UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES

HACIA LA REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS EN LA CONSTRUCCIÓN: MEJORAS EN EL PROCESO CONSTRUCTIVO DE VENTANAS

Memoria de Titulación presentada por:
SASHA SCHÜCK PARRA

Como requisito parcial para optar al título de:
INGENIERO CIVIL

Profesor Guía
Ph.D. LEONHARD E. BERNOLD

Valparaíso, 2016

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, y en especial, agradecer a mi familia y a Valeska, que ya es parte de mi familia, por el constante apoyo durante este largo proceso. Por haberme ayudado a seguir adelante y por haberme soportado en los momentos difíciles. Sin duda que sin su apoyo no habría llegado tan lejos, y en gran parte, este triunfo es gracias a ellos.

En segundo lugar, a mis amigos y compañeros, quienes siempre estuvieron presente. Ya sea haciendo las tareas, estudiando y luego celebrando o pasando las penas juntos. A pesar de que con la mayoría nuestros caminos divergen, no me queda duda que siempre mantendremos el contacto y la confianza.

En tercer lugar, a Leonhard, mi Profesor guía, por todo el tiempo para resolver dudas o llevar a cabo revisiones, y que, a pesar de haberme dificultado la vida por varios meses, sé que lo hizo con la mejor de las intenciones académicas.

En cuarto lugar, quisiera agradecer a las empresas donde hice mis prácticas, Teck Mining Company, BHP Billiton y la University of Arizona. También a ellas que me asesoraron durante esta investigación: Inmobiliaria Dhelos, Constructora Inpromec, Ventanas Aluvima, Doka Chile Enconfrados y Soinsa Encofrados.

RESUMEN

Numerosos estudios acerca de la industria de la construcción destacan los altos riesgos de accidentes, problemas con la baja calidad y las altas pérdidas de tiempo y materiales (denominadas pérdidas productivas o *muda* del japonés). El objetivo principal de esta tesis es estudiar el efecto de aplicar el concepto de la eliminación preventiva de las pérdidas, o cero pérdidas, en un proceso constructivo en Chile.

El proyecto comienza con revisar los principios, la historia y los resultados recientes de aplicar el concepto cero pérdidas en la construcción. A su vez, se presenta un modelo integrado de los procesos de la construcción, el cual tiene como característica principal la disponibilidad de datos e información del trabajo en curso y de los recursos. Algunos instrumentos que permiten generar dichos flujos de información son presentados. Adicionalmente, se presentan numerosos estudios que han demostrado que la prefabricación es una metodología constructiva eficiente que resulta en una reducción de las pérdidas.

El trabajo se enfoca en evaluar el impacto del uso inapropiado del encofrado de términos de muro que originan vanos de ventanas, en la estandarización de las ventanas prefabricadas de edificios habitacionales en altura de hormigón. En esta tesis se postula que la calidad de los vanos de hormigón hechos in situ no permiten la implementación de la fabricación en serie de las ventanas. La consecuencia, es que éstas se deben hacer a la medida, resultando en un mayor costo unitario y en un mayor tiempo de fabricación.

La metodología de investigación consta de cuatro etapas. La primera, es realizar un trabajo en terreno para identificar la causa fundamental del problema. Para ello, en base a exhaustivas observaciones, se genera un modelo integrado de los procesos relacionados a las ventanas, y un modelo causa-efecto. En base a los modelos, se determina la causa principal del problema: la falta de un soporte para el molde de las jambas en términos de muro. Esto debido a que el encofrado se utiliza de forma distinta para el cual fue diseñado cuando la longitud de los muros no coincide con la modulación de los paneles de moldaje, recurriendo a sistemas de soporte rudimentarios ideados en obra.

La segunda etapa de la metodología, presenta cómo se cuantificarán las pérdidas que son consecuencia del problema estudiado. En la etapa tres, se presenta el estudio, diseño y desarrollo de un nuevo soporte para reemplazar al rudimentario empleado en la práctica, con el objetivo de eliminar la causa principal del problema para el caso de vanos originados en términos de muro.

Las pruebas del prototipo final del soporte fabricado, en la cuarta etapa, demostraron que la resistencia es inferior a la requerida, la cual es calculada mediante el análisis de las fuerzas provenientes de la presión del hormigón durante el vertido. Esto implica que el soporte debe ser mejorado antes de ser implementado en terreno. Sin embargo, si se mejorara y aplicara en obra, permitiría que las ventanas ubicadas en términos de muro fueran prefabricadas en masa, junto con eliminar los daños al encofrado y la necesidad de reparar cada vano. Se calcula que esto resulta en una reducción de un 14,9% las pérdidas en términos del costo unitario de ventana instalada, lo cual representa aproximadamente un 0,6% del costo total del edificio.

Palabras claves: Cero pérdidas, prefabricación, moldaje de término de muro, accesorios de encofrados.

ABSTRACT

Many governmental and investigative reports about the construction industry point to the high safety risks, problems with quality and the high physical and time wastes (from the Japanese concept, *Muda*). The objective of this thesis is to study the effect of applying the concept of preventive waste elimination, zero waste, to a construction process in Chile.

The project starts with reviewing the principles, the history and the recent results obtained of applying the zero waste concept in construction. Also, an integrated model of the construction processes will be shown, highlighting its key element; the availability of data and information related to the quality of the work-in-progress and the resources. Consequently, some example tools to produce the data will be shown. Additionally, numerous studies have also demonstrated the benefits of prefabrication as an effective method to achieve waste reduction.

The focus of the work is to assess the result of bad quality of concrete wall formwork around window openings on the standardization of prefabricated windows for high rise concrete buildings. The thesis asserts that the quality of the concrete openings built on-site prohibit the implementation of standardization in the factory. The consequence, is that custom size windows have to be built, costing considerably more money and more time to build.

The research methodology consists of four stages. The first one, is the field work to identify the key cause-and-effect relationship related to poor quality openings. In order to achieve this, two models are designed though extensive observations; an integrated window-related processes model, and a fishbone diagram of the problem. Using both models, the key cause was determined: the lack of an adequate support for the stop-end wall form. The problem occurs when the length of a wall section does not match any form size combinations, forcing the use of a rudimentary on-site made support system to overcome this issue.

The second stage of the methodology presents how the waste that is consequence of the problem is going to be quantified. The third stage contains the study, design and development of a new support, intended to replace the rudimentary on-site made one used traditionally, with the objective to eliminate the key cause.

The tests conducted on the final prototype fabricated, shown in the fourth stage, demonstrated that the measured strength it is lower than the required design value, which was calculated through an analysis of loads caused by the lateral pressure of fresh concrete. This implies that the support must be improved before being implemented in the field. Nevertheless, if it is improved and used, it would allow the incorporation of mass prefabricated windows, along with preventing the formwork damage and the required repairs of each opening caused by the current system. Based on this analysis, a 14,9% waste reduction calculated in terms of the cost per m^2 of installed window can be achieved, which represents around a 0,6% of the total cost of a building.

Key words: Zero waste, prefabrication, stop-end formwork, formwork accessories.

GLOSARIO

Alféizar: Plano inferior del rasgo de una ventana.

Bastidor: Conjunto de perfiles que forman el armazón de la hoja de puertas y ventanas, o de elementos fijos similares a ésta.

Construcción modular: Es un proceso de manufactura definido por el uso de prefabricación y pre-ensamblado en una ubicación alejada, con la finalidad de producir componentes volumétricos, o módulos, los cuales son transportados hacia el sitio de construcción como componentes grandes terminados.

Encofrado: También denominado *moldajes*, es el sistema de soporte completo para el hormigón recién colocado, incluidos los moldes o revestimientos que hacen contacto con el hormigón y todos los miembros de apoyo, accesorios, y soportes necesarios.

Hoja: Elemento móvil de una puerta o una ventana

Herrajes: Conjunto de piezas utilizadas como elemento de enlace, movimiento o maniobra de una puerta o ventana.

Jamba: Cada una de las dos piezas que, dispuestas verticalmente en los dos lados de una puerta o ventana, sostienen el dintel o el arco de ella. También se le denomina jamba al elemento lateral vertical del marco o centro. La palabra procede del francés: *jambe*, que significa pierna, razón por la cual en obra le denominan *pierna de muro*.

Junquillo: Elemento que fija el vidrio o panel al bastidor.

Marco: Elemento fijo al vano, que no cubre su espesor total o tabique respectivo; tiene por finalidad, la colocación de hojas de puertas y ventanas, o de elementos fijos.

Modularización: Proceso de manufactura definido por el uso de prefabricación y pre-ensamblado en una ubicación alejada, con la finalidad de producir componentes volumétricos, o módulos, los cuales son transportados hacia el sitio de construcción como componentes grandes terminados.

