uso de este recurso, y la productividad cobra una relevancia en aumento.

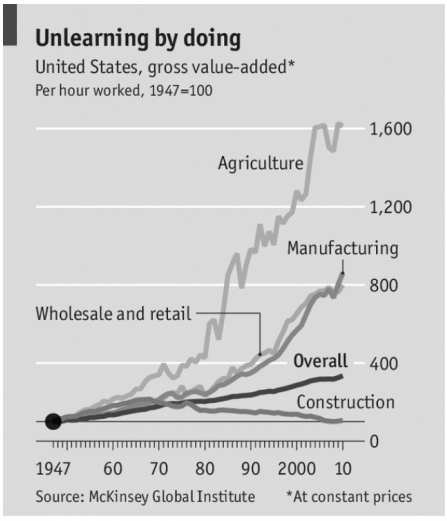


Figura 1.1: Variación de la productividad en diferentes industrias con el paso de los años
(Fuente:The Economist (2017))

Pero si bien la productividad ha cobrado relevancia, no se han mostrado mejoras. En efecto, la industria de la construcción ha ido disminuyendo mundialmente su productividad. Recientemente la revista The Economist

(2017) publicó un reporte que compara la productividad en construcción con otras industrias en Estados Unidos. La Figura 1.1 muestra cómo la construcción tuvo un pequeño aumento de 200 puntos en el valor agregado bruto a mitad de los años 60, y luego fue decreciendo hasta 100, el mismo nivel de 1947. La agricultura en cambio, aumentó su productividad 16 veces, y en manufactura la productividad ha aumentado alrededor de 8 veces.

Se ha demostrado que muchos factores de producción contribuyen a una baja productividad en construcción (Bernold y AbouRizk, 2010). Hay un acuerdo general en que la calidad de los trabajos en curso, materiales utilizados y la calidad de la mano de obra son un factor crítico. Por ejemplo, Nielsen et al. (1990) ya había reportado que los problemas de calidad asociados a defectos en la construcción y no cumplimientos de tolerancias eran de un 15,4 % de los casos estudiados.

La construcción no es la única industria que enfrenta problemas de calidad. La industria automovilística en Japón durante los años 60 estableció nuevos conceptos para mejorar la calidad que han dado la vuelta al mundo. Un ejemplo de ello es Taichii Ohno, quien estableció el concepto de "muda" para denominar a las pérdidas, que se definen como aquella actividad que añade un costo pero no un valor al producto final. Ohno definió siete tipos de pérdidas, y una de ellas corresponde a defectos ocurridos durante el proceso de fabricación que producen una baja calidad del producto o resultado. Otras pérdidas son sobre-producción, exceso de inventario, movimientos innecesarios de los trabajadores, esperas, transporte innecesario de materiales, y procesos ineficientes.

Una respuesta de la industria fue el desarrollo del concepto "Six Sigma". El objetivo de Six Sigma es mejorar en forma proactiva la calidad del resultado de un proceso, identificando y removiendo las causas de los defectos utilizando métodos empíricos y estadísticos.

Para poder mejorar la calidad se necesita primero medir. Entonces, ¿cómo se puede medir calidad en el hormigón?. Existen varios tipos de medidas. Las medidas más comunes incluyen ensayos de resistencia a compresión. Sin embargo, en construcción hay otros problemas relacionados con la calidad. Por ejemplo, la calidad del hormigón cuando ya está fraguado, donde una mala vibración conduce a la aparición de nidos, que son concentraciones de agregado pétreo grueso no rodeadas por suelos finos, y reduce su resistencia. No seguir normas o manuales de colocación del hormigón en columnas produce altas presiones en el encofrado y crea superficies desaplomadas. Mal alineamiento y fijación del encofrado resulta en la aparición de resaltes de

hormigón en la superficie, lo que lleva algunas veces a rehacer el trabajo creando exceso de ruido y polvo.

Se han hecho muchos esfuerzos en el mundo para reducir o eliminar los problemas que producen baja calidad y que llevan a una baja productividad. Los líderes son las empresas. Ellas han avanzado más en este problema que las investigaciones universitarias, ya que se ven directamente afectadas si el encofrado es destruido y no cumple su objetivo. Un ejemplo es la empresa alemana Peri, fabricante de encofrados y andamios que continuamente desarrolla tecnologías para obtener una mejor calidad. Otra empresa importante es Meva, que ha desarrollado varias innovaciones en esta área también.

Esta memoria se enfoca en un problema especial causado por la metodología usada para construir vigas en edificios de hormigón armado. El problema principal ocurre en el anclaje del refuerzo de una viga en un muro, que crea la necesidad de cubrir una pequeña área con encofrado mientras se construye la losa al mismo tiempo. La metodología usada actualmente para encofrar esta área produce una superficie defectuosa al producirse resaltes de hormigón que no cumplen con las tolerancias mínimas de calidad, por lo tanto, se puede denominar como una pérdida.

Por ello, los objetivos de este estudio son: 1) observar y modelar el problema de resaltes en la zona de anclaje que produce una baja calidad superficial, 2) diseñar y ensayar una tecnología que ayude a reducir los resaltes o defectos, y 3) verificar en terreno la efectividad de la tecnología propuesta.

La memoria se divide en 6 capítulos: el primer capítulo muestra estudios recientes sobre la presión que desarrolla el hormigón fresco sobre el encofrado, tecnologías de encofrado usadas en edificios y otras aplicaciones; el segundo define el problema abordado en la memoria, junto con la declaración de las hipótesis de investigación; el tercer capítulo describe el problema mediante modelos basados en observaciones hechas en terreno, e identifica sus potenciales causas; el cuarto muestra el diseño del prototipo, los cálculos de resistencia, una evaluación de éste realizada en base a criterios que definen características que puede cumplir con mayor o menor desempeño; el quinto describe la prueba del prototipo realizada en el laboratorio y muestra los resultados; y finalmente el sexto capítulo resume las mediciones realizadas en terreno, discute los resultados y compara el desempeño de esta nueva alternativa de soporte con la actual.

2 Revisión de la Literatura

En este capítulo se describen y muestran los resultados principales de estudios realizados acerca de la presión del hormigón fresco sobre el encofrado. Se da a conocer también, de forma breve, el estado de la práctica sobre los sistemas de encofrados usados en la construcción de edificios, e investigaciones realizadas sobre otras tecnologías recientes, como es el encofrado colaborante. Finalmente, se aborda el tema de calidad en construcción entregando una definición para la construcción, mostrando referencias a especificaciones sobre estándares establecidos y describiendo un estudio realizado.

2.1. Estudios sobre la presión que ejerce el hormigón sobre el encofrado

Para hormigón vibrado, el proceso más común de llenado de un muro o columna son sucesivas vertidas, las cuales son vibradas para consolidar la mezcla (Santilli y Puente, 2013).

De acuerdo con Arslan et al. (2005), en la práctica normal de construcción, el hormigón es colocado en capas de 1 m de profundidad y compactado usando un vibrador de sonda, el cual es inmerso en una capa de 1 m de altura de hormigón. La Figura 2.1 representa la colocación del hormigón para un muro, y el desarrollo de la presión lateral. En esta figura, el hormigón es colocado a una profundidad de 1, 2 y 3 m, respectivamente. En el caso a), el hormigón está completamente fluidizado y la presión lateral es hidrostática. En el caso b), el efecto del vibrador se extenderá por debajo de éste y los 2 m de profundidad de hormigón estarán fluidizados, resultando presión hidrostática. En el caso c), el hormigón de la parte inferior desarrolla una resistencia al corte significante, se asienta verticalmente bajo carga y desarrolla fricción entre el hormigón y la superficie del encofrado (Gardner, 1985).

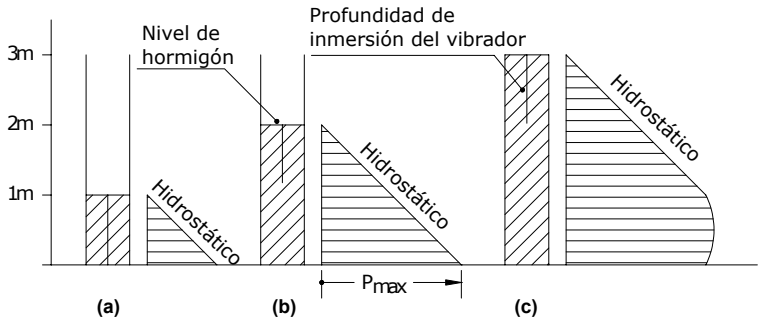


Figura 2.1: Desarrollo de la envolvente de presión lateral
(Fuente: Adaptado de Arslan et al. (2005))

Gardner y Quereshi (1979) comentaron que el uso de vibración para fluidizar el hormigón puede destruir la resistencia al corte y eliminar la fricción en el encofrado. Una vez que el hormigón está completamente fluidizado, se comporta como un fluido porque la presión lateral es igual a la presión hidrostática producida por un fluido con la densidad del hormigón.

Gardner (1985) establece que, cuando la profundidad y tiempo incrementa, el hormigón desarrolla una estructura interna y la presión lateral es menor a la hidrostática. El autor también establece que los factores principales que controlan la magnitud de la presión lateral son: profundidad del hormigón fluidizado y la habilidad de la mezcla de desarrollar resistencia al corte y fricción con la pared. Estos factores dependen de varias variables relacionadas con el hormigón, características del encofrado y método de colocación.

De acuerdo con Santilli y Puente (2013), la envolvente de presión puede ser determinada por medio de un método fenomenológico o empírico. El gran número de variables que afectan la presión lateral producen modelos complejos que son difíciles de usar en la práctica. Por lo tanto, métodos empíricos son actualmente usados.

De acuerdo con Santilli et al. (2010), diferentes diagramas de envolventes han sido establecidos por investigadores. Una forma típica es la mostrada en la Figura 2.2, donde la presión desde la parte superior sigue la distribución hidrostática hasta un valor máximo que sigue constante hasta el fondo.

2.1.1. Métodos para medir de la presión del hormigón fresco

Medir la presión de un material tixotrópico como una mezcla de agregados cuya reología cambia con el tiempo requiere atención especial. Normalmente, se usan transductores que están

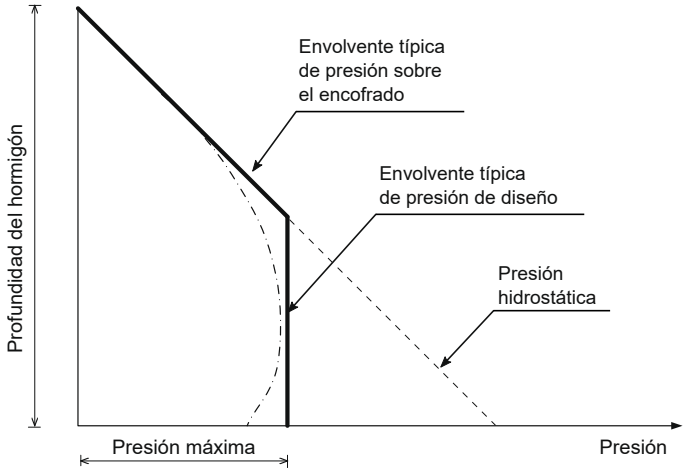


Figura 2.2: Envolvente típica de presión del hormigón y modelo experimental
(Fuente: Adaptado de (Santilli et al., 2010))

basados sobre la calibración de la deflexión de un elemento de detección contra una presión conocida. Sin embargo, si un fluido bajo presión fuese a solidificarse instantáneamente, la deflexión del elemento detector permanecería igual que la que fue inducida en el estado fluido. Está claro que en el estado sólido la presión real en el "fluido" debería aproximarse a cero. La solidificación del hormigón no ocurre en forma instantánea y es un proceso complejo afectado por muchos factores (Talesnick y Katz, 2012).

Gregori et al. (2008) midieron la presión de una columna de hormigón usando un dispositivo de membrana deflectora. Notaron que la presión registrada por el dispositivo se reducía gradualmente a un nivel constante distinto de cero y permanecía así luego de que el hormigón se hubiese endurecido, de forma similar al resultado de la Figura 2.3.

Gardner et al. (2012) describieron mediciones en terreno de la presión del hormigón sobre el encofrado. Ellos sugirieron que la presión del hormigón sería mejor monitoreada usando un dispositivo no deflector.

Billberg et al. (2005) and Arslan et al. (2005) midieron la deformación desarrollada en los anclajes que conectaban un lado del muro del encofrado con el otro. Billberg et al. (2005) reportaron un incremento continuo de la presión lateral con la profundidad del muro a altas tasas de colocación. A bajas tasas de colocación la presión lateral monitoreada al fondo del muro se detuvo aproximadamente 1 hora después de la colocación de la capa de hormigón del fondo. Arslan et al. (2005) reportó que las cargas laterales sobre el encofrado incrementaron

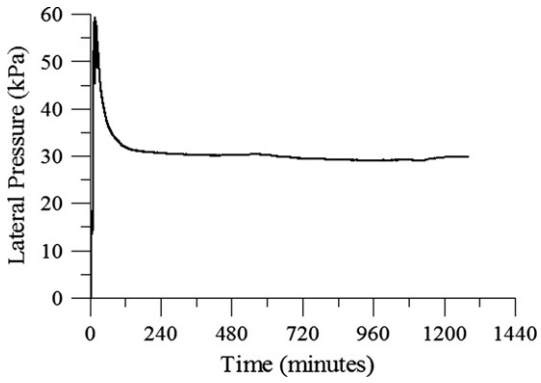


Figura 2.3: Medición de la presión lateral del hormigón con un transductor de membrana deflectora (Fuente: Talesnick y Katz (2012))

gradualmente en el tiempo. Ellos atribuyeron este resultado a la expansión del hormigón y el encofrado.

McCarthy y Silfwerbrand (2011) compararon 3 métodos de medición: i. transductores de presión de membrana deflectora, ii. carga por tracción en los anclajes del encofrado, y iii. deformación en el marco del encofrado. Ellos concluyeron que todos los métodos dan el mismo resultado mientras miden la presión del hormigón fluido.

Talesnick y Katz (2012), realizaron un estudio sobre la medición de la presión ejercida por el hormigón inmediatamente luego de ser colocado y durante el proceso de fraguado. El experimento se llevó a cabo con transductores deflectores y no deflectores. El ensayo de hormigón fresco a través del proceso de endurecimiento ha mostrado que los transductores de presión de membrana deflectora indican una presión lateral residual mucho después que el hormigón se endurece (Figura 2.3). Los transductores de presión no deflectores indicaron una reducción en la presión, llegando a cero cuando el hormigón se endurece.

2.1.2. Modelos y ecuaciones para calcular la presión ejercida por el hormigón fresco

Santilli et al. (2010), analizó varios modelos de la literatura e hizo una comparación con datos experimentales para determinar el modelo más adecuado, según diferentes tasas de colocación del hormigón, y tomando en cuenta seguridad y planificación en la construcción. El autor establece los modelos más adecuados en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1: Modelos más adecuados según tasa de colocación y recomendaciones
(Fuente: Santilli et al. (2010))

Tasa de colocación	Recomendación		
	Segura	Media	Menos conservadora
<3 m/h	CIRIA Report 108	Yu	ACI Committee 347
Entre 3 m/h y 10 m/h	ACI Committee 347	CIRIA Report 108	Yu
Sobre 10 m/h	Rodin, Gardner o Yu		

El autor define tres niveles de recomendaciones acordes con la norma EN 1990. Se refiere a recomendación segura para encofrados con bajo nivel de inspección, planificación y vigilancia. Recomendación media es para encofrados que tendrán un nivel medio de inspección, planificación y vigilancia. Y una recomendación menos conservadora es para encofrados que tienen un nivel alto de inspección, planificación y vigilancia. El autor también concluye que la hipótesis de que la presión ejercida por el hormigón fresco es igual a la presión hidrostática de un líquido con la misma densidad de la mezcla es en general conservadora.

Santilli y Puente (2013), propusieron un modelo experimental para predecir la presión lateral del hormigón para altas tasas de colocación. Para ello, los autores utilizaron datos experimentales encontrados en la literatura. El valor de la presión máxima del hormigón es determinada por la Ecuación 2.1:

$$p_{max} = K\gamma H \tag{2.1}$$

donde p_{max} es la presión lateral máxima $[kPa]$, K es un coeficiente que depende de las siguientes variables que afectan la presión lateral: tasa de colocación del hormigón, asentamiento de cono, altura del elemento de hormigón, temperatura del hormigón, dimensiones mínimas del encofrado y sección transversal del elemento; γ es el peso específico del hormigón $[kN/m^3]$, y H es la altura de la pieza de hormigón. La determinación de los coeficientes fue llevada a cabo a través de la predicción de intervalos de confianza de una nueva observación, considerando una regresión lineal simple. Los resultados mostraron que el modelo propuesto tiene una buena aproximación a los datos experimentales, y son mejores que las obtenidas por modelos preexistentes: CIRIA Report 108, ACI Committee 347 y DIN 18218 (Apéndice A). En particular, para altas tasas de colocación del hormigón el modelo presenta una muy buena aproximación a los datos experimentales.

Zhang et al. (2016) a través de una serie de experimentos midió la presión en diferentes

muestras de hormigón y las comparó con valores calculados según diferentes especificaciones (GB50666-2011, TZ210-2005 ACI Committee 347R-04 y CIRIA Report 108). Con esto estableció que los valores calculados por ACI 347 y CIRIA 108 son conservadores. Además propuso un modelo modificado a la fórmula de la especificación GB50666, mostrado en la Ecuación 2.2, de tal forma que se extendió el rango aplicable de asentamiento del hormigón. Con esto, concluye que el modelo modificado asegura de forma más efectiva la seguridad del encofrado y la precisión de la presión.

$$p = 0{,}28 D_C t_0 \beta R^{\frac{1}{2}} \tag{2.2}$$

donde D_C es el peso específico del hormigón, t_0 indica el tiempo inicial de fraguado, β es un factor de corrección para el asentamiento del hormigón y R es la tasa de colocación.

2.1.3. Estudios recientes sobre los factores que afectan la presión

Zhang et al. (2016) en el mismo estudio mencionado en la sección anterior también estudió los factores con mayor influencia en la presión. Pudo concluir que el método de vibración y la profundidad de vibración tienen un efecto significativo en la presión máxima. A mayor profundidad o repetición de la vibración se incrementa considerablemente la presión lateral, lo cual debería ser evitado. El asentamiento del hormigón y la tasa de colocación también afectan significativamente la presión. El autor propone que los efectos de la temperatura deberían ser estudiados más adelante, porque todavía no son claros, especialmente en los casos donde el proceso de vertido es completado antes de que el tiempo inicial de fraguado comience.

Santilli et al. (2011) realizó una investigación experimental midiendo la presión en muestras de columnas de hormigón para determinar la variación de la presión y la tasa inicial de caída de presión, variando el tamaño del encofrado (área de sección transversal del elemento), la forma (sección circular o cuadrada), la concentración del agregado grueso, la altura de impacto de caída del hormigón y la temperatura. A partir de los datos obtenidos de la presión, y el cálculo de la tasa inicial de caída de presión, realizó un estudio de diseño factorial para determinar la significancia de los parámetros mencionados. Con esto, pudo establecer que para la presión, el parámetro significante fue el tamaño del encofrado, en donde secciones pequeñas muestran una menor presión que las secciones más grandes. Para la tasa inicial de caída de presión, los parámetros

significantes fueron el tamaño y la forma del encofrado, en donde secciones pequeñas muestran una menor tasa inicial que las secciones más grandes, y las secciones circulares presentan una tasa inicial más alta que las secciones cuadradas.

2.1.4. Efecto de los materiales en la presión generada en la superficie del encofrado

Con los años se han estudiado los factores que influencian la presión, y con ello, se han obtenido muchas ecuaciones empíricas, pero no hay en ellas variables que incluyan los materiales. Arslan (2002), estudió cómo las superficies del encofrado afectan la presión del hormigón al proporcionar una superficie drenante y cubierta con revestimiento. Se construyeron 7 encofrados usando diferentes materiales en la superficie. Sobre la superficie de tres encofrados se proporcionó drenaje y se usaron diferentes tipos de revestimiento geotextil. Los otros encofrados se usaron como referencia. La fuerza lateral del hormigón se midió usando extensómetros. Se concluyó que la presión del hormigón disminuyó cerca de un 40 % usando un sistema de drenaje en la superficie del encofrado y cubriendo la superficie con revestimiento.