Panel de muro: Es una estructura temporal o molde para el soporte del hormigón mientras fragua y obtiene una resistencia suficiente para ser auto-soportante. Para efectos de esta tesis se consideran modulares, los cuales están compuestos generalmente por un bastidor metálico que rodea a una placa fenólica.

Placa fenólica: Es un tablero contrachapado, realizado generalmente con láminas de abedul alternadas, y con un film de resina fenólica reforzada. Se utiliza como la cara de contacto del molde con el hormigón.

Prefabricación: Es un proceso de manufactura fuera del sitio de construcción, que tiene lugar en una instalación especializada en donde diversos materiales y sistemas de construcción se unen para formar componentes o partes de una instalación final más grande.

Puerta: Elemento que permite regular el cierre de un vano transitable.

Sello: Material de características elásticas, usado para mejorar la resistencia de la puerta o ventana cerrada, a la infiltración del aire y a la penetración del agua.

Vano, rasgo: Abertura que establece la comunicación entre dos ambientes, sea ésta transitable o no.

Ventana: Elemento que permite regular el cierre de un vano no transitable.

Ventanal: Elemento compuesto de partes fijas y/o móviles, que separa un recinto de un ambiente exterior.

Puerta-ventana: Puerta vidriada al menos en un 50% de la superficie de la hoja, que separa un recinto del ambiente exterior.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN 15
1.1. ANTECEDENTES GENERALES 15
1.2. ALCANCES DEL ESTUDIO 16
1.3. ESTRUCTURA DEL ESTUDIO 17
CAPÍTULO 2: RECOPILACIÓN BIBLIOGRÁFICA 19
2.1. ESTADO DEL ARTE 19
2.1.1. Filosofía cero pérdidas 19
2.1.2. Prefabricación y modularización: Técnica constructiva que reduce las pérdidas 26
2.2. ESTADO DE LA PRÁCTICA 39
2.2.1. Ejemplos de construcción prefabricada en el extranjero 39
2.2.2. Ejemplos nacionales de construcción prefabricada 41
2.2.3. Otras buenas prácticas relacionadas con la memoria 44
CAPÍTULO 3: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 45
3.1. HIPÓTESIS 46
CAPÍTULO 4: METODOLOGÍA 47
4.1. MODELO DE LOS PROCESOS 47
4.1.1. Análisis del proceso de Obra gruesa 47
4.1.2. El proceso de terminaciones 48
4.1.3. Proceso de fabricación de las ventanas 49
4.1.4. Instalación 50
4.2. MODELACIÓN DEL PROBLEMA 53
4.2.1. Diseño 53
4.2.2. Encofrado 53
4.2.3. Mediciones 55
4.2.4. Hormigonado 55
4.3. METODOLOGÍA PARA CUANTIFICAR LAS PÉRDIDAS 56
4.3.1. Fabricante de ventanas 57
4.3.2. Proveedor de encofrados 57
4.3.3. Construcción in situ 58
4.4. METODOLOGÍA: CAPÍTULOS SIGUIENTES 58
CAPÍTULO 5: DISEÑO Y DESARROLLO DEL SOPORTE 59
5.1. ESTUDIO DE LAS SOLICITACIONES DEL ENCOFRADO DE MUROS 59
5.1.1. Análisis de las fuerzas actuantes sobre el soporte 59

5.1.2. Desplazamiento máximo deseado 61
5.1.3. Restricciones y respectivas características deseables de diseño 61
5.2. DISEÑO DEL SOPORTE 62
5.3. DISEÑO DE LA METODOLOGÍA DE INSTALACIÓN 64
5.4. DESARROLLO DEL SOPORTE 67
5.4.1. Mecanismo de sujeción 67
5.4.2. Bastidor 67
5.4.3. Mecanismo de avance 68
5.5. VERIFICACIÓN RESISTENCIA NOMINAL DEL SOPORTE 68
5.5.1. Verificación a pandeo 68
5.5.2. Verificación acortamiento elástico de la barra del mecanismo de avance 69
5.6. RESUMEN 70
CAPÍTULO 6: DISEÑO Y ESTABLECIMIENTO DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES DEL SOPORTE A CARGA AXIAL 71
6.1. SISTEMA DE PRUEBA PARA MEDIR LA FUERZA Y DESPLAZAMIENTO 71
6.1.1. Disposición de los elementos 71
6.2. ESTABLECIMIENTO DE LAS INSTALACIONES PARA EL EXPERIMENTO 72
6.2.1. Preparaciones y anclaje del encofrado 73
6.2.2. Sistema de carga e instrumentación 74
CAPÍTULO 7: ADQUISICIÓN DE DATOS Y ANÁLISIS 76
7.1. CUANTIFICACIÓN DE LA REDUCCIÓN DE LAS PÉRDIDAS 76
7.1.1. Criterios y supuestos 76
7.1.2. Datos para la cuantificación de las pérdidas 77
7.1.3. Cálculo de la reducción de las pérdidas 79
7.1.4. Reducción de las pérdidas en términos del costo total del edificio 80
7.2. COMPORTAMIENTO DEL NUEVO SOPORTE 81
7.2.1. Criterios de falla o de detención del ensayo 81
7.2.2. Tratamiento general de los datos 82
7.2.3. Ensayo 1: Apriete manual 83
7.2.4. Ensayo 2: Apriete manual 84
7.2.5. Ensayo 3: Apriete con herramienta 85
7.2.6. Ensayo 4: Apriete con herramienta y limpieza del panel 86
7.2.7. Análisis conjunto 87
7.2.8. Determinación de la capacidad de carga del nuevo soporte 89
7.2.9. Determinación de la cantidad de soportes necesarios 90

7.3. RECOMENDACIONES PARA MEJORAS FUTURAS 90
CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES 92
8.1. RECOMENDACIONES 93
8.2. OBSERVACIONES PERSONALES 94
REFERENCIAS 95
ANEXO A – LÁSERES PARA LA CONSTRUCCIÓN 102
ANEXO B – ENCOFRADOS 106
ANEXO C – MEDICIONES VANOS EN CONSTRUCCIÓN 110
ANEXO D – COTIZACIÓN CERROJO DOMINO DRS 111
ANEXO E – DETERMINACIÓN PRECIO UNITARIO VENTANA EN LA V REGIÓN ... 112

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Representación gráfica del método de los seis-sigma 24
Figura 2: Modelo del proceso de la construcción con control preventivo (Bernold & AbouRizk, 2010) 25
Figura 3: Relación entre el tamaño de los elementos prefabricados y la cantidad de trabajo en terreno (Schoenborn, 2012) 27
Figura 4: Principales beneficios potenciales de la prefabricación..... 28
Figura 5: Esquema que compara los procesos de construcción tradicional con los de la modular (MBI, 2011) 29
Figura 6: Condiciones de los puestos de trabajos de una fábrica de ventanas para edificos habitacionales 33
Figura 7: Potenciales obstáculos principales al adoptar la prefabricación 35
Figura 8: Construcción de Hotel en 360 horas, Hunan, China (Failed Architecture, 2013) 40
Figura 9: Instalación de los módulos del edificio CITYSPACE 38 en el sitio (MBI, 2015) 41
Figura 10: Bloque El Belloto, construido con el sistema KPD (PUCV, 2014)..... 42
Figura 11: (a) Campamento 5.400 – Minera Escondida (TECNO FAST, 2015a); (b) Campamento 2000 - Minera Doña Inés de Collahuasi (TECNO FAST, 2015b) 43
Figura 12: (a) Unión de viga-columna; (b) la unión incluyendo la terminación (MOMENTA, 2015) 44
Figura 13: Fotografías durante la construcción del edificio Chacay (MOMENTA, 2015)..... 44
Figura 14: Proceso constructivo de vanos originados como abertura de un muro: (a) paneles de muro; (b) molde de las jambas al interior del panel de muros; (c) vano y antepecho 46
Figura 15: Proceso constructivo de vanos en términos de muro: (a) paneles de dos muros coplanares; (b) molde de las jambas como tapas del moldaje; (c) vano entre dos muros o secciones de muro... 46
Figura 16: (a) Instalación del molde de la jamba hacia el interior de los extremos de los paneles de muro; (b) Descimbrado de muros, donde se observa la tabla claveteada que se utiliza como soporte; (c) Descimbrado del encofrado de viga y losa del piso superior, se observa la placa fenólica claveteada a la jamba hormigonada previamente..... 48
Figura 17: (a) Terminación gruesa del vano, consiste en aplicar mortero a todo el contorno de forma manual usando una llana; (b) Pierna de muro con capa de terminación gruesa; (c) Construcción del alféizar posterior a la terminación fina con yeso..... 49
Figura 18: (a) Corte de los perfiles de PVC, de acuerdo a la medida de cada vano, lo cual requiere ajustar la máquina para cada corte; (b) Termo-fusión realizada por una máquina, la cual también se debe ajustar para el tamaño de cada ventana; (c) Acopio de ventanas pre-armadas, donde se observa el código del vano al cual pertenece rotulado con plumón en cada perfil..... 50
Figura 19: (a) Acopio en obra de los bastidores, previo al izaje; (b) Comprobación del vano usando su respectivo marco; (c) Puerta-ventana repecionada por la empresa constructora. 51
Figura 20: Modelo integrado de los procesos para tener una ventana prefabricada instalada en obra 52
Figura 21: Molde de la jamba artesanal, y su sistema de soporte 53
Figura 22: Mecanismo de soporte del molde artesanal empleado actualmente en la parte inferior.. 54
Figura 23: Paneles de caras opuestas de un mismo muro, pero de distinta longitud..... 55
Figura 24: Modelamiento del Problema a través de un Diagrama Causa-Efecto..... 56
Figura 25: Esquema de la distribución de la presión del hormigón durante el vertido y su transmisión a los soportes 60
Figura 26: Vistas del modelo computacional 3D del mecanismo de soporte: (a) frontal; (b) posterior 63