En otro estudio, Arslan et al. (2005), se enfocó sólo en cambiar los materiales de la superficie del encofrado. Construyó 7 encofrados de muro con distintos materiales en la superficie: madera (populus nigra y pinus silvestris), madera terciada y acero. Se construyeron 2 encofrados iguales del mismo material, en el que uno de ellos fue humedecido con agua, excepto para el acero. La medición de la presión se hizo de igual forma que en el estudio de Arslan (2002). Los valores de presión se compararon con el valor calculado con la fórmula de ACI 347. Se pudo concluir que, humedecer la superficie con agua en los encofrados de madera aumentó la presión del hormigón. La presión obtenida en el encofrado de acero fue igual al valor límite de ACI 347 y mayor que la presión obtenida en los encofrados de madera. Y la presión obtenida en el encofrado de pinus silvestris sin humedecer fue un poco menor en un 3,3 %, 7,2 %, 21 % respectivamente, de las presiones en los encofrados no humedecidos de populus nigra, madera terciada y acero.

2.2. Sistemas de encofrados usados en la construcción de edificios

Jaafari et al. (1989) informó que muchos métodos de encofrados podrían ser usados para construir en edificaciones en altura, como encofrado deslizante, trepante, y convencionales. Se

ha mostrado que, para cajas de ascensores de edificios de menos de 15 pisos de altura, ninguno de los métodos alternativos puede competir con los encofrados convencionales.

De acuerdo con León y García (2013), para edificación habitacional en altura en Chile, a la fecha está ampliamente difundido y consolidado como práctica estándar el uso de encofrado industrializado pesado, que es el que mayor desempeño presenta en este tipo de proyectos.

2.2.1. Encofrado industrializado

El encofrado industrializado corresponde a módulos pre-diseñados y prefabricados de paneles de pequeño y gran tamaño con revestimiento reutilizable y con la estructura de soporte necesaria para soportar las cargas del hormigón, trabajadores, viento y equipos en funcionamiento. Los paneles son fácilmente unidos en tableros o paredes usando conectores alineadores, grapas, alzaprimas, rigidizadores y aplomadores (Bernold, 2013). León y García (2013) establecen que los elementos desarrollados por dicho encofrado son: elementos verticales, como muros y columnas; y horizontales, como losas y vigas.

Encofrado de muro

Los autores establecen que para los muros es común que tengan elementos que permitan unir varios paneles y transportarlos como uno solo, con el apoyo de una grúa (Figura 2.4).

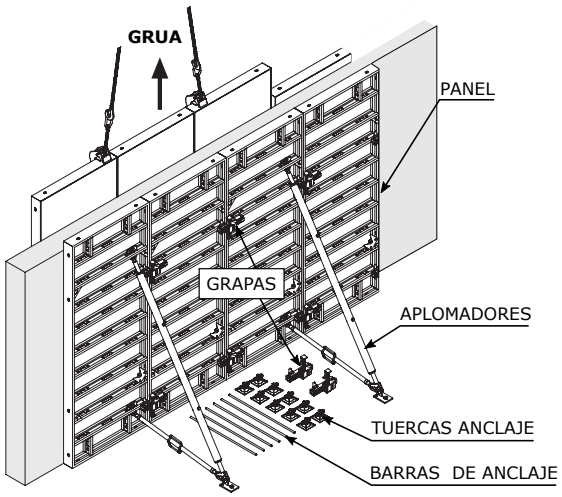


Figura 2.4: Encofrado modular de muro
(Fuente: PERI GmbH (2007a))

Como muestra la Figura 2.4, las grapas conectan los paneles de forma adyacente, las tuercas y barras de anclaje mantienen fijos los paneles de ambas caras del muro para mantener el espesor requerido, y los aplomadores, como su nombre indica, mantienen los paneles en forma vertical.

Encofrado de losa

En el caso de las losas, se trata de placas con recubrimiento fenólico, vigas y puntales telescópicos. Si bien también existe una multitud de marcas y modelos, la estructura general es muy similar sin que existan diferencias negativas a la hora de su uso (León y García, 2013). La Figura 2.5 muestra un encofrado de losa típico, donde los puntales telescópicos soportan las vigas y placas que determinan la superficie de losa a hormigonar.

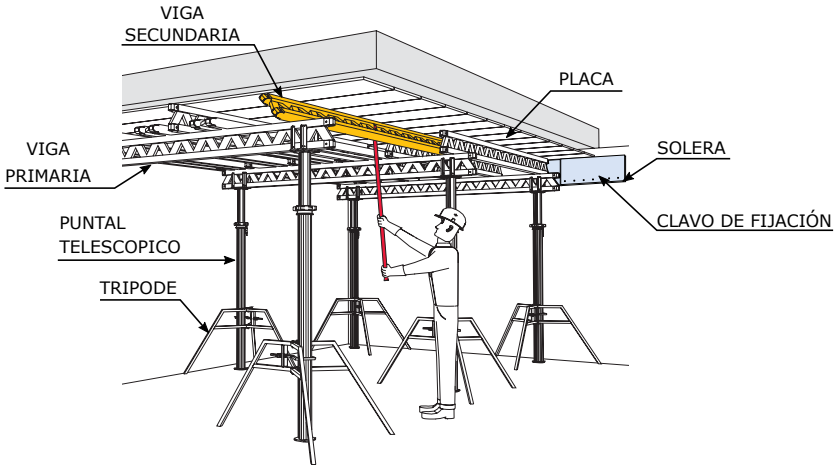


Figura 2.5: Encofrado de losa
(Fuente: PERI GmbH (2007b))

En el perímetro del encofrado de losa, las placas se apoyan sobre listones de madera o placas de madera terciada denominados soleras, fijos al muro con clavos de impacto para hormigón.

Encofrado para vigas

Para encofrar las vigas, se utilizan elementos del encofrado de losa, tales como las vigas y puntales telescópicos y accesorios de fijación como escuadras metálicas (Figura 2.6).

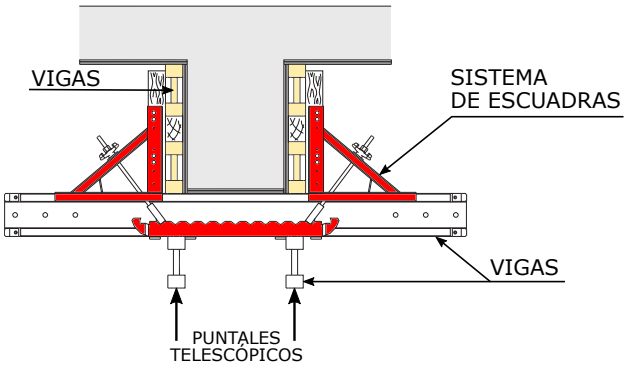


Figura 2.6: Encofrado para vigas
(Fuente: PERI GmbH (2007b))

Los puntales telescópicos soportan la viga por medio de las vigas colocadas en el fondo de la viga.

Para la zona de anclaje de las vigas, cada fabricante propone una solución dependiendo de las características de la situación. La empresa Peri propone colocar soleras y afirmarlas con vigas de encofrado de losa de la misma forma que los laterales de viga mostrados en la Figura 2.6, que van fijas con barras y tuercas de anclaje para muro (Figura 2.7).

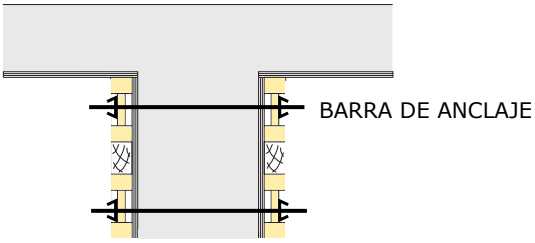


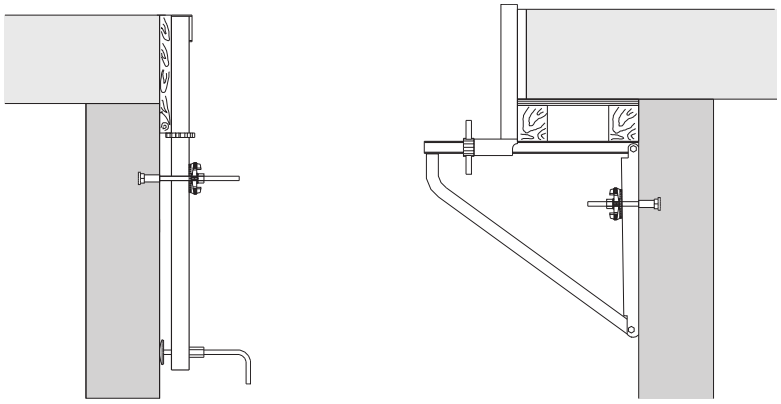
Figura 2.7: Encofrado para vigas en la zona de anclaje del refuerzo
(Fuente: Elaboración propia)

Accesorios

Se muestran a continuación algunos accesorios de los sistemas de encofrados para diferentes situaciones.

1. Cierres frontales

Para los tapes de losa se utilizan guías de borde, y para voladizos, consolas (Figura 7.1).



(a) Guía de borde (b) Consola

Figura 2.8: Cierres frontales de la marca Peri
(Fuente: PERI GmbH (2009))

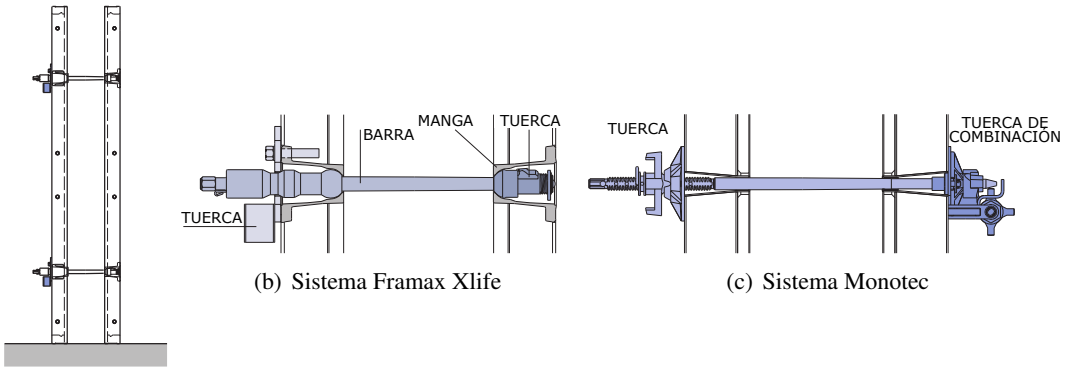
Como muestra la figura, tanto la guía de borde como la consola son soportes para el encofrado en el área de los cierres de losa. Su objetivo es encofrar los cierres de forma fácil y rápida. Ambos accesorios se fijan al muro con barras de anclaje que van insertas en una manga embebida en el muro de hormigón.

2. Sistemas de anclaje para paneles de muros

Existe una gran variedad de elementos de anclaje de los paneles de encofrado. El objetivo de estos elementos es fijar los paneles de cada lado del muro, para mantener su posición y verticalidad, y obtener las dimensiones requeridas.

Como las variables críticas en construcción es calidad, tiempo y costo, se han desarrollado alternativas que aseguran facilidad, rapidez de instalación y mejorar la calidad del resultado. Los anclajes mostrados en la Figura 2.9 corresponden a anclajes que se fijan en un lado del muro, por lo que sólo una persona es necesaria para encofrar.

El anclaje de la figura 2.9(a) y 2.9(b) del encofrado Framax Xlife de Doka se compone de una tuerca que va fija al panel del lado posterior, una barra de anclaje que no necesita tubo protector del hormigón, y una tuerca frontal que se aprieta con una chicharra o llave de trinquete. El sistema de la figura 2.9(c) funciona de la misma manera, pero la tuerca que va fija al muro cambia si el anclaje se ubica en la junta de un panel o en otro punto, y la tuerca frontal se aprieta con martillo.



(a) Vista transversal del sistema

(b) Sistema Framax Xlife

(c) Sistema Monotec

Figura 2.9: Sistemas de anclaje desde una sola cara
(Fuente: Doka GmbH (2017))

2.3. Otra tecnología en encofrados: encofrado colaborante o Stay in Place

Son paneles prefabricados hechos de diferentes materiales desechables que son capaces de soportar el hormigón fresco. Ejemplos de ellos son tubos de plástico, hojas de metal corrugado, o delgado elementos prefabricados. Después de que el hormigón haya fraguado, el encofrado no es removido, colaborando con la estructura (Bernold, 2013).

Chahrour et al. (2005) investigó experimentalmente un encofrado colaborante de polímero extrudido “Royal Building System"para muros de hormigón. Se ensayaron 15 muestras a flexión en cuatro puntos. Los muros fallaron por ruptura del ala en tensión. Ellos reportaron que los muros revestidos de polímero colaborante ensayados a flexión, exhiben una respuesta dúctil que depende de la razón entre el espesor de la muestra y el acero de refuerzo. Tanto el espesor incrementó desde 100 mm a 150 mm, la resistencia incrementó en un 10 %. Para el mismo espesor de muro (150 mm), la resistencia de la muestra armada fue un 57 % más que la resistencia de una muestra no armada.

Rteil et al. (2008) ensayó 8 muros revestidos en encofrado colaborante de PVC monotónicamente a flexión en 4 puntos. Los resultados de las pruebas mostraron que el sistema de encofrado permanente aumentó la carga en el punto de agrietamiento, fluencia y carga última en un 36 %, 78 % y 36 % en promedio respectivamente, comparada con las muestras de control. Adicionalmente, el índice de ductilidad para las muestras revestidas en encofrado colaborante de

PVC incrementó en un 25 %. El tipo de conectores no tuvo efecto sobre el comportamiento de las muestras con encofrado permanente de PVC.

Wahab y Soudki (2013) investigaron el comportamiento a flexión de especímenes de muros de hormigón revestidos con encofrado colaborante de PVC. Treinta muestras fueron ensayadas a flexión en cuatro puntos. Los resultados experimentales mostraron que el sistema de encofrado colaborante de PVC mejoró el comportamiento a flexión de un muro de hormigón armado. Para un refuerzo dado, las muestras revestidas en PVC se agrietaron y fallaron del mismo modo, independientemente del tipo de conector o del espesor del muro. El aumento en la carga para muros encofrados en PVC exhibieron un punto de fluencia mayor y una carga última mayor en comparación a los muros de control. El incremento en carga para los muros encofrados con PVC disminuyó con altas cuantías de refuerzo. La contribución del sistema colaborante de PVC a la carga última aumentó cuando el espesor del muro disminuyó y/o la cuantía disminuyó.

2.4. Calidad resultante con el uso de encofrados

Hoy en día la construcción de edificios de gran altura es un proceso altamente optimizado involucrando muchas disciplinas y participantes. Sin embargo, la percepción de calidad dentro de estas diferentes disciplinas es aún muy distinta. Por ejemplo, coincidir con las tolerancias requeridas para los muros de la caja de los ascensores es una tarea desafiante durante la obra gruesa (Schweitzer et al., 2012).

En términos generales, el control de calidad incluye mediciones para satisfacer la calidad requerida. Esto es necesario para prevenir errores, no encontrarlos (Sehlz, 2010).

La Corporación de Desarrollo Tecnológico (CDT), define como tolerancia a aquella diferencia que se consiente en la calidad o cantidad de las cosas u obras contratadas o la que se admite entre el valor nominal y real en las características físicas de un producto.

La definición anterior genera dos puntos de vista para la comprensión del tema, una relacionada a la calidad y la otra al objetivo relacionado con mediciones efectivas.

Hay normativas que fijan determinados valores como requisitos para las obras de construcción y respecto de los cuales se puede lograr, objetivamente, un consenso de aceptación de diferencias. Los valores medidos pueden haber sido verificados por terceras personas, independientes del ejecutor y del usuario final, con el fin de dar más confianza a los clientes.

La especificación hecha por ACI Committee 117 (2014) establece que las tolerancias son un medio para establecer una variación permisible en dimensión y ubicación, dando al diseñador y al contratista límites dentro de los cuales el trabajo puede ser realizado. Las tolerancias son el medio por el cual el diseñador comunica al contratista las expectativas de realización sobre la cual el diseño está basado o requiere. Las tolerancias dadas en esta especificación son tolerancias estándares o usuales que aplican a varios tipos y usos del hormigón en construcción. Están basadas en necesidades normales y técnicas, y prácticas comunes en construcción. Tolerancias especificadas que difieren con los valores estándar pueden causar aumento o disminución de los costos de construcción.

La CDT propuso también un manual de tolerancias para la industria nacional que detalla valores de tolerancias que se deriven de las mejores prácticas utilizadas en el mercado, para dar la conformidad a diferentes procesos y productos. Para muros de hormigón armado según clasificación, las tolerancias para las terminaciones se muestran en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2: Tolerancias para la planeidad y variaciones respecto a ejes y en vanos de un muro de hormigón armado
(Fuente:Corporación de Desarrollo Tecnológico (2013))

Altura	Planeidad $h \leq 1{,}5\,m$	Planeidad $h \leq 3\,m$	Planeidad $3 < h \leq 6\,m$	Planeidad $h < 6\,m$	Resaltes Puntuales y Lineales	Variaciones respecto a ejes	Variaciones en vanos
Grado	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
G1	± 4	± 6	± 10	± 25	3	± 5	± 5
G2	± 5	± 7	± 12	± 30	5	± 6	± 5
G3	± 7	± 12	± 18	± 30	5	± 10	± 5
G4	± 8	± 15	± 20	± 30	8	± 15	± 10

donde

- G1 = Hormigones arquitectónicos a la vista. Para elementos de hormigón, cuya terminación superficial quedará expuesta en el elemento en servicio, sin tratamiento posterior que altere su forma.
- G2 = Hormigones que serán empastados, pintados o maquillados.
- G3 = Hormigones que quedarán expuestos a la vista pero en los cuales su apariencia no es tan importante como en el Grado 1.
- G4 = Hormigón para obras gruesas. En donde las superficies de los elementos de hormigón recibirán estucos u otra terminación distinta al Grado 2.

Schweitzer et al. (2012) hizo una simulación usando el método Monte Carlo, de un modelo de calidad que integra procesos geodésicos en el proceso constructivo de edificios, durante la instalación de encofrado trepante. Incluyó parámetros de procesos geodésicos en los parámetros

de entrada para determinar el impacto sobre la calidad. Si la evaluación de los parámetros excede umbrales predefinidos, caminos alternativos previamente planificados deben escogerse. El autor recomienda hacer investigaciones adicionales considerando una integración más fuerte de los parámetros de calidad en los procesos constructivos que sean planificados.

3 Definición del problema y planteamiento de las hipótesis

3.1. Definición del problema

De las investigaciones mencionadas en el Capítulo 2, se puede inferir que:

1. El objetivo del encofrado es crear elementos de hormigón que tengan dimensiones y terminaciones dentro de tolerancias establecidas. Es por ello, que el encofrado debe ser diseñado para soportar todas las cargas verticales y laterales que sean aplicadas, hasta que puedan ser soportadas por el hormigón cuando haya endurecido.

2. La magnitud de la máxima presión ejercida por el hormigón es la variable de diseño de los encofrados. Una sobreestimación aumenta los costos de construcción, mientras que una subestimación provoca que el encofrado no tenga suficiente resistencia, por consiguiente, afectando la seguridad.

Observaciones hechas en terreno mostraron que el objetivo del encofrado no siempre se cumple. Se enfocó la atención en las terminaciones de las superficies de los muros, donde resaltes de hormigón en las juntas de hormigonado de la zona de anclaje de vigas, abreviado RHZAV desde aquí en adelante (Resaltes de Hormigón en la Zona de Anclaje de Vigas), tienen dimensiones que superan las tolerancias. Esto provoca que las superficies deban ser reparadas, retrasando la partida siguiente, produciendo ruido y exceso de polvo. Por lo que se define como una pérdida, al ser un defecto que debe ser reparado.

Los encofrados son cada vez más sofisticados entregando diferentes tipos de soluciones constructivas, pero en esta situación al parecer no se ha encontrado una solución. Es por ello,

que esta memoria estudia del problema de RHZAV, determinando las principales causas, para luego diseñar y probar una nueva alternativa de uso de encofrado para disminuir las pérdidas producidas.

Un segundo problema que debe ser abordado es cómo poder evaluar una nueva solución alternativa en terreno, donde hay una extrema preocupación por la seguridad. Esfuerzos adicionales serán necesarios para trabajar con un contratista y realizar una prueba segura.

3.2. Hipótesis

Las hipótesis planteadas para esta investigación son las siguientes:

1. Una solución al problema de RHZAV estructuralmente sólida y operativa puede ser diseñada.
2. Pruebas de laboratorio probarán que la solución de la hipótesis 1 proporcionará suficiente resistencia de soporte.
3. Pruebas de terreno mostrarán que la solución para la hipótesis 1 creará resaltes de hormigón que se encuentran dentro de las tolerancias aceptadas.

4 Estudio y modelación del problema

La comprensión del problema de RHZAV requiere conocer las etapas y ejecución del proceso constructivo, y el funcionamiento e instalación de los sistemas de encofrado. Para ello, observaciones en terreno fueron realizadas en edificios con el problema presente. Luego se modeló la situación física y el proceso constructivo, identificando recursos y resultados. Y finalmente se identificaron las causas del problema.

4.1. Observaciones en terreno

Se observaron 2 edificios habitacionales ubicados en Viña del Mar. Las observaciones se enfocaron a vigas y muros de la torre del edificio.

Las observaciones se realizaron durante y después del proceso de colocación de encofrado de vigas y losa, y después del descimbrado.

Durante la instalación del encofrado

La Figura 4.1 muestra el encofrado colocado en la zona de anclaje de viga. Consiste en placas de madera terciada, fijas al muro con clavos para hormigón en su parte inferior. Estas placas cumplen el rol de las soleras también, apoyando las placas del encofrado de losa.



(a) viga y zona de anclaje (b) zona de anclaje

Figura 4.1: Encofrado de viga instalado
(Fuente: Elaboración propia)

Las placas utilizadas eran de dos tipos, terciado con recubrimiento fenólico que se utiliza en el encofrado de losa, y terciado estructural o sin recubrimiento, con un espesor de entre 18 y 22 mm. Las placas provenían principalmente de las sobras de las placas de encofrado de losa, y se dimensionaban para crear el encofrado del anclaje. Por lo que las medidas eran variables entre unas y otras. Estas placas se volvían a utilizar para la zona de los anclajes en los pisos superiores.

Se utilizaron clavos de impacto para muros de hormigón seco y de peso normal, y estaban colocados a una separación variable entre 10 y 30 cm.

La instalación del encofrado era realizada por un carpintero de encofrado después de que se desmoldaran los muros, aproximadamente al día siguiente de hormigonar.

La altura de las vigas a hormigonar en el primer edificio observado era 40 cm y en el segundo edificio 50 cm.

En la Tabla 4.1 se resumen las observaciones realizadas durante la instalación de encofrado en la zona de anclaje de vigas:

Tabla 4.1: Resumen situación y recursos para la instalación de encofrado observada en terreno

	Recurso	Característica
Trabajo en avance	Muro de hormigón	desmoldado al día siguiente de hormigonar
Trabajo a realizar	Viga a hormigonar	40-50 cm de altura
Material para encofrar	Plancha terciado estructural	18-22 mm espesor, usada desde pisos inferiores
	Placa terciada fenólica	18-22 mm espesor, usada desde pisos inferiores
	Clavos de impacto	colocados entre 10-30 cm de separación
Mano de obra	Carpintero encofrado	Un carpintero asignado para la instalación

Después del descimbrado o desmolde

Las figuras 4.2(a) y 4.2(b) muestran dos vigas descimbradas que corresponden a muros de pisos consecutivos, y donde se observa de forma clara los resaltes en la zona de anclaje. La longitud del anclaje era aproximadamente de 1.2 m.



(a) zona de anclaje en el muro (b) resalte observado en el anclaje

Figura 4.2: Muros desmoldados
(Fuente: Elaboración propia)

En las figuras 4.3(a) y 4.3(b) se observa con mayor detalle las dimensiones de los resaltes. En la figura 4.3(a) se observan diferentes espesores dentro de la misma zona, debido a que habían 2 placas de terciado. La figura 4.3(b) muestra el espesor de uno de ellos, que es alrededor de los 8 mm.



(a) resalte de espesor variable (b) resalte de 8 mm de espesor

Figura 4.3: Espesor de los resaltes
(Fuente: Elaboración propia)

4.2. Modelación del problema

Después de hacer las observaciones en terreno, se hizo un modelo del proceso constructivo identificando las actividades que lo componen.

4.2.1. Proceso constructivo de vigas

La Figura 4.4 muestra un diagrama de bloques de las actividades que componen el proceso de construcción. Las vigas y la losa se hormigonan al mismo tiempo, por lo que ambas partidas se realizan en paralelo.

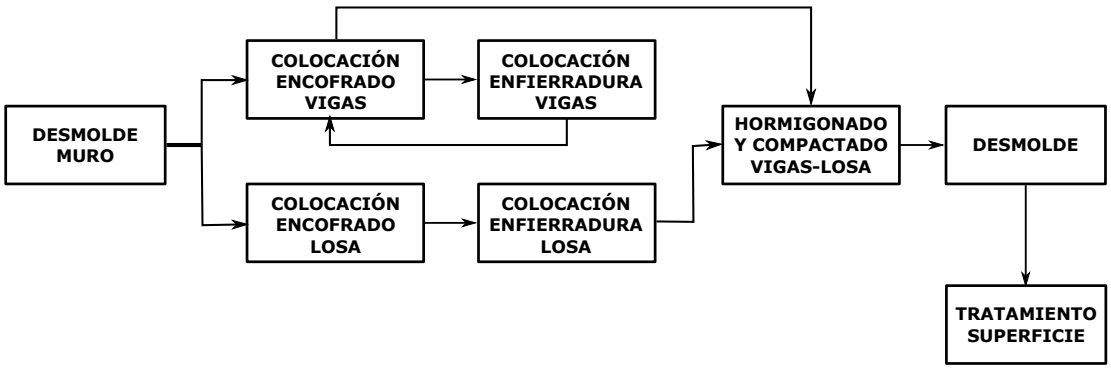


Figura 4.4: Diagrama de bloques del proceso constructivo de vigas y losa
(Fuente: Elaboración propia)

La Figura 4.4, muestra que una vez que los muros ya se han descimbrado se comienza con la instalación del encofrado. Se coloca el fondo de la viga, para luego colocar la enfierradura

y terminar de encofrar los costados. Una vez que se ha terminado de colocar el encofrado de losa, se hormigona todo el conjunto. Después del tiempo de fraguado, se desmolda y se efectúa tratamiento de superficie según los requerimientos de terminación y la calidad de la superficie.

La Figura 4.5 muestra con mayor detalle el proceso de colocación de encofrado en las vigas:

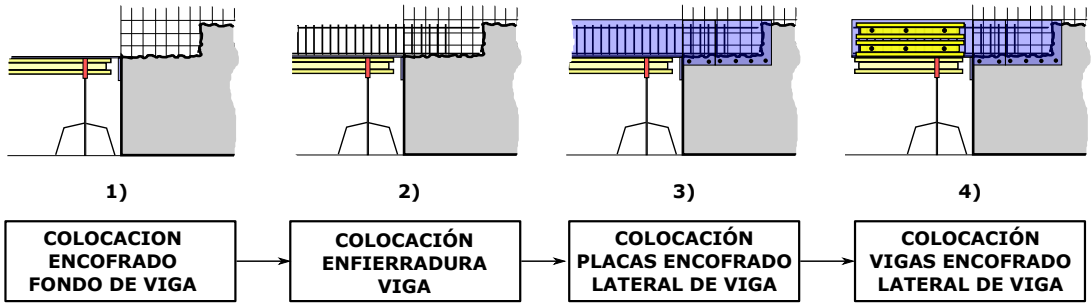


Figura 4.5: Proceso instalación encofrado y enfierradura en vigas
(Fuente: Elaboración propia)

Como se mencionó en la Sección 4.1, tanto para la viga como para su anclaje, se utiliza placa de madera terciada como encofrado, y para la zona de anclaje la placa se fija al muro con clavo de impacto.

En la Figura 4.6 se resume el modelo del proceso de construcción de vigas, incluyendo recursos y resultados.

RECURSOS	PROCESO	RESULTADOS	
		Agrega valor	No agrega valor
- Muro desmoldado ***- Encofrado para vigas y losas*** ***- Placas madera terciada*** ***- Clavos de impacto, clavos, separadores*** ***- Herramientas de corte*** **- Mano de obra encofrado**	**COLOCACIÓN ENCOFRADO VIGAS**	***- Vigas encofradas***	***- Excedentes de materiales*** ***- materiales dañados***
- Encofrado de fondo de viga instalado ***- Fierro*** ***- Alambre*** **- Mano de Obra Enfierradura**	**ENFIERRADURA VIGAS**	***- Viga lista para terminar de encofrar***	***- Excedentes de materiales***
- Vigas y losa encofradas ***- Hormigón*** ***- Bomba, vibrador*** **- Mano de obra colocación hormigón**	**HORMIGONADO Y COMPACTACIÓN**	***- Vigas y losa hormigonadas***	***- Hormigón excedente en encofrado***
- Vigas y losa hormigonadas ***- Herramientas*** **- Mano de obra encofrado**	**DESMOLDE**	***- Muro, vigas y losa terminadas***	***- Resaltes de hormigón en muros***

Figura 4.6: Modelo entrada-salida de la instalación de moldaje de viga
(Fuente: Elaboración propia)

Como aparece en la Figura 4.6, los recursos se clasificaron según las categorías de materiales,

equipos, mano de obra y resultado de la actividad anterior. Un ejemplo de este último recurso es "encofrado de fondo de viga instalado", ya que para colocar la enfierradura debe estar instalado.

Los resultados se dividen en 2 tipos: los que agregan y los que no agregan valor al producto final. Los resultados que agregan valor corresponden a lo que se espera obtener una vez finalizada la actividad, y que pasa a ser el recurso inicial de la etapa siguiente. Los resultados que no agregan valor corresponden a todas las pérdidas, es decir, excedentes, elementos dañados, defectos, etc.

La Figura 4.6 muestra que los resaltes se ubican dentro de los resultados que no añaden valor, ya que es un defecto y se debe reparar. De acuerdo con Bernold y AbouRizk (2010), corresponde a la pérdida de tipo 7 de Taiichi Ohno, que incluye a todos los defectos, daños, etc. en donde los objetivos de calidad se han perdido, y el mal funcionamiento de los equipos resultan en tener que rehacer o arreglar el trabajo ya hecho, generando desechos, y atrasando el proceso completo.

4.2.2. Modelo de fuerzas que actúan sobre el encofrado

Una vez conocido el proceso constructivo de las vigas, se puede modelar el problema. La Figura 4.7 muestra las fuerzas que actúan sobre el encofrado en la zona de anclaje con el hormigón fresco, justo después de hormigonar vigas y losa.

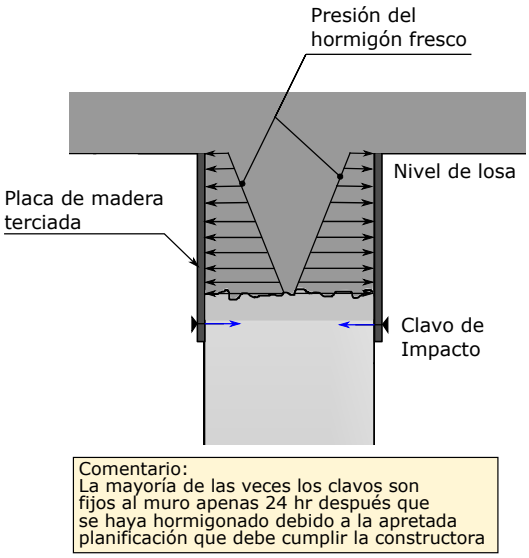


Figura 4.7: Vista en corte de muro y losa con hormigón fresco
(Fuente: Elaboración propia)

De acuerdo al Capítulo 2, la envolvente de la presión se asume como presión hidrostática al

ser el hormigón vertido en una sola capa, la que debe ser resistida por los clavos fijos al muro de hormigón. Por otra parte, la presión del hormigón fresco depende de varios factores, tales como tasa de colocación, temperatura y peso del hormigón, dimensiones del encofrado y tiempo de fraguado.

En la situación de la Figura 4.7, si se supone una viga de 50 cm de altura, una losa de 15 cm de espesor, la zona del anclaje está encofrada con placas de 22 mm de espesor, con clavos de impacto colocados cada 15 cm, y no se conoce la temperatura ni tasa de colocación del hormigón, la presión se asume hidrostática, y los valores en el fondo de viga y al nivel inferior de la losa son:

$$p = \gamma \cdot h \tag{4.1}$$

$$p_{fondo} = 1134\,[kgf/m^2] \tag{4.2}$$

$$p_{losa} = 340\,[kgf/m^2] \tag{4.3}$$

La fuerza en tensión que cada clavo debe soportar es:

$$F = \frac{1}{2}\,(p_1 + p_0) \cdot 0{,}15 \cdot 0{,}35 \tag{4.4}$$

$$= 38{,}7\,[kgf] \tag{4.5}$$

El valor admisible de carga en tensión para un clavo de fijación en hormigón de peso normal, con una resistencia a compresión de 4000 psi (H30) es de 0,4 N o 40 kgf (Tabla 4.2), por lo que para la configuración mencionada anteriormente, los clavos son solicitados cerca de su carga máxima permitida.

Tabla 4.2: Cargas admisibles de clavo de fijación Hilti (Fuente: Hilti Inc. (2017))

Tipo clavo	Diámetro del vástago [mm]	Profundidad de incrustación [mm]	Tensión admisible [kN]	Separación mín [cm]
X-U	4	19	0,4	10

4.2.3. Relaciones causa-efecto del problema

Una vez conocido el proceso constructivo y el modelo de fuerzas, se pueden comprender de mejor manera los factores que influyen en la creación de los resaltes.

Para el proceso constructivo la atención se enfoca en las etapas de instalación del encofrado y compactación.

En la instalación del encofrado, como se señala en la Tabla 4.1, el estado de las placas influye en la regularidad y planeidad de la superficie resultante. La separación de la colocación de los clavos influye en la magnitud de la fuerza que recibe de la presión del hormigón. Por otra parte, la resistencia que tiene el hormigón del muro cuando es desmoldado influye en la adherencia del clavo de impacto.

Durante la compactación, la ubicación del vibrador más allá de su diámetro de acción puede aumentar la magnitud de la presión sobre el encofrado.

Además de las observaciones en terreno, se realizó una entrevista a 2 expertos en encofrados de la empresa Peri Chile, quienes determinaron factores potenciales para la creación de resaltes. Estos factores son:

1. No implementación de la solución indicada por el fabricante de encofrados (Figura 2.2.1)
2. Falta de experiencia en vibración
3. Mal estado de los materiales utilizados

Estos factores a su vez son efecto de otras causas. Estas causas se determinaron gracias a entrevistas con expertos del área de la construcción, y serán explicadas a continuación.

El diagrama de espina de pescado que muestra las posibles causas de RHZAV se muestra en la Figura 4.8:

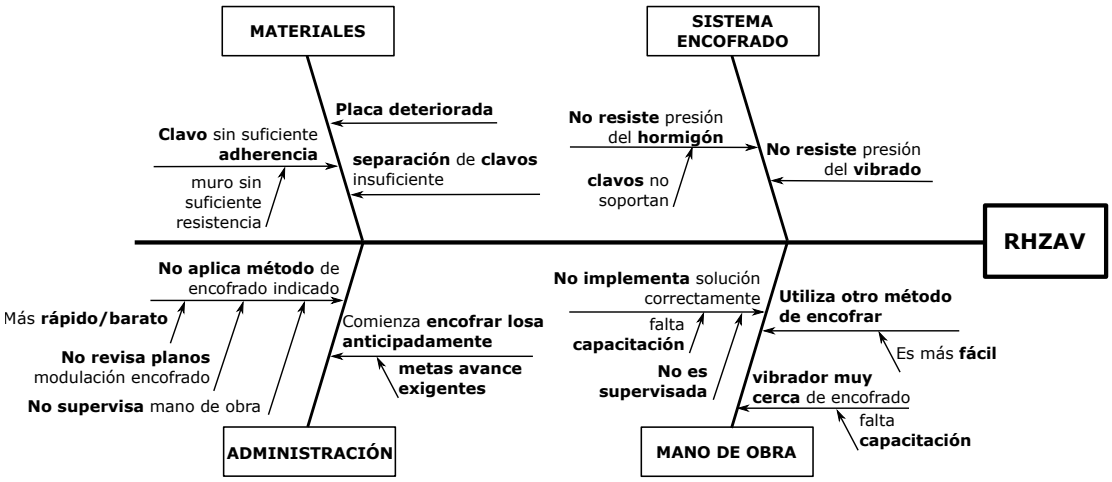


Figura 4.8: Diagrama de espina de pescado de RHZAV
(Fuente: Elaboración propia)

Como se muestra en la Figura 4.8, las causas se han agrupado en 4 categorías: materiales, sistema de encofrado, administración de la construcción y mano de obra.

El sistema de encofrado tiene como causas primarias no poder resistir la presión del hormigón, y no resistir la presión adicional que produce el vibrado. Como causa secundaria a la insuficiente resistencia de la presión del hormigón es que el soporte de los clavos sea insuficiente, como se explica en el párrafo siguiente.

La categoría de materiales se enfoca en el estado y calidad de la placa de madera terciada utilizada, y la separación y adherencia de los clavos al hormigón. La placa al ser reutilizada se va deteriorando afectando la planeidad y regularidad de su superficie. La separación con que son colocados los clavos dependen de la capacitación y supervisión de la mano de obra. La adherencia de los clavos al hormigón depende de la resistencia que el muro va adquiriendo con el tiempo. Estas dos últimas causas están relacionadas con la parte administrativa de la obra.

La administración de la obra puede no implementar la solución entregada por el fabricante de encofrado debido a que esta solución puede ser de mayor costo que el método actual y requiera mayor tiempo de implementación, o también por no revisar los planos de modulación del encofrado, o no supervisar el método que implementan las cuadrillas de encofrado. Por la misma razón del tiempo, donde la construcción de la obra está planificada con exigentes metas de avance, es que las partidas de encofrado de losa comiencen inmediatamente después de desmoldar los muros, no teniendo una resistencia suficiente para dar la adherencia necesaria a

los clavos de impacto.

Dentro de la categoría de mano de obra, las cuadrillas de encofrado no implementan la solución porque no están capacitadas para instalar correctamente los sistemas de encofrado al no conocer el funcionamiento de las partes y piezas entregadas en terreno, no seguir las indicaciones del supervisor del fabricante de encofrado. Además, realizar un vibrado inadecuado también es posible debido a falta de capacitación.

Al observar las causas, varias de ellas pueden ser a primera vista fáciles de eliminar, como por ejemplo, colocar los clavos a una distancia suficiente, o implementar la solución entregada por el fabricante de encofrados. Pero a pesar de que la adminstración conoce estas causas, sigue implementando el mismo método y no hay mejoras. Por lo que es necesario diseñar una solución que sea independiente y no se vea afectada por las condiciones observadas en terreno. Por esta razón, se escoge eliminar la causa perteneciente al sistema de encofrado, diseñado un nuevo soporte para el área del anclaje. Por otra parte, el objetivo de esta memoria es crear nuevo conocimiento, entonces se necesita diseñar una nueva solución creativa, no sólo hacer mejoras a un sistema ya existente.

5 Diseño de una solución

Como se mencionó anteriormente en el Capítulo 4, se diseñará una alternativa de soporte suficiente para la presión del hormigón fresco. Esta solución debe, además, ser operativa o implementable en terreno, como se estabeció en la hipótesis no 1. Es por ello, que el proceso de diseño debe comenzar con definir qué requisitos debe satisfacer la nueva alternativa, y a partir de ellos, realizar el diseño con sus cálculos correspondientes.