Figura 27: Vista en planta del soporte diseñado, las tres componentes se destacan en colores distintos 63
Figura 28: Modelo de un soporte montado sobre el panel de muro: (a) movimientos del mecanismo de sujeción en flechas amarillas; (b) movimientos del mecanismo de avance en flechas azules..... 64
Figura 29: Traza de la vertical que delimita el muro y de la paralela que indica el bore exterior del molde de la jamba 65
Figura 30: (a) Borde exterior del molde de la jamba sobre la traza paralela; (b) Vista frontal de los 3 soportes a cada lado instalados Por simplicidad, los elementos de fijación no fueron dibujados. 66
Figura 31: Fotografías de la versión final del prototipo fabricado: (a) vista en planta; (b) vista frontal en ángulo 67
Figura 32: Dos fotografías del elemento de fijación: (a) vista frontal; (b) detalle entre la conexión del soporte y elemento de fijación 68
Figura 33: Mecanismo de avance completamente extendido y tipos de apoyos para el cálculo de la longitud de pandeo 69
Figura 34: Modelos 3D del experimento: (a) Vista frontal superior; (b) Vista posterior inferior..... 72
Figura 35: Panel de muro Doka Frami Xlife, posterior al corte para el experimento 73
Figura 36: Sistema de anclaje del panel a la losa del laboratorio: (a) Por sobre la losa; (b) Por debajo de la losa..... 74
Figura 37: (a) Compensación de la altura del panel; (b) Instrumentación 75
Figura 38: Celda de carga no ha hecho contacto con el extremo del soporte. Estos datos son eliminados del análisis. 82
Figura 39: Curva fuerza-desplazamiento ensayo 1 83
Figura 40: Soporte post-ensayo, las flechas en rojo indican la separación producto del desplazamiento del soporte 84
Figura 41: Curva fuerza-desplazamiento ensayo 2 84
Figura 42: Apriete del mecanismo de sujeción usando una herramienta 85
Figura 43: Cuerva fuerza-desplazamiento ensayo 3..... 86
Figura 44: Curva fuerza-desplazamiento ensayo 4; se destaca con flechas la caída de 70 kgf producto del acomode de la arandela del mecanismo de avance 87
Figura 45: Curva fuerza-desplazamiento conjunta..... 89
Figura 46: Cerrojo Domino DRS (PERI, 2016b). En el círculo rojo se destaca el sistema para acoplarse a los perfiles del bastidor..... 91
Figura 47: Distanciómetros laser: (a) Bosch PLR 25; (b) Hilti PD-E..... 102
Figura 48: (a) Hilti PMC 46; (b) Leica Lino L2P5. 103
Figura 49: (a) Hilti PRI 36; (b) Leica Rugby 880 103
Figura 50: LIDAR moderno; Leica P40 (Leica Geosystems AG, 2015) 105
Figura 51: Sistemas de compensación basados en perfil de madera entre dos paneles: (a) Peri; (b) Doka 109

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Descripción de cada Muda (Bernold & AbouRizk, 2010: p. 22) 20
Tabla 2: Justificación de la mayor calidad a través de la prefabricación, según Burguess et al. (2013) 31
Tabla 3: Reducción del residuo sólido por partida asociado a la prefabricación de acuerdo a Tam et al. (2007). 31
Tabla 4: Listado contenidos normados en la construcción 35
Tabla 5: Dimensiones máximas permitidas para el transporte en carretera en Chile 37
Tabla 6: Funciones requeridas y sus respectivas características adoptadas en el diseño 61
Tabla 7: Criterios y supuestos relacionados con el proveedor de ventanas 76
Tabla 8: Criterios y supuestos relacionados con el proveedor de encofrados 76
Tabla 9: Criterios y supuestos relacionados con la obra in situ 77
Tabla 10: Motivos que explican la reducción del costo unitario de ventana instalado, Cristian Morales (2015) 78
Tabla 11: Detalle del costo total de cambiar una placa fenólica de un panel de muro (Benito Jiménez, 2016) 78
Tabla 12: Datos para la estimación del costo del edificio 80
Tabla 13: Algoritmo para el tratamiento general de los datos 82
Tabla 14: Datos relevantes ensayo 1 83
Tabla 15: Datos relevantes del ensayo 2 84
Tabla 16: Datos relevantes del ensayo 3 86
Tabla 17: Datos relevantes ensayo 4 87
Tabla 18: Datos relevantes para el análisis en conjunto 88
Tabla 19: Principales características LIDAR Leica ScanStation P40 (Leica Geosystems AG, 2015) 104
Tabla 20: Clasificación del encofrado según su tecnología (Bernold, 2013: p. 443) 106
Tabla 21: Factores de seguridad mínimos para accesorios de encofrados (De la Tabla 2.3 ACI 347 (ACI, 2004)) 108
Tabla 22: Algunos de los diferentes tamaños de los paneles para muros ofrecidos actualmente en Chile 108

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES GENERALES

De acuerdo a un estudio realizado por la CONAMA en 2010, la industria de la construcción es la mayor responsable de la producción de residuos sólidos en Chile, con una participación que varía entre el 26% y el 34% respecto al total de residuos generados por el país (CONAMA, 2010). Además, tiene una de las tasas más altas de accidentes fatales en el lugar de trabajo, donde el año 2013 la mortalidad fue de 10,6 trabajadores por cada 100.000, más del doble que el promedio nacional (SUSESO, 2014).

Tanto la gran producción de residuos sólidos como los accidentes de trabajo, son considerados como *Muda* (pérdidas productivas, del japonés). Este concepto proviene de la industria automotriz del país Nipón, donde se definieron siete tipos de pérdidas para describir todas aquellas actividades que consumen recursos, pero que no agregan valor al producto final. La importancia de este concepto radica en que la industria automotriz japonesa sufrió una revolución en la década de 1950, como consecuencia de orientar sus esfuerzos a reducir toda fuente de pérdidas.

Por otra parte, una de las posibles explicaciones para el alto nivel de pérdidas mencionado anteriormente en la industria de la construcción, es su naturaleza. Por ejemplo: (1) puestos de trabajo cambiantes conforme al avance de la obra; (2) trabajos en altura; (3) exposición a ser golpeado por elementos que caen; (4) el uso de máquinas y herramientas pesadas. A todos estos factores se les añade que es un trabajo en terreno expuesto al clima, con una gran cantidad de actores y disciplinas involucradas, donde muchas veces existe una escasa especialización (CDT, 2013). Dichas condiciones adversas conllevan a una mayor probabilidad de accidentes y a trabajos mal hechos que constantemente requieren reparaciones, los cuales son considerados como pérdidas, y que, además, tienen un costo muy alto o, como por ejemplo las superficies de hormigón a la vista, muy difíciles de lograr. La pregunta que surge, naturalmente, es ¿cómo es posible mejorar esta situación?

En este marco, y de acuerdo a estudios realizados tanto en Chile (Ghio et al., 1997) como en el extranjero (por ejemplo, McGraw-Hill Construction, 2011), la prefabricación es una técnica constructiva que, comparada con la construcción tradicional, resulta en una reducción de las pérdidas mediante la disminución en los costos y plazos de los proyectos. Un ejemplo exitoso de un programa de construcción prefabricada, desarrollado con ingeniería chilena, fue el Proyecto El Abra. En dicho proyecto minero, desarrollado por el consorcio entre Sigdo Koppers y Bechtel, se emplearon los conceptos de prefabricación, pre-ensamblaje y modularización en gran escala. De acuerdo a Ghio et al. (1997), dichos conceptos ofrecen ahorros potenciales de 10 a 20% en los costos, 6 a 30% en los tiempos de construcción, y potenciales de desplazamiento de la mano de obra a sitios con mejores condiciones de 8 a 56%.

Sin embargo, y a pesar de la gran cantidad de ventajas documentadas, el autor pudo constatar una escasa implementación de la prefabricación y modularización en Chile durante el desarrollo de la investigación, al compararla con Estados Unidos, Europa y algunos países de Asia. Esto a juzgar por la escasa bibliografía de origen nacional en este ámbito, por las numerosas entrevistas sostenidas con expertos de la industria, y por las observaciones realizadas en obras y en fábricas del rubro.

Dicha escasez de prefabricación y modularización en el país, junto con el potencial de impactar significativamente en la productividad que tiene asociada, es lo que motiva al autor a desarrollar la presente investigación, la cual se puede separar en cuatro componentes. La primera, en

poner a prueba los potenciales beneficios y problemas de la prefabricación, como una técnica importante para reducir las pérdidas en la industria de la construcción nacional. La segunda componente, en investigar las causas que limitan su implementación en Chile, y la tercera, proponer y desarrollar una forma de contribuir a revertir esta tendencia en el futuro, en base a las causas de la segunda componente. La cuarta y última componente, consiste en probar la forma propuesta en la componente anterior. De esta manera, el objetivo principal de esta memoria es crear conocimiento para entender las causas y efectos que limitan la implementación de la prefabricación en masa en la construcción habitacional en altura, junto con destacar sus beneficios económicos en la industria nacional.

1.2. ALCANCES DEL ESTUDIO

La presente memoria se enmarca en una visión de la gestión de la construcción, que tiene como principal objetivo la reducción de las pérdidas. Por consiguiente, este trabajo es una contribución a la línea investigativa de dicha filosofía, liderada por el Profesor Dr. Leonhard Bernold.

En este contexto, el arquitecto de la inmobiliaria Dhelos, Juan Pablo Galleguillos (2015), destacó en una entrevista con el autor que una gran fuente de pérdidas en el estado la práctica actual, es hacer las ventanas y puertas a la medida en vez de en masa. Como consecuencia, el presente trabajo utiliza como objeto de estudio las ventanas de edificios habitacionales de hormigón armado, donde se estudian las causas y efectos del problema, se cuantifican las pérdidas en términos de costos, y se propone y prueba eliminar la causa principal del problema. Esto se realiza en seis partes, como se detalla a continuación.

La primera, en determinar las causas por las cuales los vanos quedan construidos con una calidad insuficiente para la instalación de ventanas prefabricadas en masa, de medidas pre establecidas. Para ello, se realizan dos modelos: (1) del proceso actual de la construcción del vano y la fabricación e instalación de una venta, y (2) causa efecto del problema. Ambos modelos se realizan en base a observaciones en obra y en una fábrica de ventanas, y en la información recopilada en entrevistas a expertos de la construcción.

La segunda parte de la investigación consiste en cuantificar dichas pérdidas asociadas al problema estudiado. Para ello se utilizan datos recolectados en la fábrica de ventanas, los proporcionados por el proveedor de encofrados y los medidos en obra.

Una vez identificada la causa fundamental del problema, la tercera parte consiste en el estudio de un soporte para eliminar la causa en cuestión. En este proceso se analizan las fuerzas laterales producidas por el hormigón durante su vertido, lo cual se hace utilizando la *Guide to formwork for concrete* del comité ACI 347 (2004). Además, se realiza un análisis de las condiciones en obra para determinar las funciones y características de dicho soporte para un adecuado desempeño en obra. Para tales efectos, se realizan observaciones en terreno y entrevistas a trabajadores y expertos de la construcción. Cabe destacar que el nuevo soporte diseñado se limita para vanos que son originados en términos de muro, producto de la forma en la cual este se monta sobre los paneles del encofrado. También es importante resaltar que solamente se consideraron las verticales o jambas del vano para el estudio, puesto que el plano inferior o alféizar se hace posteriormente a la obra gruesa, mientras que el plano superior o dintel se hormigona junto con la losa del piso superior, y el encofrado cuenta con todos los accesorios para una correcta ejecución de esta tarea, a diferencia de los soportes para las jambas.

La cuarta parte consiste en la fabricación de prototipos del nuevo soporte, identificando oportunidades de mejora en cada iteración, las cuales se van incorporando al diseño. Adicionalmente, la última versión es mostrada a expertos técnicos de una compañía de encofrados, de quienes se obtiene retroalimentación.

Posteriormente, la quinta parte consiste en diseñar las pruebas de laboratorio a las cuales es sometida el prototipo final. Se desea determinar el comportamiento del soporte a la fuerza axial, en las condiciones más parecidas posibles a las de obra, lo cual se considera en el diseño de las pruebas.

Finalmente, la sexta parte corresponde a conducir las pruebas de laboratorio, determinando el comportamiento del soporte mediante una curva fuerza-desplazamiento. A su vez, de comparar dicha curva con la tolerancia en vanos de muros de hormigón sugerida por la CDT (2009), se establece la carga admisible del soporte. Tanto la curva como la carga admisible del soporte, se comparan con la demanda calculada durante el análisis en el paso tres, permitiendo comprobar la viabilidad de su implementación en terreno y contrastar las hipótesis.

1.3. ESTRUCTURA DEL ESTUDIO

La presente memoria está compuesta por 8 Capítulos:

CAPÍTULO 1: Corresponde al presente capítulo introductorio, donde se declaran los antecedentes generales y se presenta la estructura del estudio;

CAPÍTULO 2: Recopilación bibliográfica, la cual está dividida en el estado del arte y el estado de la práctica. En el estado del arte, se presenta la filosofía cero pérdidas, comenzando desde su origen en la industria de automóviles, luego mostrando su evolución en la manufactura y en la construcción. También se presenta un modelo de control preventivo del proceso de construcción, junto con la planificación orientada a cero pérdidas que utiliza dicho modelo. A su vez, en el estado del arte, se presentan los beneficios y dificultades de la construcción prefabricada y modular, enfocados en su relación con las pérdidas. En el estado de la práctica, se presentan buenas prácticas relacionadas con el tema de la memoria, como ejemplos de proyectos en el extranjero y en Chile que utilizaron la construcción prefabricada;

CAPÍTULO 3: Consiste en el planteamiento del problema específico a estudiar, en donde este es descrito y contextualizado, proporcionando su relación con la escaza implementación de la prefabricación y modularización como técnicas de construcción en Chile. Adicionalmente, se explicita qué nuevo conocimiento se quiere establecer y probar, junto con destacar su importancia. Las hipótesis de trabajo son presentadas al final de este capítulo;

CAPÍTULO 4: Corresponde a la descripción de las cuatro etapas que componen la metodología, donde las primeras dos se desarrolla en el presente capítulo, mientras que las últimas dos en los Capítulos 5 y 6. En este marco, la primera etapa consiste en presentar un modelo del proceso y una modelación tipo causa efecto del problema, los cuales permiten identificar su causa fundamental. La segunda etapa de la metodología, consiste en cómo se realizará la recolección de datos para cuantificar las pérdidas del estado de la práctica actual, frente al prefabricado en masa. Las etapas tres y cuatro corresponden al diseño y desarrollo de la solución, junto con el diseño de las pruebas de pruebas de laboratorio a las cuales será sometida, desarrolladas en los Capítulos 5 y 6, respectivamente;

CAPÍTULO 5: En este capítulo se presenta el estudio para el diseño de un nuevo soporte, para eliminar la causa fundamental del problema identificado en el Capítulo 4. El diseño se basa en un análisis de las fuerzas causadas por el hormigón fresco durante el vertido, junto con el conocimiento detallado del problema, obtenido mediante las observaciones in situ y discusiones con expertos presentadas en el Capítulo 4. Se discute acerca de la fabricación de prototipos de la mejor alternativa de solución,

CAPÍTULO 6: Presenta el diseño y desarrollo de las pruebas experimentales en el laboratorio, a la cuales será sometido el prototipo final del soporte;

CAPÍTULO 7: Contiene la adquisición de datos provenientes del experimento y su posterior análisis. Los comentarios de los resultados en relación a las observaciones durante el experimento son presentados;

CAPÍTULO 8: Conclusiones y recomendaciones finales del estudio. Comienza con un resumen, luego por contrastar la hipótesis y otros hallazgos obtenidos, junto con posibles oportunidades de investigación y mejora en relación a la solución desarrollada y en el ámbito de la reducción de las pérdidas. Culmina con un comentario acerca de la experiencia autor.