Este capítulo comienza con la definición de dichos criterios, y a partir de ellos se propuso una alternativa de soporte de la cual se calculó su resistencia y valores límites operacionales.

5.1. Criterios de diseño

Los criterios de diseño se determinaron en base a los objetivos que debe cumplir la nueva alternativa de soporte. Éstos se resumen en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1: Criterios de diseño

Criterio	Peso (P)
Espesores de los resaltes de hormigón	30
Facilidad de instalación y ajuste	25
Costo de fabricación	20
Vida Útil	10
Mantenimiento requerido	10
Facilidad de desinstalar	5
TOTAL	**100**

Los valores mostrados para el peso de cada criterio se propusieron de acuerdo a los objetivos de esta memoria. Los 3 criterios con mayor importancia son: a) los espesores de los resaltes, para mejorar la calidad y disminuir las pérdidas, con un peso de 30 %; b) facilidad de instalación

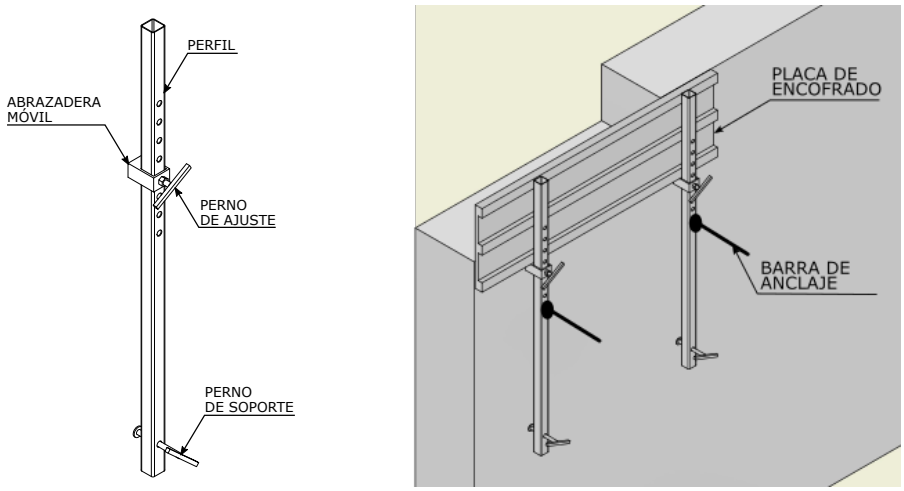
y ajuste, para que pueda ser implementado, con un 25 %; y c) por la misma razón del criterio anterior, el costo de fabricación con un 20 %.

La alternativa diseñada se evalúa entonces definiendo cuánto cumple con cada criterio, utilizando la escala Likert, donde

1 = Muy deficiente 2 = Deficiente 3 = Regular 4 = Bueno 5 = Muy bueno

5.2. Propuesta de diseño

Basándose en accesorios para sistemas de encofrado de diferentes fabricantes, se propuso el siguiente soporte, mostrado en la Figura 5.1:



(a) componentes del soporte (b) soporte instalado

Figura 5.1: Soporte diseñado
(Fuente: Elaboración propia)

El soporte consiste en un perfil de acero A37-24ES de 1,2 m de largo, de sección cuadrada de 40 mm y 2 mm de espesor (Figura 5.1(a)). Tiene una abrazadera que se mueve a lo largo del perfil y se fija con un perno, denominado perno de ajuste. Esta abrazadera actúa como soporte vertical de la placa de encofrado (Figura 5.1(b)). La parte inferior del perfil es atravesada con otro perno, denominado perno de soporte, que actúa como apoyo del soporte en el muro, y lo permite alinear verticalmente.

El soporte se instala al muro de forma vertical, atravesando una barra de anclaje de encofrado

por los agujeros del soporte y por los agujeros en el muro que quedan debido a la instalación de los paneles de encofrado, y se fija con una tuerca de anclaje (Figura 5.1(b)).

5.3. Resistencia de diseño

La resistencia de diseño se determinó utilizando la ecuación de diseño, dada por la Ecuación 5.1:

$$\phi R_n \geq R_u \tag{5.1}$$

donde

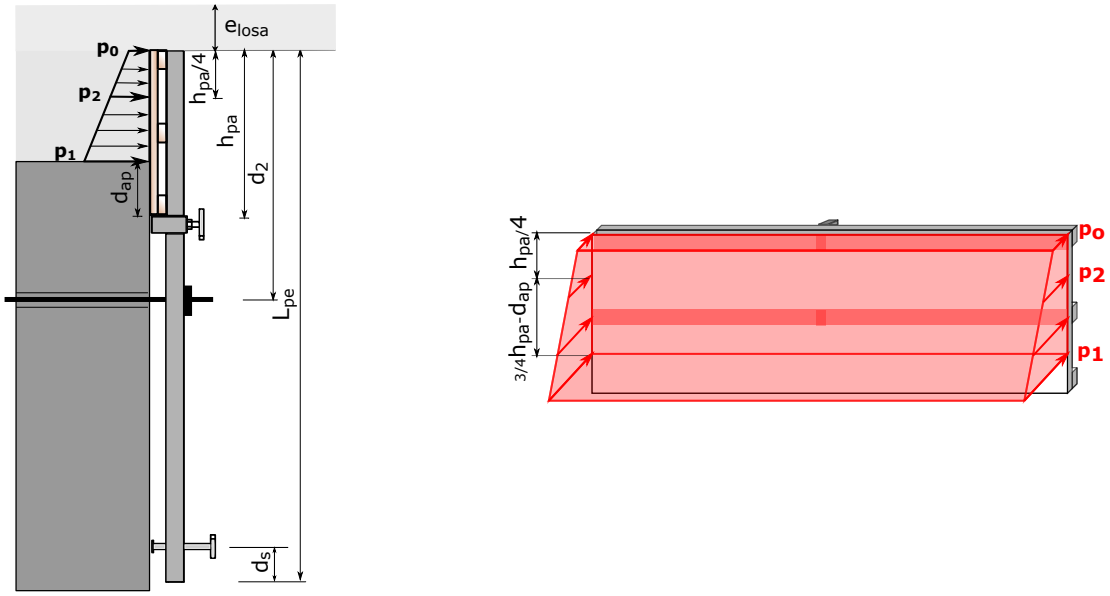
ϕ = factor de reducción de resistencia
R_n = resistencia nominal
R_u = resistencia requerida

para la cual se determinaron expresiones para las fuerzas internas y se calculó la resistencia nominal. Luego la resistencia nominal se igualó con la expresión de fuerza interna máxima, para determinar las condiciones límites del diseño.

No se aplicó factor de mayoración de cargas para la resistencia requerida, porque se asumió que una distribución hidrostática para la presión de hormigón fresco es un enfoque conservador.

5.3.1. Estado de cargas

Se modeló la situación en el área de anclaje de la viga una vez que se ha hormigonado, mostrando la presión que ejerce el hormigón fresco sobre las placas de encofrado. La Figura 5.2(a) muestra una vista en corte de la sección transversal de la viga en la zona de anclaje. La presión del hormigón fresco se modeló como presión hidrostática variando linealmente con la profundidad. Se asumió que el peso de la losa es resistido completamente por los puntales telescópicos del encofrado de losa. Entonces el soporte es solicitado sólo por la presión del hormigón. La Figura 5.2(b) muestra la distribución de la presión del hormigón aplicada sobre la placa de encofrado.



(a) modelo de la situación después de hormigonar

(b) presión aplicada sobre la placa de encofrado

Figura 5.2: Estado de cargas
(Fuente: Elaboración propia)

donde

h_{pa}	=	altura de la placa de encofrado
e_{losa}	=	espesor de la losa
L_{pe}	=	largo del soporte
d_s	=	distancia desde el extremo inferior del soporte hasta el perno de apoyo
d_{ap}	=	longitud de apoyo de la placa de encofrado sobre el muro
d_2	=	distancia desde el extremo superior del soporte hacia la abrazadera móvil
L_{pa}	=	largo de la placa de encofrado
p_0	=	presión en el extremo superior del soporte
p_2	=	presión en la mitad de la placa de encofrado
p_1	=	presión en el fondo de la viga
F_0	=	fuerza aplicada al soporte transmitida por el soporte horizontal superior del panel
F_2	=	fuerza aplicada al soporte transmitida por el soporte horizontal intermedio del panel

Se hizo el diagrama de cuerpo libre del soporte, modelándolo como una viga con 2 apoyos, y la presión se modeló como 2 cargas puntuales transmitidas al dispositivo por los soportes horizontales del panel, denominadas F_0 y F_2, como aparece en la Figura 5.3. Las fuerzas F_0 y F_2 se calcularon mediante área tributaria de la distribución de la presión. La fuerza F_0 se colocó

en el extremo superior de la barra y no en el centroide del área tributaria porque se consideró que la distancia era despreciable para el análisis.

Se asumió que el soporte se instaló en la mitad de la placa de encofrado, porque se tomó en cuenta el diseño del ensayo de laboratorio, y era la mejor configuración con los elementos de medición disponibles para disminuir la variabilidad de los resultados.

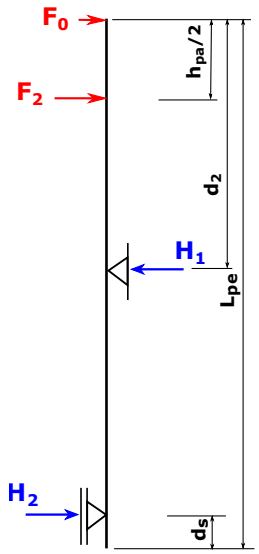


Figura 5.3: Diagrama de cuerpo libre del soporte
(Fuente: Elaboración propia)

5.3.2. Resistencia nominal

La resistencia nominal se calculó de acuerdo a la norma AISC Committee (2010) en flexión y corte, considerando sólo el perfil de sección cuadrada.

Resistencia a flexión

Se verificó para los estados límites de fluencia y pandeo local.

- Fluencia (Ec. F7-1)

$$M_n = M_p = F_y \cdot Z \tag{5.2}$$

$$= 97{,}44 \quad [kgf \cdot m] \tag{5.3}$$

donde

M_n = momento nominal
M_p = momento plástico
F_y = esfuerzo de fluencia

- Pandeo local

La sección es compacta, y de acuerdo a la sección F7.2(a) el estado límite de pandeo local no aplica. Los cálculos de las esbelteces se encuentran en el Apéndice B.

Aplicando el factor de reducción de resistencia $\phi_b = 0{,}9$, la resistencia nominal a flexión es:

$$\phi_b M_n = 87{,}70 \quad [kgf \cdot m] \tag{5.4}$$

Resistencia al corte

De acuerdo a la sección G5, la resistencia al corte se calculó con la ecuación G2-1:

$$V_n = 0{,}6 F_y A_w C_v \quad [kgf] \tag{5.5}$$

donde

V_n = corte nominal
A_w = área del alma, profundidad total de la sección multiplicada por el espesor del alma
C_v = coeficiente de corte del alma

Aplicando el factor de reducción de resistencia $\phi_v = 0{,}9$, la resistencia nominal al corte es:

$$\phi_v V_n = 1555 \quad [kgf]. \tag{5.6}$$

El detalle de los cálculos se encuentra en el Apéndice B.

5.3.3. Resistencia requerida

De acuerdo al diagrama de solicitaciones de la figura 5.2(a), la resistencia requerida se calculó para encontrar el valor máximo de altura de cuelgue de viga ($hpa - dap$) que puede resistir el soporte.

Las presiones p_0, p_1 y p_2 se calcularon según las siguientes expresiones:

$$p_0 = \gamma \cdot e_{losa} \tag{5.7}$$

$$p_1 = \gamma \cdot \left(e_{losa} + h_{pa} - d_{ap}\right) \tag{5.8}$$

$$p_2 = \gamma \cdot \left(e_{losa} + \frac{h_{pa}}{4}\right) \tag{5.9}$$

donde

$\gamma =$ peso específico del hormigón

Entonces las expresiones para las fuerzas F_0 y F_2 son:

$$F_0 = \frac{1}{2}\left(p_2 + p_0\right)\left(\frac{h_{pa}}{4}\right)L_{pa} \tag{5.10}$$

$$F_2 = \frac{1}{2}\left(p_1 + p_2\right)\left(\frac{3h_{pa}}{4} - d_{ap}\right)L_{pa} \tag{5.11}$$

Una vez determinadas las solicitaciones se calcularon las fuerzas internas del soporte. En el Apéndice B se encuentran las ecuaciones en detalle.

Para evaluar las expresiones de las fuerzas internas, se utilizaron como valores iniciales los indicados en la Tabla 5.2. Con ellos se pudo observar que la fuerza interna máxima correspondía al momento, con valor máximo en la ubicación de la reacción H_1.

Tabla 5.2: Valores iniciales

Variables	Valores	
γ	2.5	Tf/m^3
e_{losa}	15	cm
d_{ap}	5	cm
d_2	47	cm
L_{pe}	120	cm
L_{pa}	120	cm

Entonces, se igualó el valor del momento nominal (Ecuación 5.4) con la ecuación de momento (Ecuación B.18), como muestra la Ecuación 5.13:

$$\phi_b M_n = M_{max} \quad [kgf \cdot m] \tag{5.12}$$

$$87{,}70 = -\left(F_0 \cdot d_2 + F_2 \cdot \left(d_2 - \frac{h_{pa}}{2}\right)\right) \tag{5.13}$$

Se fue iterando el valor de h_{pa} hasta encontrar el valor de M_{max} más cercano a $\phi_b M_n$. La Tabla 5.3 muestra los resultados.

Tabla 5.3: Cálculo resistencia requerida en función de h_{pa}

h_{pa} $[cm]$	$h_{pa} - d_{ap}$ $[cm]$	F_0 $[kgf]$	F_2 $[kgf]$	M_{max} $[kgf \cdot m]$	V_{max} $[kgf]$
35	30	46.14	198.80	80.33	244.94
36	31	47.76	209.56	83.22	257.32
37	32	49.41	220.57	86.08	269.98
38	33	51.06	231.84	88.92	282.90
39	34	52.74	243.37	91.71	296.10
40	35	54.43	255.15	94.47	309.57
41	36	56.14	267.18	97.19	323.32
42	37	57.87	279.47	99.86	337.34

Entonces, el soporte resiste hasta un valor máximo de altura de cuelgue de viga $h_{pa} - d_{ap}$ de 32 cm.

5.3.4. Desplazamientos

Se calcularon los desplazamientos con software de cálculo estructural en la dirección "z" (U3), para verificar el cumplimiento de las tolerancias establecidas por el manual de la CDT. La Tabla 5.4 muestra los valores arrojados por el software, y la Figura 5.4 muestra la deformada del perfil.

Tabla 5.4: Desplazamiento de los nudos

Nudo	despl U3 [mm]
11	9.4
10	5.3
9	2.5
8	0
7	0
6	0.5

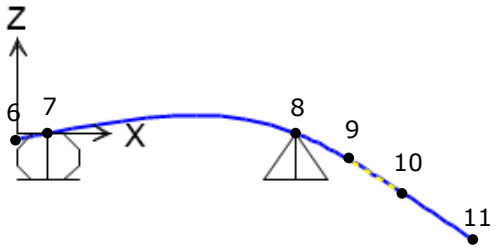


Figura 5.4: Deformada del soporte
(Fuente: Elaboración propia)

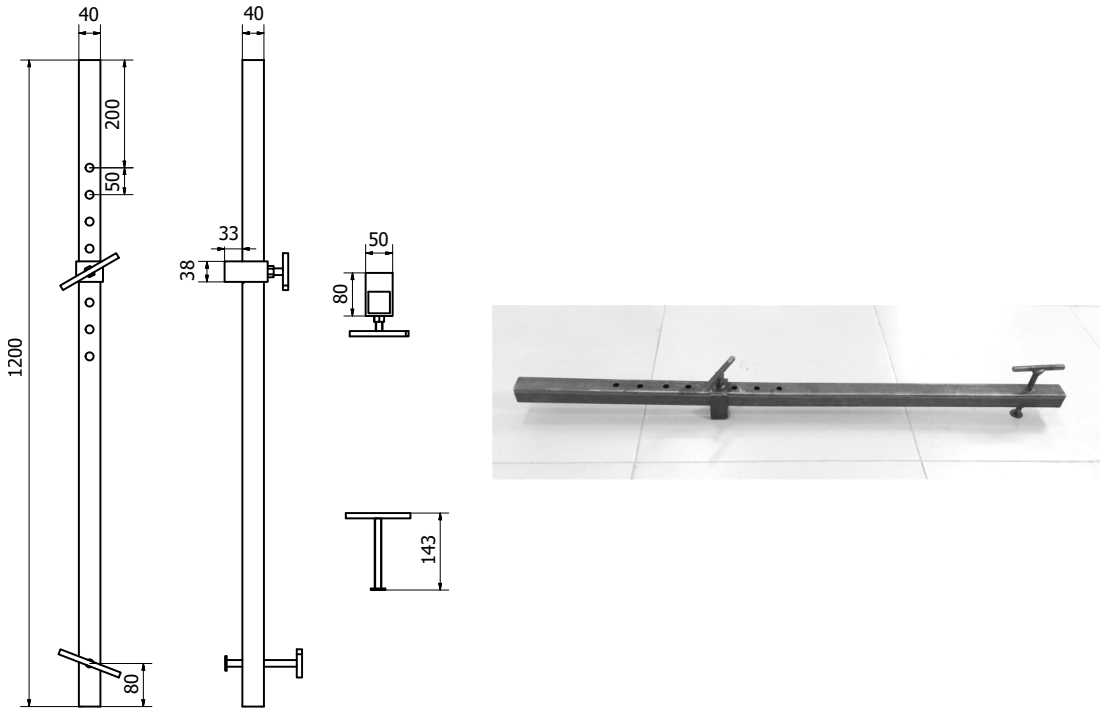
Como muestra la Tabla 5.4, el desplazamiento del nudo 9 que corresponde al fondo de viga es de 2,5 mm, y para muros grado 1 el valor máximo permitido es de 8 mm, por lo tanto, cumple.

6 Prueba del soporte

Pruebas en laboratorio son necesarias para verificar la resistencia del soporte calculada en el Capítulo 5, y observar su comportamiento. Para poder realizar las pruebas, un prototipo del diseño fue construido según las características indicadas en la Sección 5.2. Luego, el diseño y preparación del ensayo fue realizado conforme a las dimensiones de los materiales y los equipos disponibles. Finalmente se realizó la prueba registrando las mediciones de fuerza y deformación.

6.1. Fabricación del prototipo

El prototipo se fabricó siguiendo las características mencionadas en la Sección 5.2, y la Figura 5.1(a). Se cortó un perfil de acero A37-24ES de sección cuadrada de 40 mm y 2 mm de espesor, a 1,2 m de largo y se hicieron 8 perforaciones a 20 cm desde el extremo superior de 15 mm de diámetro separadas 5 cm entre cada centro. La abrazadera móvil se confeccionó con pletinas de 6 mm de espesor soldadas, formando la superficie de apoyo para la placa de encofrado, de profundidad de 40 mm. El perno de ajuste y el perno de soporte se confeccionaron con una barra de hilo de $1/2$” de diámetro y la manilla soldada en la parte superior es una barra de sección cuadrada de lado 1 cm y de 12 cm de largo . La barra de hilo del perno de soporte es de largo 13 cm y en la parte inferior lleva una golilla de 27 mm de diámetro soldada, para tener más superficie de apoyo (Figura 6.1(a)).



(a) dimensiones en mm del prototipo (b) prototipo construido

Figura 6.1: Prototipo del soporte
(Fuente: Elaboración propia)

6.2. Configuración del ensayo

El soporte se ensayó simulando la situación mostrada en la Figura 5.1(b) y la Figura 5.2(a) con las siguientes dimensiones:

Tabla 6.1: Dimensiones dadas para realizar el ensayo

Parámetro	Dimensiones cm
e_{losa}	15
h_{pa}	37
L_{pa}	120
d_{ap}	5
d_2	55

La configuración del soporte y los instrumentos de medición se muestra en la Figura 6.2.

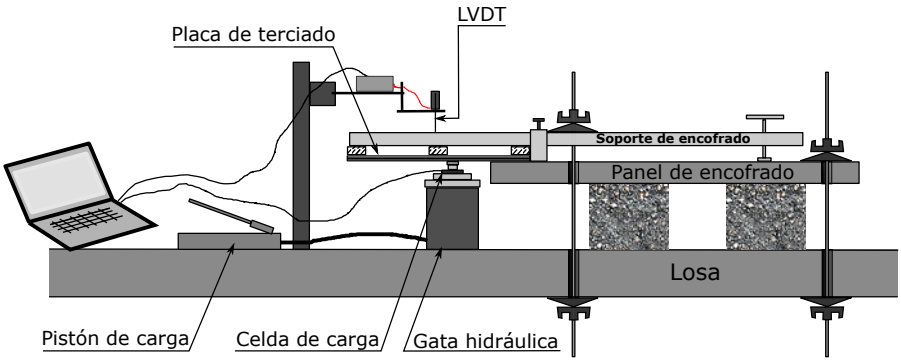


Figura 6.2: Diagrama de configuración del ensayo con los instrumentos de medición
(Fuente: Elaboración propia)

La Figura 6.2 muestra que el soporte se encuentra apoyado sobre un panel de encofrado que simula la superficie de un muro de hormigón, y está fijo a él por 2 barras de anclaje fijas con tuercas. La placa de terciado, que recibe la presión del hormigón fresco, se colocó debajo del soporte, en su extremo superior. La presión se simuló como una carga puntual aplicada cerca del centroide geométrico de la distribución de presión hidrostática, y se aplicó con una gata hidráulica.

La fuerza se midió utilizando una celda de carga ubicada sobre el cilindro hidráulico de la gata y debajo de la placa de terciado, haciendo contacto entre las dos superficies. La celda se conectó a un computador para registrar los datos. Las deformaciones se midieron utilizando un transformador diferencial de variación lineal (LVDT), colocado en la mitad de la altura del panel, $h_{pa}/2$ y conectado a un computador.

La Figura 6.3 muestra el soporte instalado con los dispositivos de medición antes de comenzar el ensayo.

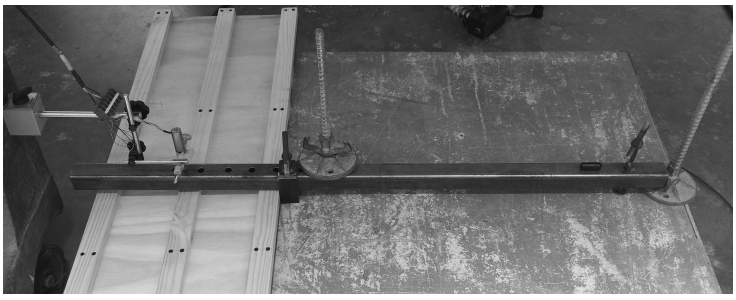


Figura 6.3: Soporte listo para ensayar
(Fuente: Elaboración propia)

6.3. Ejecución del ensayo y resultados

La fuerza se aplicó de forma incremental bombeando la gata hidráulica. Se aplicó hasta que se soltó la tuerca de anclaje superior. Las mediciones de fuerza y deformación se muestran en la Figura 6.4.

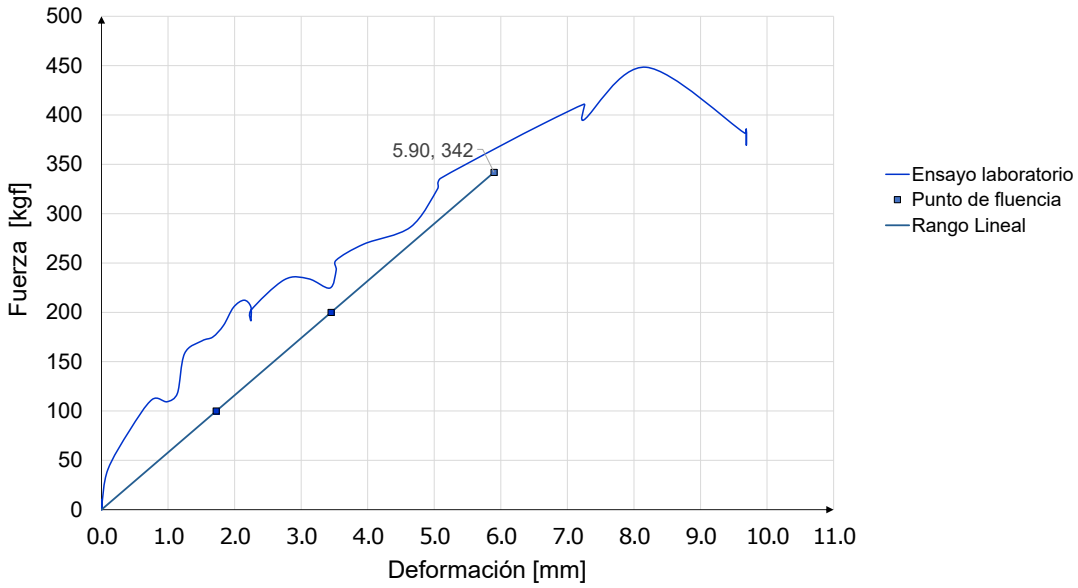


Figura 6.4: Curva fuerza-deformación realizada con las mediciones
(Fuente: Elaboración propia)

La Figura 6.4 muestra que la curva obtenida del ensayo presenta varias discontinuidades. Éstas se deben a la forma en que se aplicó la fuerza, que fue por bombeo del pistón de la gata hidráulica, el cual se detiene una vez que ha cargado, y debe volver a la posición inicial para cargar otra vez, provocando diferencias de magnitud entre carga y descarga.

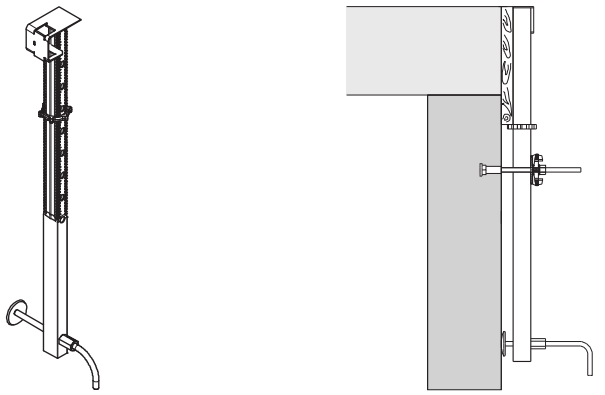
La Figura 6.4 muestra también la curva fuerza deformación calculada mediante análisis estático hasta el punto de fluencia.

7 Observaciones y mediciones en terreno

Después de realizar el ensayo en el laboratorio, observaciones en terreno sobre el comportamiento y la operabilidad del soporte son necesarias para validar o rechazar las hipótesis 1 y 3 (Sección 3.2). Además, es necesario hacer una comparación entre la calidad resultante utilizando el encofrado actual y la calidad al utilizar el nuevo soporte para determinar si se producen mejoras.

Un problema al medir el efecto del prototipo en terreno es la seguridad. Al no estar certificado, ni haber realizado pruebas de calidad ante diferentes situaciones, pone en riesgo la seguridad de los trabajadores y el avance de la obra, ya que puede fallar al no resistir las solicitaciones impuestas en terreno. Si bien el soporte fue probado en el laboratorio, las condiciones en terreno son diferentes y hay muchas variables que entran en juego que pueden perjudicar su rendimiento, como por ejemplo, la forma con que es instalado, dónde es instalado, etc.

Un método que se encontró aceptable para no poner en riesgo la seguridad en obra, fue utilizar un soporte de características similares al diseñado, pero fabricado por una empresa de encofrados. Se escogió la guía de borde para tapes de losa fabricada por la empresa Peri, mencionada en la Subsección 2.2.1 (Figuras 2.8(a) y 7.1). La Figura 7.1(b) muestra que la guía de borde también se compone de un perfil, en este caso rectangular, con un soporte inferior similar al perno de soporte del prototipo y una tuerca que se mueve a lo largo del perfil, que actúa como la abrazadera móvil que soporta la placa de terciado que muestra la Figura 5.1(a). La guía de borde se fija al muro por medio de una barra de anclaje inserta en una manga embebida en el muro de hormigón, pero para las mediciones en terreno, se instaló de la misma forma que el soporte diseñado, pasando las barras de anclaje del encofrado de muro a través de los agujeros del muro que quedan de la fijación de los paneles de encofrado (Figura 5.1(b)).



(a) vista isométrica de la guía

(b) guía instalada como tape de losa

Figura 7.1: Guia de borde 105 de PERI
(Fuente: PERI GmbH (2009))

Las observaciones y mediciones se realizaron en la construcción del edificio “Libertad 500” ubicado en Avenida Libertad esquina 6 Norte, Viña del Mar. Se observaron 3 pisos consectuivos, desde el 4to hasta el 6to. Se identificaron y seleccionaron los muros que tenían vigas para hacer las observaciones y mediciones. Se midieron 7 superficies de muro, correspondientes a 4 muros, como se muestra en la Figura 7.2. Las superficies observadas y medidas se identificaron con las letras “A” y “N”, debido al tipo de encofrado utilizado, como se explica más adelante en la Subsección 7.1.1.

Después de medir el comportamiento y comparar la calidad resultante de la superficie de los muros, se hizo la evaluación del soporte con los criterios de diseño de la Sección 5.1 y se comparó con el método actual.

7.1. Metodología de observación y medición

La metodología de trabajo consistió en:

a) Revisión de la superficie del muro antes de colocar el encofrado. Si está lisa o contiene restos de hormigón provenientes de la construcción de los muros.

b) Identificación del método de encofrado utilizado para el área de anclaje de viga, registrando cantidad y dimensiones de los materiales.

c) Medición del espesor de los resaltes después de desmoldar.

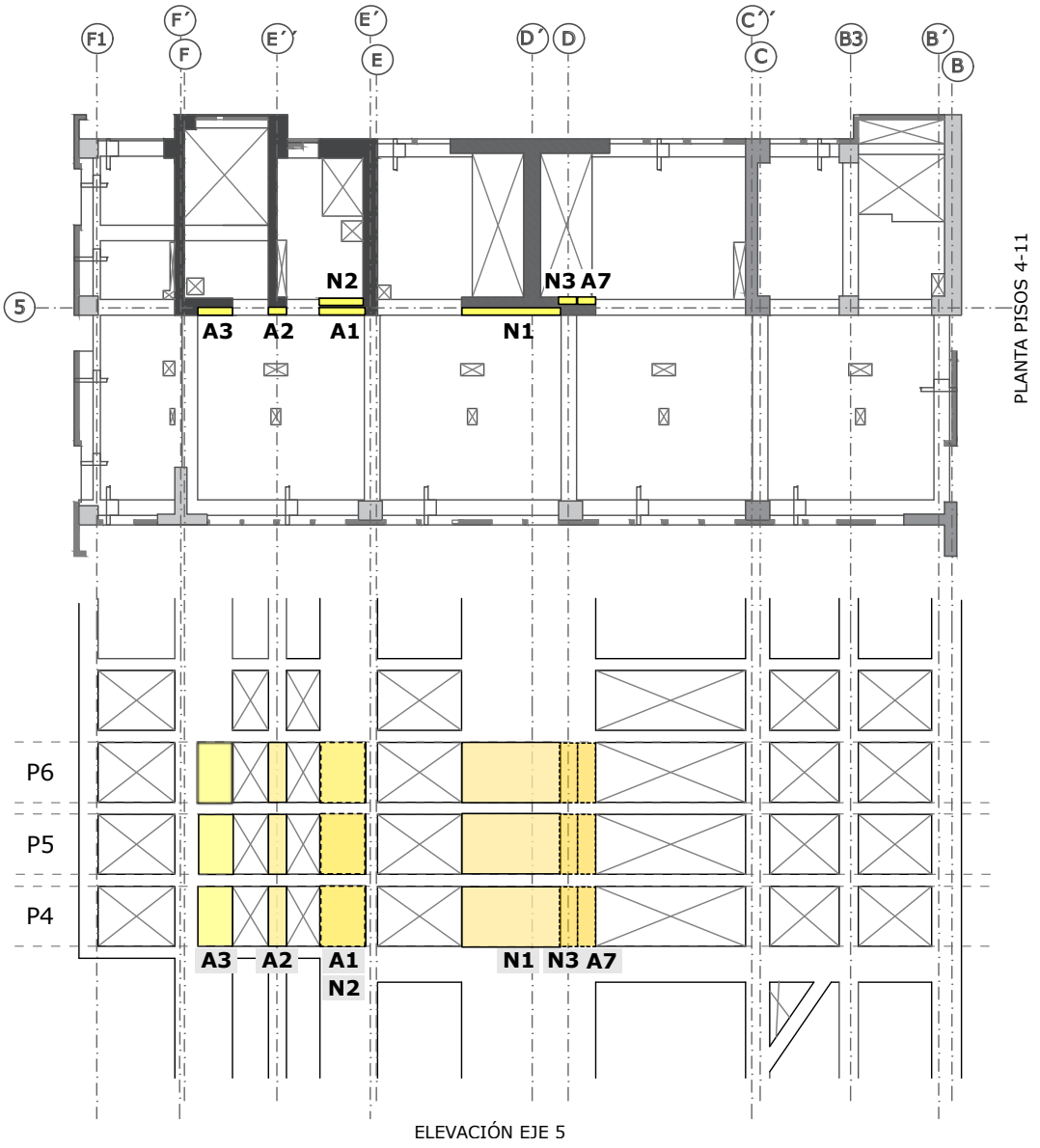


Figura 7.2: Planta y elevación de los pisos 4, 5 y 6
(Fuente: modificado de plano estructural)

La frecuencia de las observaciones fue aproximadamente 2 veces por semana, durante 1 mes y medio.

7.1.1. Denominación del método de encofrado utilizado

Como se comparó la calidad resultante entre el encofrado que no usa la guía de borde y el que sí la usa, se definió como “Actual”, al primer método de encofrar, y “Nuevo” al segundo.

Por eso, los códigos identificadores de las superficies comienzan con las letras “A” y “N”, según el encofrado instalado en el piso 4. Se mantuvo esta denominación para los pisos siguientes, independiente si hubo o no un cambio de método. La Figura 7.3 muestra ambos métodos. La Figura 7.3(a) muestra una viga de encofrado clavada a la placa terciada. Estas vigas sólo se identificaron en algunas superficies. En la Figura 7.3(b) se observa que para el método nuevo, el contratista decidió colocar vigas de encofrado entre las placas y la guía de borde.



(a) método “actual” instalado en “A1”

(b) método “nuevo” instalado en “N1”

Figura 7.3: Métodos de encofrar utilizados
(Fuente: Elaboración propia)

Para el método actual se registraron las dimensiones de las placas de terciado utilizadas, y para el método nuevo se registró la cantidad de guías de borde utilizadas, la separación entre ellos, la cantidad de vigas de encofrado utilizadas y las dimensiones de las placas de terciado.

7.1.2. Medición de los resaltes

Después del descimbrado, se midió el espesor de los resaltes utilizando una regla milimétrica, colocándola en forma perpendicular a la superficie del muro, y tomando como nivel de referencia la superficie inferior al resalte, como muestra la Figura 7.4:



Figura 7.4: Método de medición del espesor de los resaltes
(Fuente: Elaboración propia)

Se hicieron 10 mediciones equidistantes a lo largo de cada superficie. Se determinó este número para tener la misma cantidad de datos en todas las superficies. Por otra parte, los resaltes no son irregularidades puntuales, por lo que igual se pudieron obtener las variaciones en espesor aun en superficies de 6 metros de largo.

Las mediciones de los resaltes se registraron siguiendo el formato de la Tabla 7.1:

Tabla 7.1: Registro de las mediciones de los espesores

Piso	ID	Fecha	Encofrado	Longitud medida [m]	Paso [cm]	M1	M2	...	M10
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	...	⋮

donde M1, M2, ... M10 corresponden a las mediciones de los espesores.

7.2. Uso no estructurado de la guía de borde

Durante las visitas se observó que algunas superficies no se construyeron siguiendo el mismo método de encofrado que en el piso incial, cambiando de “actual” a “nuevo” a partir del piso 5. Se observaron también diferencias en la forma de instalación de las guías de borde.

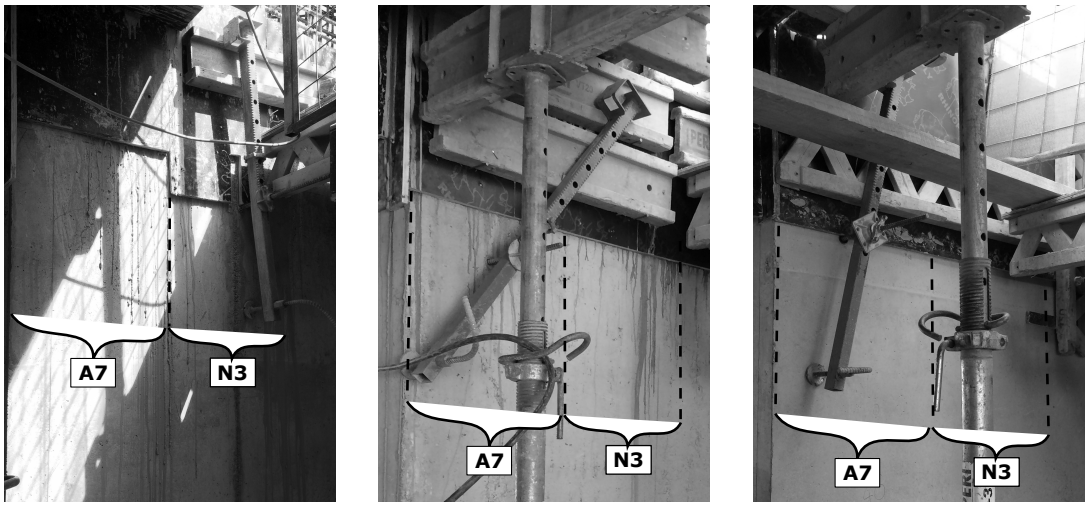
Las superficies A1, A3 y A7 cambiaron del método actual a nuevo en el piso 5 y 6. La Figura 7.5 muestra el encofrado en la superficie A1 en los 3 pisos medidos.



(a) piso 4: método actual (b) piso 5: método nuevo (c) piso 6: método nuevo

Figura 7.5: Encofrado en superficie A1
(Fuente: Elaboración propia)

La Figura 7.5(c) y la Figura 7.6 muestran que las guías de borde no fueron instaladas de forma vertical como es indicado por el fabricante.



(a) piso 4 (b) piso 5 (c) piso 6

Figura 7.6: Encofrado en A7 y N3
(Fuente: Elaboración propia)

Además, la Figuras 7.6(b) y 7.6(c) muestran que la superficie A7 cambió al método nuevo en el piso 5 y 6, pero debido a la inclinación de la guía en el piso 5, no se pudo establecer el método de encofrado de N3.

7.3. Resultados de las mediciones

En la siguiente sección se muestran y analizan las mediciones utilizando los promedios de los espesores. En el Apéndice C se encuentran todas las mediciones con mayor detalle.

7.3.1. Espesores promedio

Los espesores promedio se muestran en las tablas 7.2 y 7.3. La Tabla 7.2 muestra los promedios para los muros que se construyeron sin cambiar de método y la Tabla 7.3 muestra los promedios para los muros que sí cambiaron.