CAPÍTULO 2: RECOPILACIÓN BIBLIOGRÁFICA

En el presente capítulo se presenta la información recabada de la literatura, la cual sustenta la investigación. Se divide en dos partes. La primera, corresponde al estado del arte, donde se resumen y organizan las investigaciones más recientes, relacionadas con el tema de la presente memoria. La segunda parte es el estado de la práctica, en donde se presentan algunas buenas prácticas relacionadas con la memoria.

2.1. ESTADO DEL ARTE

La presente sección está compuesta por dos subsecciones que están directamente relacionadas por medio de la reducción de las pérdidas; la filosofía cero pérdidas y los efectos de incorporar la prefabricación y modularización en la construcción.

2.1.1. Filosofía cero pérdidas

La filosofía cero pérdidas es en un sistema de gestión, el cual tiene como principal objetivo eliminar todas aquellas actividades que generan costo, pero que no agregan valor al producto final (Bernold & AbouRizk, 2010: p. 22). Dichas actividades son consideradas pérdidas, cuyo concepto proviene de la industria de automóviles de Japón. Por consiguiente, se presenta la evolución del concepto desde sus orígenes, hasta la adaptación actual en la industria de la construcción.

2.1.1.1. El sistema de producción Toyota (TPS) y el concepto pérdidas

Posterior a la segunda guerra mundial, la industria automotriz experimentó un gran crecimiento. Japón, tras la devastación al término de la guerra, fue impulsado a convertirse en una economía importante en el mercado global, producto de la exportación de vehículos de alta calidad. Esta sección trata de la metodología ideada por Toyota, puesto que como plantea Murphy (2015), es de interés conocer la fórmula que utilizó para pasar de ser una pequeña compañía, al mayor fabricante de vehículos del mundo.

Al comienzo de la década de 1950, Eiji Toyoda, en ese entonces director general de la japonesa Toyota, visita la planta River Rouge de Ford Motor Company, en Michigan. De acuerdo al artículo de Dawson (2004) en el *BusinessWeek*, estaba impresionado por la escala, pero inquieto por lo que él vio como ineficiencias. En base a esta experiencia, junto a Taiichi Ohno, ingeniero jefe de Toyota, idean un sistema de producción que posteriormente es llamado *manufactura lean*.

El Sistema de Producción Toyota (TPS por sus siglas en inglés) se basa en el concepto *Muda*, donde los siete factores identificados por Ohno se presentan en la Tabla 1. De acuerdo a Legmpelos (2013), el TPS tiene como primer paso identificar la fuente de pérdidas y localizarla en la línea de producción, para luego eliminar los defectos y mejorar la calidad de los productos.

Tabla 1: Descripción de cada Muda (Bernold & AbouRizk, 2010: p. 22)

Los siete *Muda*:

1. **Sobreproducción**: Productos que son fabricados antes de lo necesario y que crean costos inventarios.
2. **Exceso de inventario**: Toda materia prima, trabajo parcial (WIP) o totalmente completado que no se encuentra en movimiento, requiere capital, espacio, y movimientos adicionales para ser almacenado.
3. **Movimientos innecesarios**: Por parte de los trabajadores cuando el lugar de trabajo no está bien organizado, requiriendo mayor tiempo y esfuerzo.
4. **Inactividad por esperas**: Tanto de personas o equipos a la espera del suministro de recursos, producen desperdicios de tiempo valioso.
5. **Transporte innecesario**: Las plantas de trabajo con una mala distribución de los espacios requieren de un manejo extra de partes y materiales, aumentando la cantidad de tiempo improductivo y el riesgo de daños.
6. **Proceso ineficiente**: Falta de maquinaria adecuada, de capacitación, y estándares actualizados.
7. **Defectos, averías y lesiones**: El incumplimiento de las metas de calidad y equipos con malfuncionamiento resultan en trabajos que hay que re-hacer, en chatarra, y en ralentizar toda la operación, a menos de que se mantenga un costoso inventario disponible. Los accidentes no sólo interrumpen la operación, sino que también causan perjuicios a los empleados.

Una forma de identificar la causa de las pérdidas, es el "Sistema de los 5 ¿Por qué?". Esta es una técnica iterativa utilizada para determinar las relaciones causa - efecto asociadas a un problema particular. El objetivo es identificar la causa raíz de un problema o defecto, a través de repetir cinco veces la pregunta ¿Por qué?, donde cada respuesta forma la base para la siguiente iteración. De acuerdo a Fantin (2014), el aspecto más importante de dicha técnica, es que la última respuesta debe apuntar a un proceso, ya que en la manufactura un proceso que no funciona bien o uno que no existe, es la causa raíz.

Dentro del sistema de producción Toyota, siempre que se identificaba un problema dentro de una fábrica, la línea de producción se detenía y el ítem era enviado a control de calidad donde era sujeto a la técnica de los 5 por qué. Según Womack et al. (1990), el procedimiento resultó en una línea de producción intachable que después de cierto punto, no necesitaba detenerse.

Un aspecto clave del TPS respecto a la detención de la línea de producción, es que cada trabajador tenía la facultad de hacerlo. De acuerdo a la *Teoría de los Dos Factores* de Herzberg, otorgarles mayor responsabilidad a los empleados es uno de los factores motivacionales más importantes (Bernold & AbouRizk, 2010: p. 279), donde, además, incluir a todas las personas involucradas es un aspecto fundamental en la Filosofía Cero Pérdidas, como se ve en las subsecciones siguientes.

En conclusión, Toyota logra crear un sistema de producción revolucionario que lleva a la compañía al éxito (Murphy, 2015). Se basa en la filosofía de erradicar todas aquellas actividades que no agregan valor al producto final, la cual sienta las bases para la *manufactura lean*, de la cual trata la sub-subsección siguiente.

2.1.1.2. Manufactura lean: Principales diferencias con una organización tradicional

La *Manufactura Lean* o *Producción Lean*, es un término originado en la década de los 80's que deriva del Sistema de Producción Toyota. Ésta filosofía de gestión se concentra en la eliminación sistemática de las pérdidas, con base en las identificadas por Ohno y que fueron descritas en la Tabla 1.

Según resume Legmpelos (2013), las principales diferencias entre una organización que emplea el procedimiento de manufactura tradicional y una con el enfoque *lean*, son las siguientes:

1. El proceso de manufactura como un todo
2. Inventarios
3. Definición de eficiencia
4. Relaciones con los empleados, clientes y proveedores

1. <u>El proceso de manufactura como un todo</u>

El enfoque *lean* tiende a optimizar el proceso de manufactura como un todo, a diferencia del enfoque tradicional, donde los esfuerzos se concentran en mejorar los subprocesos aislados. De acuerdo a Rosenbaum (2012), al trabajar con subprocesos aislados, se pierde la noción del cliente final, entendiendo cada subproceso siguiente como un cliente.

Inclusive, la filosofía *lean* tiene como meta optimizar el proceso completo, partiendo antes del proceso de manufactura en sí, al trabajar con los proveedores y todo tipo de compañías que cooperan con la planta (Womack et al, 1996). Es por ésta razón que el enfoque *lean* apunta a desarrollar relaciones transparentes entre todos los participantes involucrados en el proyecto.

2. <u>Inventarios</u>

Los grandes inventarios son considerados un problema para las plantas manufactureras lean, ya que denotan una falta de organización, ya que los productos están terminados antes de lo que deberían.

Las razones por las cuales los inventarios son un problema para el enfoque lean, son las siguientes:

- Costos: Se requiere mayor espacio para almacenar productos terminados o por terminar, resultando en pagos de arriendo o en espacio que podría estar destinado a otra actividad.
- Movimientos: Se requiere tiempo para el acopio y traslados, lo cual se traduce en costos.
- Seguridad: Si se almacenan temporalmente en espacios destinados a la producción, esto genera riesgo de accidentes al trabajar en espacios limitados.

Koskela (1992) postula que una solución efectiva para evitar grandes inventarios es proveer los materiales justo-a-tiempo (JIT del inglés *just-in-time*). Este sistema JIT consiste en entregar las partes al cliente o subproceso consecuente ni antes ni después, sino que a tiempo.

3. <u>Definición de eficiencia</u>

Para la filosofía *lean*, sólo las actividades que agregan valor son consideradas para los indicadores de eficiencia, y no la cantidad total de trabajo. Para ejemplificar la diferencia con una organización tradicional, en este tipo de organizaciones mantener maquinaria ociosa es considerado ineficiente, por lo que se prefiere mantenerlas produciendo constantemente a un alto ritmo. Para la

filosofía *lean* en cambio, si el trabajo realizado no genera valor a la producción como un todo, no es considerado como un indicador de eficiencia. Es más; si una maquinaria produce a un ritmo muy elevado, puede conducir a un exceso de inventario, que como, se indicó anteriormente, es otro problema para la filosofía *lean*.

4. Relaciones con los empleados, clientes y proveedores

El trabajo dentro de las compañías es realizado por los empleados, por lo que una buena relación entre las partes es un factor clave para el éxito. En el TPS, los trabajadores tenían permitido detener en cualquier momento la línea de producción, donde además se les daba regularmente la oportunidad de evaluar el desempeño de la fábrica. Para Womack et al. (1990), esto explica que la moral de los empleados era mucho mejor en las fábricas de Toyota que en fábricas de occidente.

Según establece Legmpelos (2013) en su tesis, como la filosofía *lean* se basa en una estrategia de marketing tipo "Pull" (Womack et al., 1990), es clave generar clientes leales. Para formar estos lazos, la clave es que el cliente quede satisfecho a pesar de que en oportunidades una venta en particular no genere mayores ganancias, ya que se apunta a maximizar el beneficio a futuro.

La misma filosofía es implementada entre las fábricas y proveedores, donde la meta es un lazo duradero. Para ello, las plantas manufactureras trabajan de cerca con sus proveedores basados en la transparencia. En esta línea, se busca evitar la confidencialidad de los procesos productivos entre las partes, compartiendo información basada en la confianza. Este tipo de relación, según la filosofía *lean*, permite que ambas partes gocen de una mayor participación en el mercado y utilidades. Según un experto entrevistado por el autor (Juan Pablo Galleguillos, 2015), dicha transparencia entre proveedores y la empresa a la cual hace referencia el enfoque *lean*, es un factor clave para la industria de la construcción. Esto se debe a que, de producirse retrasos en un proveedor crítico para el proyecto, el proyecto completo corre el riesgo de ser un fracaso, lo cual es evitable al contar con una relación transparente. Este es justamente el caso al implementar una gran cantidad de elementos prefabricados, ya que pasan a ser un proveedor crítico. Como se presenta en la sección 2.1.2.3, evitar el riesgo de contar con un proveedor crítico es una de las principales dificultades de implementar la prefabricación en un país con un mercado relativamente pequeño, como es el caso de Chile.

En esta sub-subsección 2.1.1.2, se presentaron antiguas herramientas de gestión de la industria manufacturera. Como postulan Bernold & AbouRizk (2010), debido a la gran diferencia de naturaleza entre los procesos constructivos y los de manufactura, éstas herramientas deben ser adaptadas para poder ser aplicadas en la construcción. La sub-subsección siguiente trata de la adaptación de dichas herramientas a la construcción.

2.1.1.3. Construcción Lean: Principios de gestión de la construcción basados en la manufactura

Consiste en aplicar los principios de la filosofía lean en la construcción, resultando en una forma alternativa de la administración de proyectos. Legmpelos (2013) señala que una de las principales diferencias con la construcción tradicional, es que se enfoca en la construcción como un todo, en vez de actividades individuales. A su vez, tiende a involucrar a todos los interesados (*stakeholders*) en etapas tempranas del proyecto, para lograr consenso por adelantado de las tareas individuales, con el objeto de mantener a todos completamente informados acerca del proceso (transparencia).

Algunos ejemplos de pérdidas en la construcción, de acuerdo a Zhang et al. (2005), son el uso de más materiales que los requeridos, el incumplimiento de los estándares de calidad, el tiempo ocioso de trabajadores y máquinas, entre otros. Para reducir dichas pérdidas, Koskela (1992) propone soluciones alineadas con la estandarización y sistematización del trabajo, utilización de piezas y partes prefabricadas, tecnología de la información, y fortalecer el grupo de trabajo, entre otros.

A pesar de que la construcción *lean* ha instalado la idea de ver la producción como un flujo y ha llevado al principio de eliminar las pérdidas para lograr hipotéticamente una mejor productividad (Howell & Ballard, 1994; Howell, 1999), de acuerdo a Seung et al. (2008), no establece claramente el mecanismo de cómo medir el nivel de defectos en el proceso de trabajo actual. Además, el mismo autor señala que dicha filosofía en la construcción tampoco puede establecer una meta cuantitativa para mejorar el marco de trabajo, a través de eliminar las causas críticas de los defectos que conllevan a la variabilidad de los procesos. Un ejemplo específico es el trabajo de Horman & Thomos (2005), quienes, en base a observaciones en tres proyectos reales, concluyeron que la productividad se veía afectada negativamente cuando el inventario tiende a cero, que es una de las metas de la filosofía *lean* y JIT.

2.1.1.4. Enfoque Seis-Sigma: herramienta de gestión para mejorar la calidad

En base a que la construcción *lean* no establece claramente el mecanismo para medir defectos en el proceso, ni tampoco puede establecer una meta cuantitativa para mejorar el marco de trabajo, Seung et al. (2008) propone aplicar el enfoque Seis-Sigma para mejorar el desempeño de las operaciones en la construcción.

Seis-Sigma es tanto una medida estadística de la variabilidad de un proceso, como una estrategia de gestión de negocios. Fue desarrollada por Motorola en 1981, con el objeto de incrementar la calidad de sus productos, eliminar la causa raíz de los defectos, y reducir la variabilidad y errores dentro de su proceso de manufactura. También ha sido utilizado por Samsung Electronics, resultando en una disminución promedio del 50% de los productos defectuosos entre 1999 y 2001 (Yun & Chua, 2002), por Johnson Controls, donde los defectos se redujeron en un 70% (Brue & Howes, 200), por General Electric, donde agregó $2.400 millones de dólares al resultado final del año 2000 (Brue & Howes, 2006), entre otros.

Como indica Seung et al. (2008), el principio de los Seis-Sigma establece que la calidad del producto sigue una distribución normal. Si el promedio (μ) se sitúa al centro de la curva, y los valores límites especificados (por bajo o por sobre los cuales se considera como un producto defectuoso) a una distancia de seis veces la desviación estándar (σ), este principio apunta a mantener las tasas de productos defectuosos por debajo de las 0,002 [ppm]. La representación gráfica se muestra en la Figura 1:

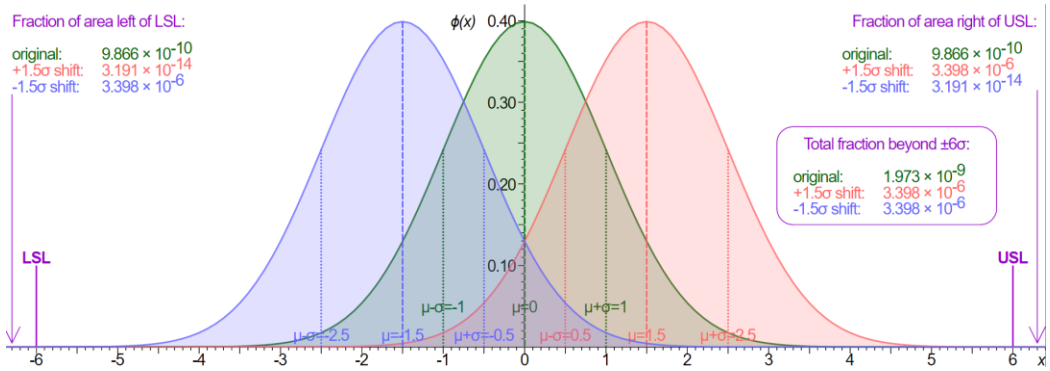


Figura 1: Representación gráfica del método de los seis-sigma

Como se observa en la Figura 1, los valores límite de especificación (LSL y USL de las siglas en inglés *Lower Specified Limits* y *Upper Specified Limits*) se encuentran a una distancia de 6σ del valor medio (μ). Producto de las propiedades de la distribución normal, los valores tan alejados del valor medio son extremadamente poco probables. En base a dicha propiedad, a pesar de que el promedio de la producción sufra un desplazamiento de ±1,5σ (curvas en azul y rojo, donde la verde posee μ=0), la fracción de productos defectuosos será de 3,4 ppm. Según Lindermann et al. (2013), fueron estas 3,4 ppm de productos defectuosos impuestos como meta por Motorola en su operación.

De aplicar la combinación de los enfoques *lean* y Seis-Sigma a la construcción en dos casos de estudios, Seung et al. (2008) concluye que este método no sólo es una herramienta de gestión para mejorar la calidad y la productividad en la construcción, sino que también, es una herramienta sistemática para el control de calidad y del proceso.

Como indican Dumitrescu & Dumitrache (2011: p. 538), de combinar los principios *lean* con el método Seis-Sigma, es posible lograr mejoras efectivas. A dicha metodología, se le denomina "Seis-Sigma Lean". Para más información, referirse a Dumitrescu & Dumitrache (2011) y Seung et al. (2008).