Tabla 7.2: Promedio de resaltes de muros que no cambiaron de método de encofrado

PISO	ID	Método	Longitud medida [m]	Espesor promedio [mm]
4	A2	ACTUAL	-	-
5	A2	ACTUAL	0.8	17
6	A2	ACTUAL	0.8	3
4	N1	NUEVO	4.2	0
5	N1	NUEVO	4.2	4
6	N1	NUEVO	4.2	2
4	N2	NUEVO	1.7	2
5	N2	NUEVO	1.7	2
6	N2	NUEVO	1.7	2
4	N3	NUEVO	0.7	0
5	N3	NUEVO	-	-
6	N3	NUEVO	-	-[1]

Tabla 7.3: Promedio de resaltes para los muros que cambiaron de método actual a nuevo

PISO	ID	Método	Longitud medida [m]	Espesor promedio [mm]
4	A1	ACTUAL	2.4	3
5	A1	NUEVO	2.4	1
6	A1	NUEVO	2.4	0
4	A3	ACTUAL	1.5	4
5	A3	NUEVO	1.5	1
6	A3	NUEVO	1.5	0
4	A7	ACTUAL	0.6	2
5	A7	NUEVO	-	-
6	A7	NUEVO	-	-

La Figura 7.7 muestra por medio de un gráfico de barras los resultados de la Tabla 7.2.

[1] Indica que no hubo medición.

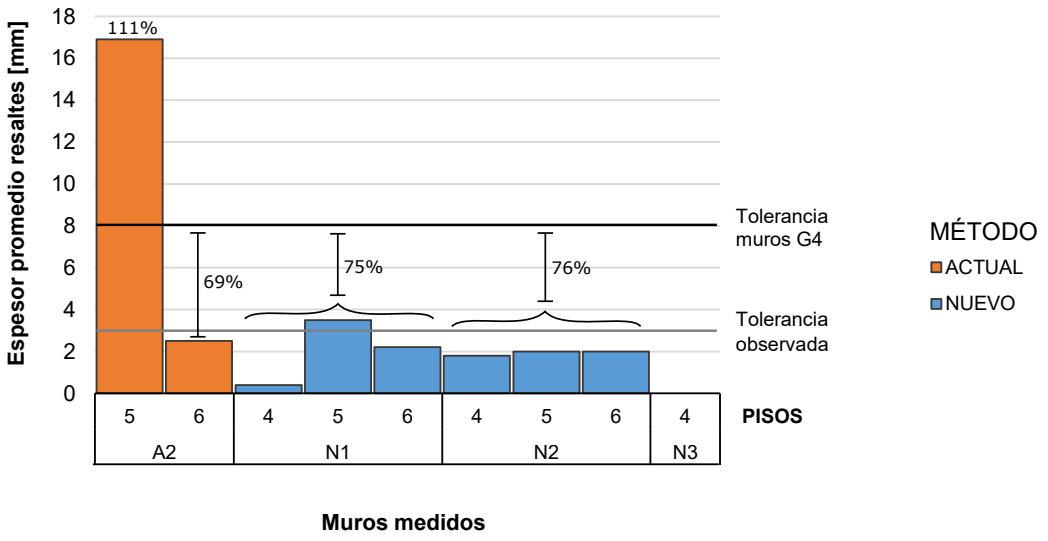


Figura 7.7: Espesor promedio de resaltes en superficies que no cambiaron el método de encofrar
(Fuente: Elaboración propia)

La Figura 7.7 muestra también el espesor máximo permitido por el Manual de Tolerancias de la CDT, y otro máximo permitido que se observó en terreno, menor al establecido por la CDT y que es alrededor de los 3 mm de espesor.

Se observa que las 3 superficies con el método nuevo están bajo la tolerancia de la CDT para de muros grado 4, en promedio un 75 %, 76 % y 100 %. La superficie A2 en el piso 5 sobrepasó la tolerancia en un 111 %. En el sexto piso estuvo bajo el máximo en un 69 %. Para la tolerancia observada en terreno, la superficie A2P6 está por debajo en un 17 % y la superficie N2 en promedio un 36 % más abajo.

Del gráfico se obtuvo que la disminución del espesor desde el método de encofrado actual al nuevo fue en promedio un 82 %.

La Figura 7.8 muestra por medio de un gráfico de barras los resultados de la Tabla 7.3. Se muestra también el espesor máximo permitido por el Manual de Tolerancias de la CDT, y el espesor máximo permitido observado en terreno.

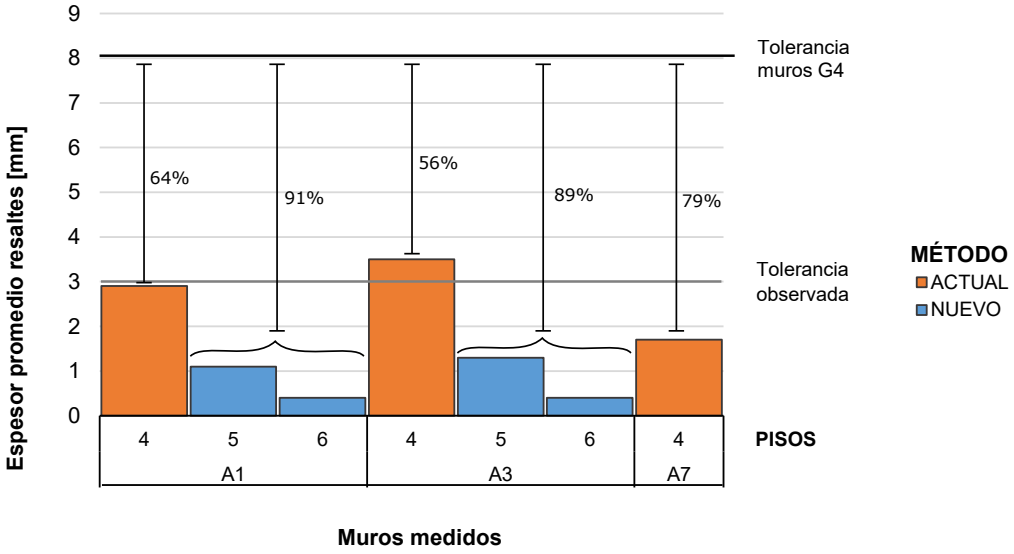


Figura 7.8: Espesor promedio de resaltes en superficies que sí cambiaron el método de encofrar
(Fuente: Elaboración propia)

Se observa que las 3 superficies están bajo las tolerancias, con el encofrado actual en un 64 %, 56 % y 79 %, y con el encofrado nuevo en promedio un 91 % y 89 %. Con respecto a la tolerancia observada en terreno, la superficie A1 se encuentra en un 3 % por debajo en el piso 4, y para los pisos 5 y 6 en un 75 % en promedio.

De la Figura 7.8 se puede observar que al cambiar desde el método de encofrado actual al nuevo, hubo una disminución en el promedio de los espesores en un 74 % y 76 % para A1 y A3.

7.3.2. Distribución y relación de los espesores con respecto a la longitud medida

Las mediciones de los espesores también se graficaron en función de la longitud de la superficie medida, para observar su distribución y poder encontrar una relación entre los espesores y la longitud. Pero determinar una relación, o medir la efectividad de un nuevo dispositivo en terreno no es una tarea sencilla. Existen muchos factores externos que interfieren con la variable independiente, y por lo tanto, es difícil medir valores significativos con suficiente confiabilidad (Bernold y Lee, 2010).

Distribución de los espesores con respecto a la longitud medida

La Figura 7.9 muestra la distribución de las mediciones utilizando el encofrado actual en función de la longitud medida. Las cifras en el centro "AVG" indican el promedio de la serie, y la del extremo superior "SD" la desviación estándar.

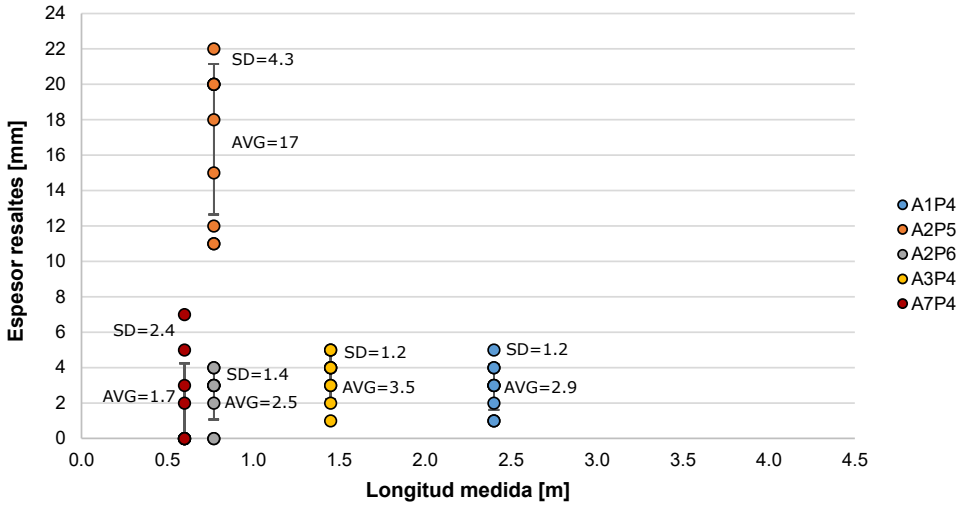


Figura 7.9: Espesor de resaltes en superficies que se encofraron con método actual versus longitud de muro medida

(Fuente: Elaboración propia)

De la Figura 7.9 se observa que la desviación estándar de las series se encuentra en el rango $[1, 4]$. Además la serie A2P5 se considera como serie extrema debido a la diferencia de promedio con las demás series, y que su desviación estándar es mayor en un 77 % a la máxima desviación de las demás series. En la Figura 7.10 se muestra la superficie A2P5 descimbrada, donde se observa el resalte producido.



(a) vista frontal (b) vista inferior

Figura 7.10: Superficie A2 en piso 5
(Fuente: Elaboración propia)

La Figura 7.11 muestra la distribución de las mediciones utilizando el encofrado nuevo en función de la longitud medida. Las cifras en el centro indican el promedio de los resaltes de cada superficie correspondiente a los 3 pisos, y la cifra del extremo superior es la desviación estándar.

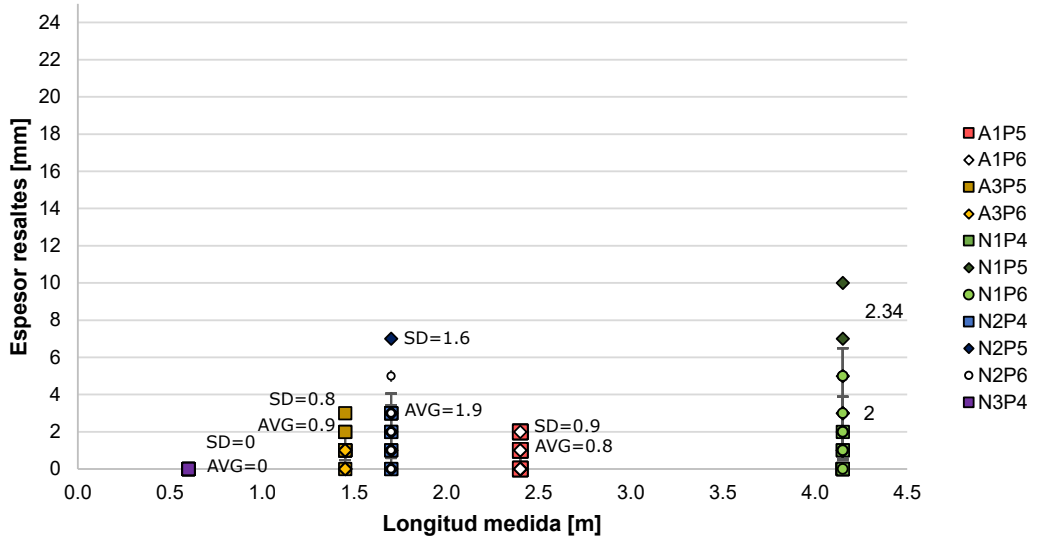


Figura 7.11: Espesor de resaltes en superficies que se encofraron con método nuevo
(Fuente: Elaboración propia)

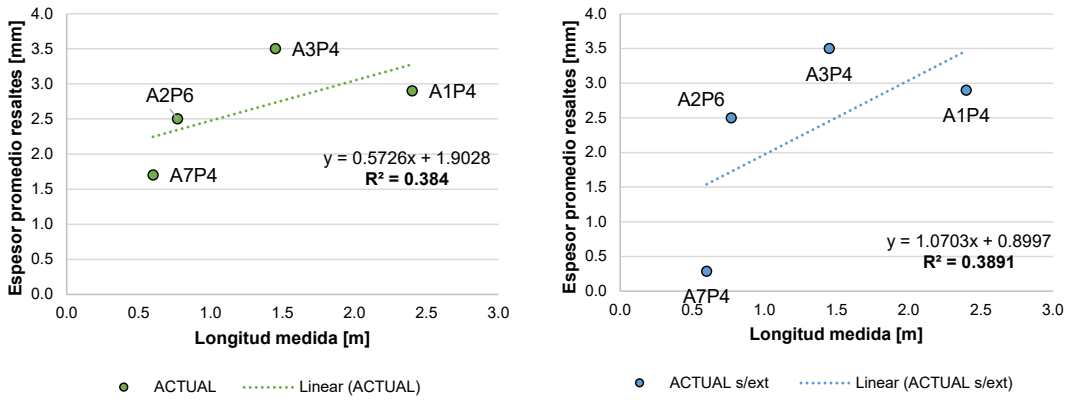
Se observa también que los valores de los espesores de cada superficie son bastante cercanos

en los 3 pisos medidos (las series se superponen).

Relación del promedio de los espesores con respecto a la longitud

Para determinar una relación que permita predecir los espesores con la longitud, se graficaron los promedios de los espesores de todas las superficies según el encofrado utilizado y con respecto a la longitud medida, para luego realizar una regresión lineal.

En la figura 7.12(a) se muestran los promedios de los resaltes de las superficies con el encofrado actual. Las superficies A1, A3 y A7 sólo contienen el piso 4. Para la superficie A2 sólo se graficó el promedio de las mediciones correspondientes al piso 6. No se consideró la serie extrema del piso 5.



(a) promedios con datos extremos

(b) promedios sin datos extremos

Figura 7.12: Espesores promedio de resaltes por superficie que se encofraron con método actual
(Fuente: Elaboración propia)

Con estos valores se hizo una regresión lineal. El coeficiente R^2 de la regresión es igual a 0,38. Se observa una correlación positiva, pero si bien el valor de R^2 es bajo y poco representativo, se analizará esta posible tendencia estudiando los puntos utilizando la información de las tablas C.1 y C.3, y la Figura 4.8 de la Subsección 4.2.3.

La serie A7P4 se ajusta a esta tendencia, con los espesores más bajos y la menor longitud. Sin embargo, al observar los valores de los resaltes (Tabla C.3), se observaron valores extremos ubicados en la parte izquierda del muro. Se observó la configuración de encofrado en la Tabla C.3, y ésta no tenía ninguna viga de soporte, y la parte izquierda del muro era extremo libre. La causa de estos valores extremos se puede explicar revisando la Figura 4.8, con el diagrama de

causa-efecto, donde se puede decir que la mano de obra no implementó el método indicado inicialmente.

Por otra parte, la serie A3P4 tiene una menor longitud que A1P4 y obtuvo mayores espesores. Se observaron valores más altos en la parte izquierda del muro, donde se identificó una esquina con una viga que cruzaba en forma perpendicular. Las placas estaban soportadas sólo por una viga, a diferencia de la superficie A2P6, que estaba soportada por 2 vigas. Nuevamente, no se cumple con una forma única de encofrar.

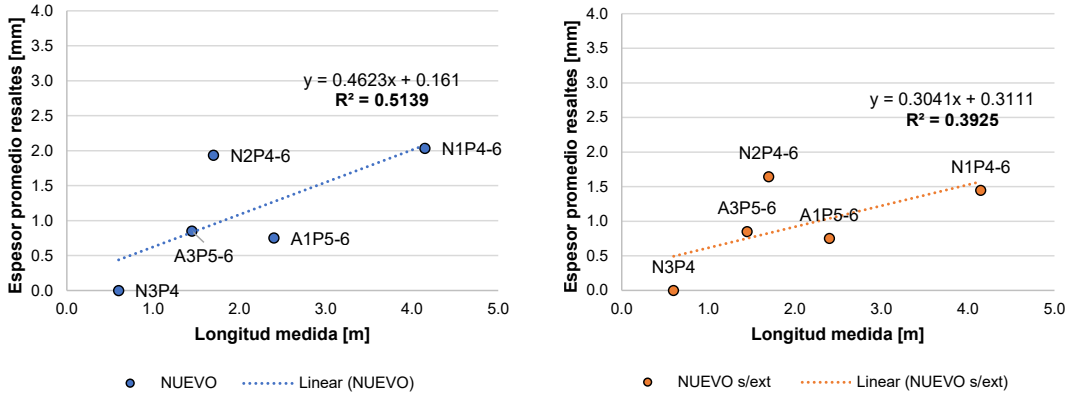
La serie A1P4, si bien tenía un espesor promedio menor a la tolerancia observada en terreno, obtuvo valores mayores al promedio en el extremo derecho, donde se identificó una esquina con una viga que cruzaba en forma perpendicular. Por otra parte, las placas estaban soportadas sólo por una viga.

Para observar si hay un cambio en el coeficiente R^2 al no considerar los valores extremos de la serie A7P4, que eran los de mayor magnitud en comparación con los valores de las demás series, se realizó nuevamente una regresión, como se muestra en la figura 7.12(b).

Se observa que el valor del coeficiente R^2 aumentó 5 milésimas, por lo que se considera despreciable sin producir un cambio significativo.

Por lo tanto, la influencia de las singularidades como esquinas y la variabilidad del método de instalación, produce irregularidades en la muestra, haciendo difícil definir una tendencia. Aun así, es posible establecer que las longitudes menores tienen menor probabilidad de obtener espesores mayores, porque es más fácil de encofrar y la placa se comporta como elemento rígido sin sufrir mayores deflexiones.

La figura 7.13(a) muestra los promedios de los resaltes de las superficies con el encofrado nuevo. Para las superficies A1 y A3 se calculó el promedio de las mediciones correspondientes a ambos pisos 5 y 6. Para las superficies N1 y N2 se calculó el promedio de los espesores considerando los 3 pisos: 4, 5 y 6.



(a) promedios con datos extremos

(b) promedios sin datos extremos

Figura 7.13: Espesores promedio de resaltes por superficie que se encofraron con método nuevo
(Fuente: Elaboración propia)

Con estos valores se hizo una regresión lineal. El coeficiente R^2 es igual a 0,51. Al igual que el encofrado actual, se observa una correlación positiva, pero no se puede asegurar una tendencia. Se analizarán los valores igual que para el encofrado actual.

Nuevamente, la superficie con menor longitud, N3P4 tuvo los espesores más bajos.

Las series A3P5-6 y A1P5-6 no tuvieron valores extremos. La superficie A3 tenía 1 guía de borde, y 2 vigas de soporte en ambos pisos. La superficie A1 tenía 2 guías de borde y 2 vigas también en ambos pisos.

Los promedios de las series N2P4-6 y N1P4-6 necesitan una atención especial. Ambos son mayores que las demás series y muy cercanos entre ellos, pero N2 tiene menor longitud que A1 y mayor promedio. Para las series N2 piso 5 y 6, si bien los espesores son mayores que las demás series, tiene además un valor extremo que se ubica en el extremo izquierdo del muro, donde hay una esquina, además, en el piso 6 la guía de borde de la izquierda no estaba instalada en forma vertical. La superficie N1 piso 5, tiene 3 valores extremos en la parte izquierda del muro, que es un extremo libre. Además, la guía de borde no estaba instalada en forma vertical y la viga de encofrado no estaba completamente apoyada sobre la placa, permitiendo el movimiento desde su parte inferior.

Debido a que los valores extremos de la serie N1 piso 5 y N2P5-6 están muy alejados del promedio, se eliminaron del análisis, se graficaron y se hizo nuevamente una regresión, mostrados en en la 7.13(b). Se observa que la pendiente de la curva disminuyó, y el valor de R^2

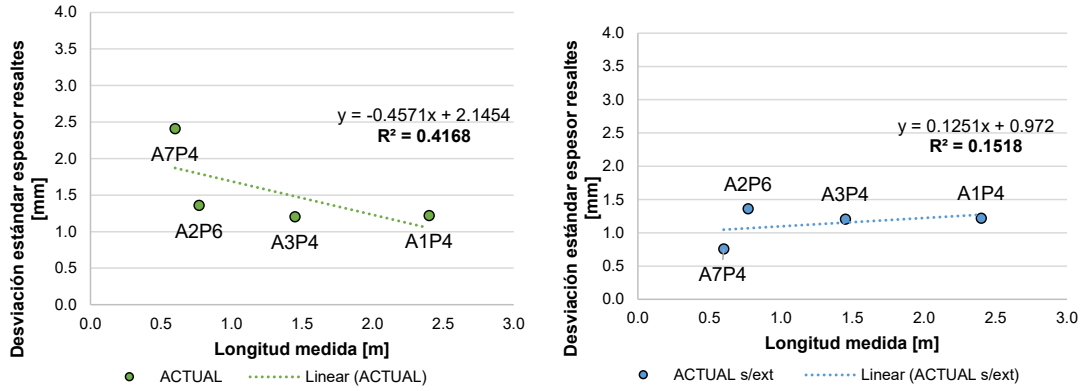
también, a 0,39, debido a la serie N2P4-6 que sigue teniendo en promedio espesores mayores que las demás series.

Igual que para el encofrado actual, debido a la variabilidad del método y calidad de la instalación del encofrado (por ejemplo, la cantidad de apriete de las tuercas para fijar la guía de borde), se producen irregularidades en la muestra, haciendo difícil definir una tendencia. Nuevamente, se confirma que que las longitudes menores tienen menor probabilidad de obtener espesores mayores.

Relación de la desviación estándar de los espesores con respecto a la longitud

Para determinar una relación que permita predecir dispersión de las mediciones con la longitud, se graficaron las desviaciones estándar de los espesores de todas las superficies según el encofrado utilizado y con respecto a la longitud medida, para luego realizar una regresión lineal.

La figura 7.14(a) muestra la distribución de la desviación estándar de las mediciones usando el encofrado actual con respecto a la longitud medida. Se calculó considerando los mismos datos que para la relación del promedio.



(a) desviaciones estándar con datos extremos

(b) desviaciones estándar sin datos extremos

Figura 7.14: Desviación estándar de los espesores de los resaltes por superficie encofrada con método actual

(Fuente: Elaboración propia)

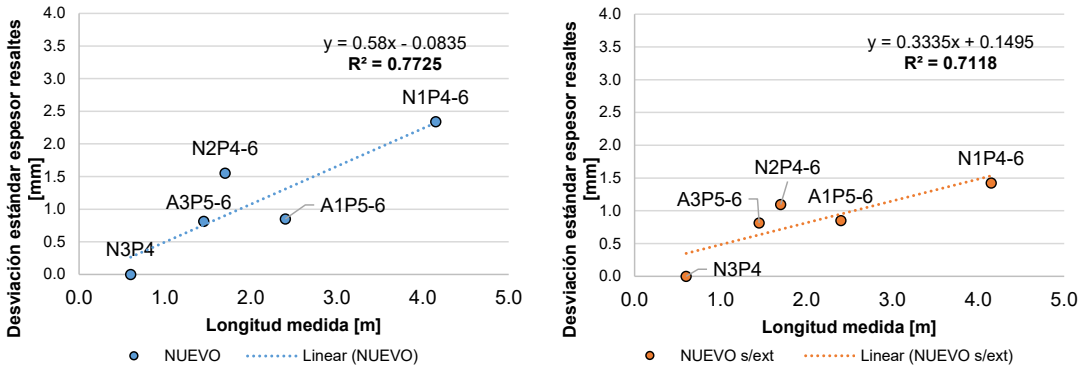
Con estos valores se hizo una regresión lineal. El coeficiente R^2 es igual a 0,42. Se observa una correlación negativa, pero debido al bajo valor de R^2 no se puede asegurar, pero se analizará esta posible tendencia.

Se observa que las series A2P6, A3P4 y A1P4, no presentan una variación relativa significativa con la longitud. Como se mencionó anteriormente, la placa de encofrado de A2P6 está soportada por 2 vigas, y no hay extremos libres ni esquinas. A3P4 tiene sólo una viga que soporta, al igual que A1P4.

La desviación de la serie A7P4 es mayor debido a los valores extremos, como se explicó en el caso de los promedios. Es por ello, que se hizo una nueva regresión dejando estos valores se dejaron fuera del análisis. La nueva curva de tendencia es mostrada en la figura 7.14(a). Se observa que el valor de R^2 disminuyó a 0,15, pero ahora la correlación es positiva y la pendiente de la curva es menor, observando una distribución más horizontal.

Si bien el valor de R^2 es muy bajo y poco significativo, se observa que la desviación estándar pareciera ser independiente de la longitud.

La figura 7.15(a) muestra la distribución de la desviación estándar de las mediciones usando el encofrado nuevo con respecto a la longitud medida. Se calculó considerando los mismos datos que para la relación del promedio.



(a) desviaciones estándar con datos extremos

(b) desviaciones estándar sin datos extremos

Figura 7.15: Desviación estándar de los espesores de los resaltes por superficie encofrada con método nuevo

(Fuente: Elaboración propia)

Con estos valores se hizo una regresión lineal. El coeficiente R^2 es igual a 0,77, y la correlación es positiva, aumentando la desviación estándar con la longitud. Se analizarán los valores para poder explicar esta posible tendencia.

Revisando los valores de las desviaciones para cada piso (Tabla C.2), la serie N1 en el piso 5

es la que tiene la mayor desviación estándar, debido a que los valores extremos se encuentran en el extremo izquierdo del muro, por las razones explicadas en la sección de los promedios de los espesores.

De la misma forma, los valores extremos en las series N2 piso 5 y 6, producen una mayor desviación estándar, alejándose de la línea de tendencia.

Quitando los valores extremos de las series, se graficó y se hizo nuevamente una regresión, mostrada en la 7.15(b). Se observa que la pendiente de la curva de tendencia disminuyó, y el valor de R^2 bajó a 0,71 por lo que no hubo un cambio significativo.

A diferencia del encofrado actual mostrado en la figura 7.12(b), hay un mejor coeficiente de correlación, que indica que la desviación estándar aumenta con la longitud medida, pero como se ha mencionado, factores externos como por ejemplo, la variabilidad del método de instalación de encofrado, hace difícil encontrar una razón específica de esta tendencia.

7.4. Evaluación del diseño propuesto

Finalmente, con las observaciones y mediciones en terreno realizadas, se pudo evaluar el nuevo diseño. La Tabla 7.4 muestra los resultados de la evaluación de ambos métodos:

Tabla 7.4: Evaluación del método de encofrado actual y nuevo

		Método Actual		**Método Nuevo**	
Criterio	Peso P	Likert L	$P \times L$	Likert L	$P \times L$
Dimensiones de los resaltes de hormigón	30	1	30	5	150
Facilidad de instalación y ajuste	25	5	125	3	75
Costo de fabricación	20	4	80	3	240
Vida útil	10	1	10	4	40
Mantenimiento requerido	10	1	10	3	30
Facilidad de desinstalar	5	3	15	4	20
TOTAL	**100**		**270**		**555**

Para el nuevo diseño propuesto, las puntuaciones más altas se obtuvieron en el criterio de dimensiones de los resaltes y el criterio de resistencia. Esto fue comprobado con los cálculos de diseño en el Capítulo 5 y las mediciones en terreno, que mostraron una resistencia suficiente para una altura de cuelgue de viga máxima cercana a los valores medidos en terreno y con deformaciones dentro de las tolerancias.

Para el método actual de encofrado, las puntuaciones más altas fueron para facilidad de instalación y costo de fabricación, porque sólo requiere fijar las placas de encofrado al muro, mientras que el nuevo sistema requiere también instalar el soporte sobre las placas de terciado, y su inclusión aumenta el costo.

Después de sumar todas las puntuaciones, la alternativa que obtuvo la mayor evaluación fue el nuevo diseño, porque el mayor puntaje se concentró en los criterios de mayor importancia, que son las dimensiones de los resaltes y la resistencia del soporte. Si bien el costo de fabricación es el tercer criterio con mayor importancia, este se compensa con el costo de reparación que requiere el uso del sistema actual de encofrado.

8 Conclusiones

Esta memoria trató sobre la disminución de pérdidas asociadas a la calidad de la superficie de los muros de hormigón armado en edificios. El problema a estudiar fue la aparición de resaltes de hormigón en las juntas horizontales de la zona de anclaje de vigas (RHZAV), que sobrepasan las tolerancias permitidas en obras que utilizan encofrados industrializados. Estos resaltes son un defecto resultante del proceso constructivo, se obtiene una superficie con una calidad inferior a la esperada, y se deben reparar, resultando en una pérdida. Observaciones en terreno revelaron espesores de resaltes de hasta 2 cm, además del uso de clavos para fijar las placas de encofrado al muro, en vez de un soporte sólido.

La metodología para llevar a cabo la investigación fue estudiar el problema de RHZAV, diseñar una solución, fabricarla y ensayarla en el laboratorio, y realizar observaciones y mediciones en terreno para medir su efecto en la calidad de la superficie de los muros.

Después de hacer una revisión de la literatura y definir el problema, se establecieron 3 hipótesis para guiar el trabajo de investigación, las cuales se validan a continuación junto con las conclusiones:

Hipótesis 1 : Una solución al problema de RHZAV estructuralmente sólida y operativa puede ser diseñada.

La primera parte de la hipótesis que trata sobre la resistencia se comprueba al comparar el valor de momento nominal de la Ecuación 5.4 con el valor de M_{max} de la Tabla 5.3 para una altura máxima de cuelgue de viga h_{pa} de 32 cm, por lo tanto, la hipótesis es válida.

La segunda parte de la hipótesis requirió que la prueba de terreno fuese modificada debido al riesgo que existe al usar tecnología no certificada. Al utilizar la guía de borde de la empresa de encofrados Peri, se observó que requería pocos pasos para su instalación y poco tiempo. La Figura 7.3(b) muestra el uso exitoso de la guía de borde para soportar el encofrado. Un problema

que hubo con la calidad resultante y la forma de instalación será discutido más adelante.

Hipótesis 2 : Pruebas de laboratorio probarán que la solución de la hipótesis 1 proporcionará suficiente resistencia de soporte.

Se realizó un ensayo del soporte en LEMCO, donde se midió la fuerza aplicada versus deformación. Se simuló una situación de terreno otorgando valores a las dimensiones del panel de encofrado y a la altura de la viga a encofrar. Con esto se determinó la posición de la fuerza, que se aplicó con una gata hidráulica. Las deformaciones se midieron con un transformador diferencial de variación lineal. El gráfico de la Figura 6.4 muestra los resultados del ensayo y de un análisis estático adicional, calculado de forma manual y con software. La cercanía de la curva del ensayo con las del análisis estático afirman que el experimento ha sido ejecutado apropiadamente.

Al comparar los valores del ensayo con los del análisis, se observa que el soporte resistió una fuerza mayor a lo determinado por el análisis, para la misma deformación. En conclusión, la prueba de laboratorio fue realizada exitosamente, y los resultados afirman la hipótesis número 2.

Ya que la fuerza no se aplicó en forma continua debido al bombeo de gata hidráulica, no fue posible establecer un punto de fluencia.

Hipótesis 3 : Pruebas de terreno mostrarán que la solución para la hipótesis 1 creará resaltes de hormigón que se encuentran dentro de las tolerancias aceptadas.

Un asunto muy importante que no fue considerado en la declaración de esta hipótesis fue la influencia de la calidad de la mano de obra, Por lo tanto, esto tiene que ser considerado en las conclusiones para esta hipótesis.

Otro asunto que se observó en terreno fue que el contratista no siguió como tolerancia el límite entregado por la CDT, sino que utilizó un espesor menor, de 3 mm.

De la Figura 7.7 se observa que en promedio los resaltes medidos en las superficies que sí utilizaron la guía de borde (método nuevo) están bajo la tolerancia máxima establecida por la CDT para muros de obra gruesa (8 mm). Las superficies que no utilizaron la guía de borde (método actual) también se encuentran bajo estas tolerancias, excepto en el caso de la superficie A2 en el piso 5. Para la tolerancia observada en terreno, la superficie A3P4 está sobre ésta en un 17 %.

De la Figura 7.8 se observa que al cambiar el tipo de encofrado usando la guía de borde hubo una disminución en el promedio de los espesores en un 74 % y 76 % para A1 y A3.

Entonces, el uso de la guía de borde sí disminuye el espesor de los resaltes, y sólo en 1 de las 11 superficies éstos estuvieron sobre la tolerancia establecida por el contratista, en consecuencia, la hipótesis 3 es válida.

De las regresiones realizadas de los promedios de los resaltes versus la longitud de muro medida, no hay datos suficientes para concluir sobre una tendencia de los datos a aumentar con la longitud de muro medida. Lo mismo ocurre para los datos de dispersión versus longitud.

Retomando el primer aspecto relacionado con la calidad de la mano de obra, cuando la guía de borde no fue instalada de forma vertical y según las indicaciones del fabricante, se produjeron espesores que sobrepasaron las tolerancias permitidas, como es el caso de la superficie N1 en el piso 5, y N3 y A7 en los pisos 5 y 6, en los cuales los datos se dejaron fuera del análisis. Se concluye entonces, que aunque se tenga la mejor tecnología disponible, si los trabajadores no son capacitados para poder implementar correctamente, no se produce ninguna mejora, y esto ha sido probado en esta memoria.

Sugerencias y recomendaciones

En esta sección se discutirán algunas sugerencias para el uso de encofrados y para la realización de una futura investigación:

1. Los fabricantes de encofrado tienen un área dedicada a la capacitación y supervisión de los productos en terreno. Pero según lo demostrado en esta memoria, se recomienda además de hacer una capacitación enfocada en la calidad del resultado. Además, se sugiere que el control en obra se complemente con tecnología que obtenga información en tiempo real y desde varias ubicaciones.

2. Durante esta memoria la recolección de datos se hizo durante visitas periódicas a terreno y en un horario que no afectara el desarrollo normal de la obra. Esto produjo que no se obtuviera información más detallada, y se hayan perdido algunas mediciones. Es por ello,

que también se recomienda que las observaciones y mediciones en terreno se puedan realizar con ayuda de tecnología en tiempo real.

Futuras investigaciones

Se puede seguir investigando sobre la calidad superficial de los muros asociada al uso de encofrados. En esta sección se nombrarán y discutirán algunas ideas para continuar con la investigación:

1. En esta memoria se probó sólo un diseño de soporte. Se había diseñado y fabricado otro soporte adicional con diferentes características, del cual es necesario realizar los cálculos de resistencia y realizar una prueba en terreno para realizar una comparación entre tecnologías y determinar un óptimo.

2. La Figura 7.12 muestra una regresión lineal realizada con los promedios de los espesores con respecto a la longitud de muro medida. Debido a que se consideraron 5 superficies, la cantidad de datos para hacer la regresión fue muy pequeña. Es necesario hacer mediciones con un mayor rango de longitudes para establecer una relación.

3. Durante las observaciones en terreno se observaron resaltes no sólo en la zona de anclaje de vigas. También se observaron en las juntas horizontales de muro-losa de la caja escala, produciéndose resaltes de espesor aún mayor. Sería interesante observar y estudiar este problema, probando una solución y hacer una comparación entre ambos casos.

Bibliografía

ACI Committee 117 (2014). *ACI 117. 1R-14 Guide for Tolerance Compatibility in Concrete Construction*. American Concrete Institute.

ACI Committee 347 (2005). *Guide to Formwork for Concrete*. American Concrete Institute.

AISC Committee (2010). *Specification for Structural Steel Buildings*. Chicago, Illinois: American Institute of Steel Construction.

Arslan, Metin (2002). Effects of drainer formworks on concrete lateral pressure. *Construction and Building Materials*, 16, 253–259.

Arslan, Metin; Şimşek, Osman; y Subaşi, Serkan (2005). Effects of formwork surface materials on concrete lateral pressure. *Construction and Building Materials*, 19(4), 319–325.

Bernold, L.E. y Lee, T.S. (2010). Experimental Research in Construction. *Journal of Construction Engineering and Management*, 136(1), 26–35.

Bernold, Leonhard E. (2013). *Construction Equipment and Methods: Planning, Innovation, Safety*. Wiley.

Bernold, Leonhard E. y AbouRizk, S. M. (2010). *Managing Performance in Construction*. Wiley.

Billberg, P.; Silfwerberand, J.; y Osterberg, T. (2005). Form pressures generated by selfconsolidating concrete. *Concrete Int*, 27(10), 35–42.

Chahrour, Ali H.; Soudki, Khaled A.; y Straube, John (2005). RBS polymer encased concrete wall part I: Experimental study and theoretical provisions for flexure and shear. *Construction and Building Materials*, 19(7), 550–563.

Corporación de Desarrollo Tecnológico (2013). Manual de Tolerancias CDT. https://www.siena.cl/wp-content/uploads/2014/11/Manual-de-Tolerancias-CCHC-2013.pdf.

Doka GmbH (2017). Tie rod system Monotec.

Gardner, N.J (1985). Pressure of Concrete on Formwork - A Review. *Journal Proceedings*, 82(5), 744–753.

Gardner, N.J.; Keller, L.; Quattrociocchi, R.; y Charitou, G. (2012). Field investigation of wall formwork pressures using self consolidating concrete. *Concrete Int*, 34(1), 41–47.

Gardner, N. J. y Quereshi, A. R. (1979). Internal vibration and the lateral pressure exerted by fresh concrete. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 6(4), 592–600.

Grand View Research (2016). Ready-mix concrete market size to reach usd 954.7 billion by 2024. [En línea]. http://www.grandviewresearch.com/press-release/global-ready-mix-concrete-market.

Gregori, A.; Ferron, R.P.; Sun, Z.; y Shah, S.P. (2008). Experimental simulation of selfconsolidating concrete formwork pressure. *ACI Mater J 2008*, 105, 97–104.

Hilti Inc. (2017). Product Tech Guide Supplement X-u and X-P Fasteners.

Jaafari, A.; Kew, Y. C.; y Yeoh, C. K. (1989). Alternative methods for construction of vertically-formed concrete structures. *Institution of Engineers, Australia, Civil Engineering Transactions*, (pp. 54–62).

León, Juan Carlos y García, Francisco (2013). *Análisis de la Productividad en Obras de Edificación en Chile*. Technical report, Corporación de Desarrollo Tecnológico, Cámara Chilena de la Construcción. http://www.cdt.cl/download/1436/.

McCarthy, R. y Silfwerbrand, J. (2011). Comparison of three methods to measure formwork pressure when using SCC. *Concrete Int*, 33(6), 27–32.

Nielsen et al. (1990). [En línea]. http://www.cesmec.cl/cgi-bin/descarga_documento.cgi/CESMEC%20-%20Emilio%20Fernandez.pdf?id=2668.

PERI GmbH (2007a). Domino panel formwork assembly instructions for standard application. [En línea]. http://www.peri.ee/files/pdf3/DOMINO_Kasutusjuhend_ENG.pdf.

PERI GmbH (2007b). MULTIFLEX Girder slab formwork Assembly Instructions for Standard Application.

PERI GmbH (2009). Formwork component catalogue. [En línea]. https://www.peri.lt/dam/jcr.../peri_komponentu_katalogas_klojiniams_2015_en.pdf.

Rteil, A.; Soudki, K.; y Richardson, D. (2008). Flexural Behavior of Octaform™. *Forming System*, 257(9), 133–148.

Santilli, A y Puente, I (2013). An empirical model to predict fresh concrete lateral pressure. *Construction and Building Materials*, 47, 379–388.

Santilli, A; Puente, I; y Lopez, A (2010). Rate of placement discussion for the validation of experimental models of fresh concrete lateral pressure in columns. *Construction and Building Materials*, 24(6), 934–945.

Santilli, A; Puente, I; y Tanco, M (2011). A factorial design study to determine the significant parameters of fresh concrete lateral pressure and initial rate of pressure decay. *Construction and Building Materials*, 25(4), 1946–1955.

Schweitzer, Jürgen; Kochkine, Vitali; Schwieger, Volker; y Berner, Fritz (2012). Quality assurance in building construction, based on engineering geodesy processes. In *FIG Working Week 2012* (pp.Ĩ6).

Sehlz, J. (2010). Aufbau eines Qualitätsmanagement-Systems nach ISO9000 ff. In *Qualitätsmanagement geodätischer Mess- und Auswerteverfahren* (pp. 33–46).