Otro enfoque de gestión distinto enfocado también en reducir las pérdidas, es el propuesto por Zhang et al. (2005), el cual se basa en un modelo del proceso de la construcción que considera control preventivo, de lo cual trata la sub-subsección siguiente.

2.1.1.5. Un modelo del proceso de la construcción con control preventivo

El modelo de los procesos de la construcción de Bernold & AbouRizk (2010), presentado en la Figura 2, es mucho más inclusivo que el propuesto por Koskela & Huovila (1997), ambos adeptos a la filosofía lean, ya que considera los factores que influyen en la productividad y cómo se relacionan. A su vez, enfatiza que como resultado del proceso no sólo se encuentran las actividades que generan valor, sino que también las pérdidas, las cuales son especialmente relevantes para efectos de esta memoria.

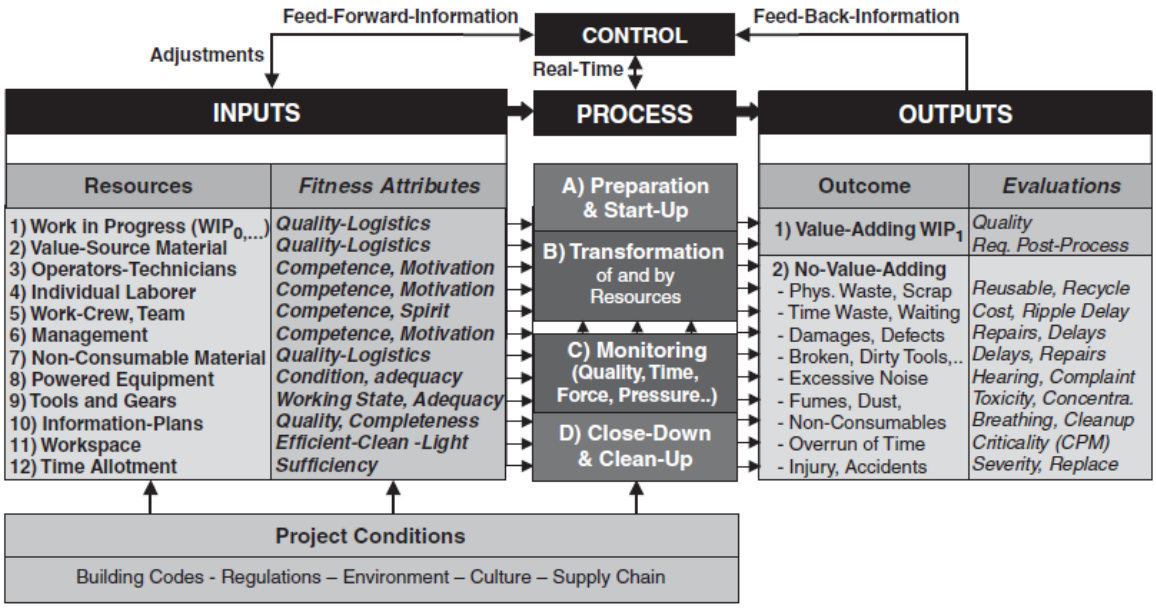


Figura 2: Modelo del proceso de la construcción con control preventivo (Bernold & AbouRizk, 2010)

Desde un punto de vista operacional, este modelo es considerado dinámico, ya que constantemente debe adaptarse a las condiciones cambiantes que pueden afectar al input o al proceso. Esto se lleva a cabo incorporando en el proceso un control adaptativo en tiempo real, el cual es esencial para mantenerlo en un óptimo. Para ello, se considera tres flujos de información para el control; alimentación hacia delante asociada a los inputs (Feed-forward), en tiempo real proveniente del proceso, y una de retroalimentación (Feed-back) proveniente del output. Esto requiere una planificación y control antes, durante y después de completar cada proceso, por lo que sienta las bases para definir la planificación y control de procesos basado en las pérdidas (del inglés *waste-based planning and processes control*, WBPC), puesto a prueba por Zhang et al. (2005)[1] en la construcción residencial.

Cabe resaltar que el flujo de información feed-forward y el control proactivo tiene una gran importancia en la prefabricación. Esto fue demostrado en el trabajo de Moon et al. (2015), donde al aplicar un enfoque dinámico de la gestión de la calidad en conjunto con el uso de información en tiempo real, se logra aumentar la productividad del proveedor de refuerzos desde un 31,5% a un 77,4%, mientras al mismo tiempo se disminuye las pérdidas del proceso desde un 45,5% a un 6,2%. También en las observaciones realizadas por el autor de esta memoria se destaca la importancia de la información feed-forward, ya que muchas veces este flujo de información es originado o recibido por los proveedores, como por ejemplo especificaciones, retrasos en la fabricación, hora y fecha de despacho, entre otros. Toda esta información puede requerir una determinada respuesta por parte de la constructora, así como también ocurre en el sentido contrario.

[1] El modelo de la Figura 2 es posterior al sistema de planificación propuesto por Zhang et al. Sin embargo, en la publicación donde se detalla dicho sistema, el modelo del proceso era más antiguo, basado en el de Salim & Bernold (1995), pero incluía las condiciones cambiantes del proyecto.

2.1.1.6. Planificación orientada a cero pérdidas: Prueba de un aumento en la productividad

En la construcción, la planificación y control tradicional se enfocan principalmente en fijar y lograr objetivos, los cuales se detallan en el programa y el presupuesto. Según Zhang et al. (2005), este sistema tradicional es un estilo de gestión reactiva.

En cambio, la planificación orientada a cero pérdidas, es una alternativa que postula minimizar continua e incesantemente las pérdidas, con el esfuerzo de todas las partes involucradas en la construcción. Como consecuencia, la gestión reactiva es reemplazada por una planificación y control activo y siempre presente, donde una parte fundamental es la alimentación de información hacia adelante (feed-forward), la cual se incluye en el modelo de la Figura 2.

Producto de la naturaleza dinámica del entorno de la construcción, como se muestra en el modelo de la Figura 2, las funciones de control deben estar integradas en el marco de trabajo de la planificación, la cual será utilizada para identificar y corregir desviaciones con respecto al plan. Como establece Zhang et al, (2005), la planificación orientada a cero pérdidas parte de la planificación tradicional del proceso, pero agrega el compromiso transversal e ininterrumpido de todos los involucrados en el sistema. En otras palabras, presenta un marco para planificación y control continuo e interrelacionado con todos los recursos. Otros autores sostienen este planteamiento en ámbitos más específicos. Un ejemplo es Coffey (1999), quien señala que se puede lograr reducir considerablemente los residuos sólidos si la gestión de los residuos es incorporada como parte de las funciones de la gestión de proyectos

La eficacia de dicho sistema de planificación, fue puesta a prueba en dos casos de estudio de construcción de residencias en Estados Unidos. El propósito era identificar si este concepto de planificación proactiva resultaría en alguna mejora. En el estudio de Zhang, Eastham & Bernold (2005), se comparó la productividad de: (1) la observación de la operación en terreno, con (2) una operación "*lean*" donde las pérdidas de recursos eran minimizadas mediante "planificación proactiva/control preventivo" o "planificación reactiva/control correctivo". En ambos casos de estudio, se logró mejorar la eficiencia del proceso, donde incluso en el primero se logró aumentar la productividad en un 75% (Zhang et al, 2005).

2.1.1.7. Resumen

La subsección 2.1.1 presentó la filosofía cero pérdidas, la cual tiene como principal objetivo eliminar la fuente de todas aquellas actividades que consumen recursos, pero que no agregan valor al producto final. Se presentó la historia de dicha filosofía, la experiencia en distintas industrias, los beneficios y problemas, y resultados de probarlos en la construcción.

2.1.2. Prefabricación y modularización: Técnica constructiva que reduce las pérdidas

La construcción prefabricada y modular son de gran interés para efectos de la presente memoria, por dos razones. La primera, es que, de acuerdo a las definiciones proporcionadas en el glosario, los elementos prefabricados, al seguir un proceso de producción en una instalación especializada, se pueden aplicar los principios de la manufactura *lean* y del enfoque Seis-Sigma. De acuerdo a lo establecido en las sub-subsecciones 2.1.1.2 y 2.1.1.4, dichos principios están orientados

a minimizar las pérdidas y hacer el proceso más eficiente. La segunda razón, es que, como se presenta en 2.1.2.2, la construcción prefabricada posee una serie de ventajas sobre la construcción tradicional, que tienen como resultado una reducción de las pérdidas. Esto la relaciona directamente con la filosofía presentada en 2.1.1.