Talesnick, Mark y Katz, Amnon (2012). Measuring lateral pressure of concrete : From casting through hardening. *Construction and Building Materials*, 34, 211–217.

The Economist (2017). Efficiency eludes the construction industry. [En línea]. https://www.economist.com/news/business/21726714-american-builders-productivity-has-plunged-half-late-1960s-efficiency-eludes

Wahab, Noran y Soudki, Khaled A. (2013). Flexural behavior of PVC stay-in-place formed RC walls. *Construction and Building Materials*, 48, 830–839.

WorldCement (2016). Global demand for cement to reach 5.2 billion t. [En línea]. https://www.worldcement.com/europe-cis/27082015/global-demand-cement-billion-tons-449/.

Zhang, Wenxue; Huang, Jian; Li, Zengyin; y Huang, Chun (2016). An experimental study on the lateral pressure of fresh concrete in formwork. *Construction and Building Materials*, 111, 450–460.

.

A Anexo: Especificaciones para calcular la presión del hormigón fresco

A.1. ACI Committee 347

ACI Committee 347 (2005), establece un modelo donde el valor de la presión es hidrostático hasta un valor máximo (p_{max}), el cual permanece constante hacia abajo hasta el fondo del encofrado.

Para hormigón con un asentamiento de 175 mm o menos y colocado con vibración interna normal a una profundidad de 1,2 m o menos, el encofrado debe ser diseñado para una presión lateral como se indica a continuación, donde p_{max} = máxima presión lateral, kPa; R = tasa de colocación, m/h; T = temperatura del hormigón durante la colocación, ^oC; C_w = coeficiente de peso unitario; C_C = coeficiente químico.

Para muros con $R < 2{,}1$ m/h y $H < 4{,}2$ m :

$$p_{max} = C_w C_C \left[7{,}2 + \frac{785R}{T + 17{,}8}\right] \tag{A.1}$$

Para muros con $R < 2{,}1$ m/h y $H > 4{,}2$ m y todos los muros con tasas de colocación entre 2,1 y 4,5 m/h:

$$p_{max} = C_w C_C \left[7{,}2 + \frac{1156}{T + 17{,}8} + \frac{244R}{T + 17{,}8}\right] \tag{A.2}$$

con un mínimo de $30C_w$ kPa, pero en ningún caso mayor que ρgh.

Si las condiciones anteriores no son conocidas, se utiliza la Ecuación A.3:

$$p = \rho g h \tag{A.3}$$

[kPa]

donde

p = presión lateral $[kPa]$
ρ = densidad del hormigón $[kg/m^3]$
h = profundidad del concreto fluido o plástico desde la superficie de colocación hasta el punto de consideración en el encofrado $[m]$

A.2. CIRIA Report 108

Propone un modelo donde el valor de la presión es hidrostático hasta un valor máximo (p_{max}), el cual permanece constante hacia abajo hasta el fondo del encofrado. El valor de p_{max} es determinado por la Ecuación A.4, y debe ser siempre menor o igual a la distribución hidrostática.

$$p_{max} = \left[C_1 \sqrt{R} + C_2 K \sqrt{H_1 - C1 \sqrt{R}} \right] \gamma \tag{A.4}$$

donde p_{max} es la máxima presión lateral $[kPa]$, C_1 es un coeficiente que depende del tamaño y forma del encofrado, C_2 es un coeficiente que depende de los materiales cementosos, γ es el peso específico del hormigón $[kN/m^3]$, H_1 es la altura del encofrado vertical $[m]$, K es un coeficiente que depende de la temperatura del hormigón, y R es la tasa de colocación $[m/h]$.

A.3. DIN 18218

Propone una envolvente donde la presión lateral es hidrostática hasta un valor máximo el cual permanece constante hacia abajo hasta el valor mínimo entre la altura del encofrado o profundidad de endurecimiento del hormigón que es determinada por el producto entre el tiempo de fraguado del hormigón, t_E y la tasa de colocación. Si el último valor es mínimo, entonces la presión es cero hasta esa altura. El valor general de la máxima presión lateral se expresa en la siguiente ecuación:

$$p_{max} = (\alpha R + \beta)\, K_D$$

donde

p_{max}	=	máxima presión lateral $[kPa]$
R	=	tasa de colocación m/h
α, β	=	coeficientes que dependen de la consistencia del hormigón
K_D	=	coeficiente que depende del tiempo de fraguado del hormigón, t_E

Esta envolvente de presión es sólo válida para una temperatura de 15 ^oC, peso específico del hormigón de 25 kN/m^3 y según las clases F1-F4 de categorías de consistencia establecidas por la UNE-EN 206-1 para tasas de colocación bajo los 7 m/h, se detallan las siguientes ecuaciones:

Clase F1	:	$p_{max} = (5R + 21)K_D$	≥ 25
Clase F2	:	$p_{max} = (10R + 19)K_D$	≥ 25
Clase F3	:	$p_{max} = (14R + 18)K_D$	≥ 25
Clase F4	:	$p_{max} = (17R + 17)K_D$	≥ 25
Clase F5	:	$p_{max} = 44RK_D$	≥ 30
Clase F6	:	$p_{max} = 65{,}5RK_D$	≥ 30

B Anexo: Cálculo de resistencia

Ecuación de diseño:

$$\phi_b R_n \geq R_u \tag{B.1}$$

donde

ϕ	=	factor de reducción de resistencia
R_n	=	resistencia nominal
R_u	=	resistencia requerida

Propiedades de los materiales

Perfil de acero A37-24ES:

E	=	$2{,}4 \cdot 10^6$	$[kgf/cm^2]$
F_u	=	3700	$[kgf/cm^2]$
F_y	=	2400	$[kgf/cm^2]$

Geometría y propiedades de la sección

Dimensiones [mm]		
	D	40
	B	40
	t	2
	R	3
Inercia $/10^6$ $[mm^4]$		
	$I_x = I_y$	0.0680
Módulo plástico $/10^3$ $[mm^3]$		
	$Z = Z_x = Z_y$	4.06
Esbeltez		
b/t		15
h/t		15

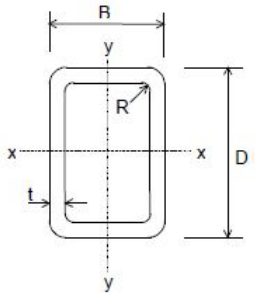


Figura B.1: Sección transversal perfil
(Fuente: Elaboración propia)

B.1. Resistencia nominal

Se calculó de acuerdo a la norma AISC Committee (2010)

B.1.1. Resistencia a flexión

Se verificó para los estados límites de fluencia y pandeo local.

Fluencia

(Ec. F7-1)

$$M_n = M_p = F_y \cdot Z = 97{,}44 \quad [kgf \cdot m] \tag{B.2}$$

Pandeo local

- Esbelteces límite

  Caso 17, Tabla 4.1b

$$\lambda_p = 1{,}12\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 32{,}65$$

$$\lambda_r = 1{,}4\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 40{,}87$$

$$\implies b/t < \lambda_p < \lambda_r$$

  Caso 19, tabla 4.1b

$$\lambda_p = 2{,}42\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 70{,}56$$

$$\lambda_r = 5{,}7\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 166{,}18$$

$$\implies h/t < \lambda_p < \lambda_r$$

Comparando con la tabla B.4.1b, la sección es compacta, y de acuerdo a la sección F7.2(a) el estado límite de pandeo local no aplica.

Resistencia nominal a flexión

Aplicando el factor de reducción de resistencia $\phi_b = 0{,}9$, la resistencia nominal a flexión es:

$$\phi_b M_n = 87{,}70 \quad [kgf \cdot m] \tag{B.3}$$

B.1.2. Resistencia al corte

De acuerdo a la sección G5, se calculó con la ecuación G2-1:

$$V_n = 0{,}6 F_y A_w C_v \quad [kgf] \tag{B.4}$$

- $A_w = 2ht = 120mm^2$
- C_v (G2.1(b)):

$$k_v : h/t < 260 : k_v = 5$$

$$(i) 1{,}1 \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{F_y}} = 71{,}71$$

$$\implies h/t < 1{,}1 \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{F_y}}$$

$$C_v = 1{,}0$$

$$V_n = 1728 \quad [kgf] \tag{B.5}$$

Resistencia nominal al corte

Aplicando el factor de reducción de resistencia $\phi_v = 0{,}9$, la resistencia nominal al corte es:

$$\phi_v V_n = 1555 \quad [kgf] \tag{B.6}$$

B.2. Resistencia requerida

B.2.1. Cálculo de solicitaciones

Expresiones para la presión

Las presiones p_0, p_1 y p_2 que aparecen en la figura 5.2(a) se calcularon según las siguientes expresiones:

$$p_0 = \gamma \cdot e_{losa} \tag{B.7}$$

$$p_1 = \gamma \cdot \left(e_{losa} + h_{pa} - d_{ap}\right) \tag{B.8}$$

$$p_2 = \gamma \cdot \left(e_{losa} + \frac{h_{pa}}{4}\right) \tag{B.9}$$

Por lo tanto, las fuerzas puntuales se calculan según:

$$F_0 = \frac{1}{2}\left(p_2 + p_0\right)\left(\frac{h_{pa}}{4}\right)L_{pa} \tag{B.10}$$

$$F_2 = \frac{1}{2}\left(p_1 + p_2\right)\left(\frac{3h_{pa}}{4} - d_{ap}\right)L_{pa} \tag{B.11}$$

B.2.2. Fuerzas internas

Reacciones

$$\Sigma F_H: \quad H_1 - H_2 = F_0 + F_2 \tag{B.12}$$

$$\Sigma M: \quad H_2\left(L_{pe'} - d_2\right) - F_2\left(d_2 - \frac{h_{pa}}{2}\right) - F_2 \cdot d_2 = 0 \tag{B.13}$$

entonces

$$H_2 = \left(F_0 \cdot d_2 + F_2 \cdot \left(d_2 - \frac{h_{pa}}{2}\right)\right)\frac{1}{L_{pe'} - d_2} \tag{B.14}$$

$$H_1 = F_0 + F_2 + \left(F_0 \cdot d_2 + F_2 \cdot \left(d_2 - \frac{h_{pa}}{2}\right)\right)\frac{1}{L_{pe'} - d_2} \tag{B.15}$$

Fuerzas internas

Diagrama de corte

$$V(x) = \begin{cases} -H_2 & 0 \leq x \leq L_{pe} - d_2 \\ H_1 - H_2 & L_{pe} - d_2 \leq x \leq L_{pe} - \frac{h_{pa}}{2} \\ H_1 - H_2 - F_2 & L_{pe} - \frac{h_{pa}}{2} \leq x \leq L_{pe} \end{cases} \tag{B.16}$$

Diagrama de momento

$$M(x) = \begin{cases} -H_2 \cdot x & 0 \leq x \leq L_{pe} - d_2 \\ -H_2 \cdot x + H_1 \left(x - \left(L_{pe} - d_2 \right) \right) & L_{pe} - d_2 \leq x \leq L_{pe} - \frac{h_{pa}}{2} \\ -H_2 \cdot x + H_1 \left(x - \left(L_{pe} - d_2 \right) \right) - F_2 \left(x - \left(L_{pe} - \frac{h_{pa}}{2} \right) \right) & L_{pe} - \frac{h_{pa}}{2} \leq x \leq L_{pe} \end{cases} \tag{B.17}$$

$$M_{max} = -H_2 \cdot x \quad x = L_{pe} - d_2 \tag{B.18}$$

B.2.3. Resultados

Valores de los parámetros

γ	=	2.5	$\left[Tf/m^3\right]$
e_{losa}	=	15	$[cm]$
d_{ap}	=	5	$[cm]$
d_2	=	47	$[cm]$
L_{pe}	=	120	$[cm]$
L_{pa}	=	120	$[cm]$

entonces,

Tabla B.1: Cálculo resistencia requerida en función de h_{pa}

h_{pa} $[cm]$	$h_{pa}-d_{ap}$ $[cm]$	M_{max} $[kgf \cdot m]$	V_{max} $[kgf]$
35	30	80.33	244.94
36	31	83.22	257.32
37	32	86.08	269.98
38	33	88.92	282.90
39	34	91.71	296.10
40	35	94.47	309.57
41	36	97.19	323.32
42	37	99.86	337.34

De acuerdo con el valor del momento nominal $\phi_b M_n = 87{,}70 \quad [kgf \cdot m]$, el valor máximo de altura de cuelgue de viga $h_{pa} - d_{ap}$ es de $32\,[cm]$.

C Anexo: Mediciones de los espesores de los resaltes

C.1. Espesores de los resaltes

Tabla C.1: Mediciones de los espesores de los resaltes

					RESALTES [mm]									
PISO	**ID**	**FECHA**	**MÉTODO**	**PASO [cm]**	**M1**	**M2**	**M3**	**M4**	**M5**	**M6**	**M7**	**M8**	**M9**	**M10**
4	A1	26-Oct	ACTUAL	24	1	2	3	3	3	1	3	5	4	4
5	A1	8-Nov	NUEVO	24	0	0	1	0	1	2	2	1	2	2
6	A1	28-Nov	NUEVO	24	0	0	1	2	1	0	0	0	0	0
4	A2	26-Oct	ACTUAL	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	A2	28-Oct	ACTUAL	7	20	20	22	20	20	18	15	12	11	11
6	A2	28-Nov	ACTUAL	7	0	0	4	3	3	3	3	3	4	2
4	A3	26-Oct	ACTUAL	15	4	5	4	4	5	4	3	3	2	1
5	A3	8-Nov	NUEVO	15	1	1	0	1	2	2	3	1	1	1
6	A3	28-Nov	NUEVO	15	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0
4	A7	27-Oct	ACTUAL	6	7	5	3	2	0	0	0	0	0	0
5	A7	17-Nov	NUEVO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	A7	28-Nov	NUEVO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	N1	26-Oct	NUEVO	45	0	0	0	2	1	0	0	0	1	0
5	N1	8-Nov	NUEVO	45	10	7	5	2	1	1	3	3	2	1
6	N1	28-Nov	NUEVO	45	5	3	1	1	2	0	2	2	1	5
4	N2	28-Oct	NUEVO	17	1	0	0	2	3	3	3	1	2	3
5	N2	14-Nov	NUEVO	17	7	1	2	3	3	2	1	0	0	1
6	N2	28-Nov	NUEVO	17	5	2	0	1	2	3	1	2	1	3
4	N3	27-Oct	NUEVO	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	N3	17-Nov	NUEVO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	N3	28-Nov	ACTUAL	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-[2]

[2]Indica que no hubo medición.

Tabla C.2: Promedio y desviación estándar de los espesores de los resaltes

PISO	ID	MÉTODO	PROMEDIO [cm]	DESV-EST
4	A1	ACTUAL	2,9	1,22
5	A1	NUEVO	1,1	0,83
6	A1	NUEVO	0,4	0,66
4	A2	ACTUAL	-	-
5	A2	ACTUAL	16,9	4,25
6	A2	ACTUAL	2,5	1,36
4	A3	ACTUAL	3,5	1,20
5	A3	NUEVO	1,3	0,78
6	A3	NUEVO	0,4	0,49
4	A7	ACTUAL	1,7	2,41
5	A7	NUEVO	-	-
6	A7	NUEVO	-	-
4	N1	NUEVO	0,4	0,66
5	N1	NUEVO	3,5	2,84
6	N1	NUEVO	2,2	1,6
4	N2	NUEVO	1,8	1,17
5	N2	NUEVO	2,0	1,95
6	N2	NUEVO	2,0	1,34
4	N3	NUEVO	0	0,00
5	N3	NUEVO	-	-
6	N3	ACTUAL	-	-[3]

C.2. Detalle del encofrado instalado

[3] Indica que no hubo medición.

Tabla C.3: Detalle del encofrado instalado

				GUIAS DE BORDE				VIGAS		PLACAS		
PISO	**ID**	**FECHA**	**MÉTODO**	**Cantidad**	**separac. entre [m]**	**dist. ext. izq [m]**	**dist. ext. der [m]**	**Cantidad vertical**	**Tipo**	**Espesor [mm]**	**Alto [cm]**	**Longitud muro [m]**
4	A1	26-Oct	ACTUAL	0	-	-	-	1	VT20	19	55-60	2.40
5	A1	8-Nov	NUEVO	2	1.15	-	-	2	GT24	-	55-60	2.40
6	A1	28-Nov	NUEVO	2	1.20	-	-	2	VT20	22	57	2.40
4	A2	26-Oct	ACTUAL	0	-	-	-	1	VT20	-	55-60	0.77
5	A2	28-Oct	ACTUAL	0	-	-	-	2	VT20-GT24	-	55-60	0.77
6	A2	28-Nov	ACTUAL	0	-	-	-	2	VT20	22	63	0.77
4	A3	26-Oct	ACTUAL	0	-	-	-	1	VT20	-	55-60	1.45
5	A3	8-Nov	NUEVO	1	-	0.35	1.10	2	VT20	-	55-60	1.45
6	A3	28-Nov	NUEVO	1	-	0.90	0.50	2	VT20	22	57	1.45
4	A7	27-Oct	ACTUAL	0	-	-	-	0	-	-	40	0.60
5	A7	17-Nov	NUEVO	1	-	0.30	-	2	VT20	-	55	-
6	A7	28-Nov	NUEVO	1	-	0.30	-	1	GT24	22	65	0.60
4	N1	26-Oct	NUEVO	3	1.20	0.95	0.80	2	VT20	20	50-55	4.15
5	N1	8-Nov	NUEVO	3	1.30-1.70	-	-	2	GT24	-	55	4.15
6	N1	28-Nov	NUEVO	2	0.50	-	-	1	GT24	22	50	4.15
4	N2	28-Oct	NUEVO	2	0.50	-	-	1	GT24	-	40-50	1.70
5	N2	14-Nov	NUEVO	2	1.15	-	-	2	VT20-GT24	-	50	1.70
6	N2	28-Nov	NUEVO	2	1.20	-	-	2	GT24	22	60	1.70
4	N3	27-Oct	NUEVO	1	-	0.80	-	1	VT20	-	60	0.6
5	N3	17-Nov	NUEVO	1	1.15	-	-	2.00	VT20-GT24	-	50	-
6	N3	28-Nov	ACTUAL	-	-	-	-	1	GT24	22	65	-[4]

C.3. Reparaciones

Tabla C.4: Cubicación reparaciones efectuadas

				Dimensiones		Tiempo [hr]		Mano de Obra
PISO	**ID**	**FECHA**	**MÉTODO**	**Alto [cm]**	**Ancho [cm]**	**Cincelado**	**Total**	**[HD]**
4	A1	26-Oct	ACTUAL	-	-	-	-	-
5	A1	8-Nov	NUEVO	24	185	-	-	-
6	A1	28-Nov	NUEVO	-	-	-	-	-
4	A2	26-Oct	ACTUAL	34	220	2	8	1
5	A2	28-Oct	ACTUAL	10	75	-	-	-
6	A2	28-Nov	ACTUAL	-	-	-	-	-
4	A3	26-Oct	ACTUAL	-	-	-	-	-
5	A3	8-Nov	NUEVO	15	145	-	-	-
6	A3	28-Nov	NUEVO	-	-	-	-	-
4	A7	27-Oct	ACTUAL	-	-	-	-	-
5	A7	17-Nov	NUEVO	-	-	-	-	-
6	A7	28-Nov	NUEVO	-	-	-	-	-
4	N1	26-Oct	NUEVO	-	-	-	-	-
5	N1	8-Nov	NUEVO	-	-	-	-	-
6	N1	28-Nov	NUEVO	-	-	-	-	-
4	N2	28-Oct	NUEVO	-	-	-	-	-
5	N2	14-Nov	NUEVO	-	-	-	-	-
6	N2	28-Nov	NUEVO	-	-	-	-	-
4	N3	27-Oct	NUEVO	-	-	-	-	-
5	N3	17-Nov	NUEVO	-	-	-	-	-
6	N3	28-Nov	ACTUAL	-	-	-	-	-[5]

[4]Indica que no hubo medición.
[5]Indica que no hubo medición.