2.1.2.1. Categorización de los componentes prefabricados

Los tipos de componentes prefabricados varían en base a su tamaño, complejidad, y la cantidad de trabajo que requieren en terreno para su ensamblaje. Según Schoenborn (2012), pueden ser categorizados en base a dichas características:

1. **Materiales procesados**: Como lo son las barras de refuerzo pre cortadas o materiales de revestimiento fabricados a pedido a través de un proceso de manufactura.
2. **Componentes prefabricados**: Son simplemente los bloques de construcción que involucran una partida única. En esta categoría se incluyen los paneles de madera, paneles de hormigón, paneles de acero, elementos estructurales prefabricados, bloques aislantes para muros (ICF), revestimientos prefabricados, sistemas de fachadas, sistemas de marcos de acero livianos (LSF), sistemas de ventanas con marcos, entre otros.
3. **Estructuras de paneles**: Son el ensamblaje de componentes prefabricados que no encierran espacio utilizable, es decir, elementos tipo placa que se transportan sin armar. Requieren mayor trabajo en el sitio de construcción que los componentes tridimensionales, pero es más económico su transporte al poder llevarse de forma más compacta.
4. **Estructuras modulares**: Son fabricaciones volumétricas fuera de sitio que forman un espacio cerrado utilizable, donde cada módulo es una parte completa del edificio o un edificio completo. Los módulos son estructuralmente independientes e incluyen más de una partida de construcción.

Figura 3: Relación entre el tamaño de los elementos prefabricados y la cantidad de trabajo en terreno (Schoenborn, 2012)

Por otra parte, el MBI (2011) define los edificios comerciales modulares, como aquellas estructuras no residenciales donde entre el 60% al 90% del trabajo es completado fuera del sitio de construcción en un ambiente controlado. Adicionalmente, las divide en dos categorías: (1) la construcción modular permanente, donde los módulos son diseñados para permanecer en una ubicación única durante su vida útil; y (2) los edificios re-localizables, los cuales pueden ser edificios parcial o completamente ensamblados que son diseñados para ser transportados a diferentes sitios de construcción.

2.1.2.2. Potenciales beneficios medidos de la prefabricación

En la presente sub-subsección se resumen los potenciales beneficios que se pueden obtener al adoptar la prefabricación, entendiendo ésta según la definición presentada en el glosario. Note que se habla explícitamente de los *potenciales*, ya que no todos los beneficios serán percibidos universalmente en todos los proyectos. Bajo este mismo argumento, muchos de los beneficios aumentan según la escala del proyecto y las repeticiones, pero gozar de todos ellos sólo puede lograrse cuando hay múltiples unidades por construir, lo cual requiere una planificación cuidadosa (Davies, 2005; Fawcett et al., 2005; Lessing, 2006 en Burgess et al, 2013).

Goodier & Pan (2010), en un estudio realizado en el Reino Unido, resumen los potenciales beneficios de la prefabricación tratados en esta sección; "ha sido ampliamente documentado que tanto la prefabricación y las tecnologías MMC (Las siglas de *Modern Methods of Construction*; Metodologías Modernas de Construcción) ofrecen una potencial reducción de costos, tiempo, defectos, riesgos de salud y seguridad, requerimientos de mano de obra e impacto ambiental, como los correspondientes incrementos en la calidad, tiempos de armado, predictibilidad, desempeño durante la vida útil y ganancias".

La Figura 4 es un esquema que resume los 9 beneficios esperados, los cuales son desarrollados a continuación:

Figura 4: Principales beneficios potenciales de la prefabricación

1. <u>Reducir los plazos del proyecto</u>

Según un amplio estudio conducido por McGraw-Hill Construction (2011), tener una menor duración del proyecto es el beneficio en productividad más común de la prefabricación/modularización, como también el que reporta mayor retorno económico. En una gran encuesta conducida por Cowles & Warner (2013) para la compañía consultora FMI, también se encontró que reducir los tiempos para completar el proyecto es uno de los dos principales beneficios esperados de la prefabricación.

Todos los autores consultados que hacen mención a los beneficios de la prefabricación/modularización, concuerdan en que la reducción de los plazos de proyecto es un beneficio esperado (Goodier & Pan, 2010 en Burgess et al, 2013b; MBI, 2011; Tam et al, 2007; Legmpelos, 2013; Lu, 2007 en Schoenborn et al, 2012; Wong et al, 2013). En el marco nacional, también hay experiencias de que la prefabricación aporta velocidad a la construcción. Como ejemplos, está la conclusión del trabajo de Ghio et al. (1997), en el cual se utilizó como caso de estudio un proyecto minero a gran escala, y la experiencia de un experto reconocido del sector, entrevistado en una entrevista especializada nacional por Pávez (2012).

En los párrafos anteriores se muestra la experiencia de diversos autores, concluyendo que efectivamente la prefabricación en sus distintos niveles contribuye a reducir los plazos de la construcción. La pregunta es ¿cuánto? En el *SmartMarket Report 2011* de McGraw-Hill Construction (2011: p.18) se sostiene que dos-tercios de las compañías que actualmente emplean la prefabricación/modularización han experimentado una reducción de los plazos de proyecto, donde un 35% del total lo han hecho en cuatro semanas o más. Según sugiere Burguess et al. (2013) basado en los estudios de Kaufmann & Remick (2009), de Wing & Atkin (2003), y el de Bell (2009), el rango de tiempo ahorrado para la construcción prefabricada residencial, es entre un 30% y un 60% respecto de la construcción tradicional en terreno.

Los factores por los cuales la prefabricación permite ahorrar tiempo son principalmente dos. El primero es el trabajo simultáneo en el terreno y en la fábrica, donde en el primero se realizan los movimientos de tierra y las fundaciones, mientras al mismo tiempo, en la fábrica, se construyen los componentes del edificio. En la Figura 5 se presenta un esquema que compara los procesos tradicionales versus los prefabricados, a grandes rasgos. El segundo factor tiene relación con los componentes, los cuales, al ser manufacturados en serie en un ambiente controlado, eliminan los atrasos a causa del clima. Además, hay mano de obra experimentada con todas las herramientas y materiales necesarios disponibles, en puestos de trabajo fijos, bien iluminados y diseñados para trabajar ergonómicamente y de forma mucho más segura.

Cabe resaltar que, según McGraw-Hill Construction (2011) y Ghio et al. (1997), durante las fases de diseño de proyectos complejos, se puede requerir tiempo adicional en la coordinación para el uso de la prefabricación y la modularización. Sin embargo, típicamente el tiempo ahorrado en terreno reduce la duración total del proyecto.

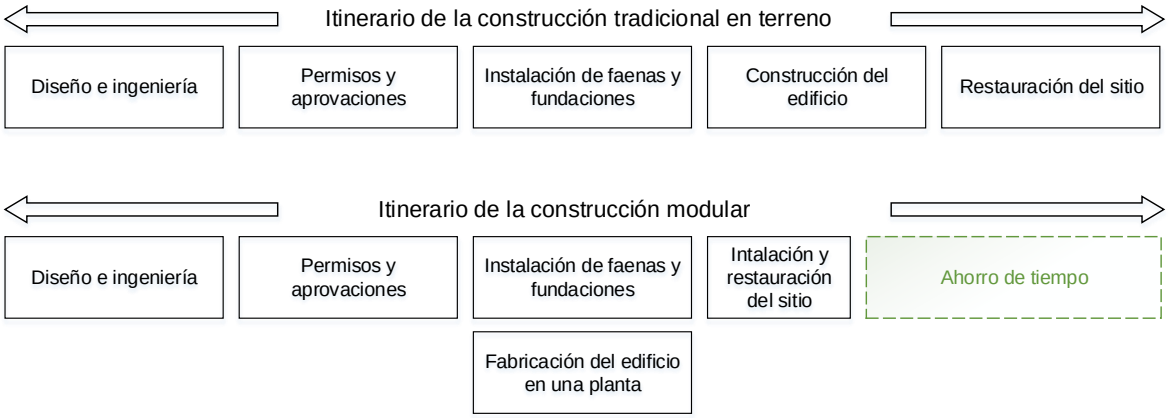


Figura 5: Esquema que compara los procesos de construcción tradicional con los de la modular (MBI, 2011)

De la reducción de la duración del proyecto se desprenden otros beneficios, como la reducción de costos discutida a continuación, pero también se minimiza el impacto en otras actividades que se ven afectadas por la construcción, como por ejemplo el funcionamiento normal de un hospital o de una universidad durante una ampliación.

2. Reducción de costos

La reducción de costos producto de adoptar la prefabricación como técnica de construcción es un tema muy amplio y tiene muchos factores que afectan, tanto directa como indirectamente. Por consiguiente, se presentan solamente dos aspectos; el primero, es la evidencia de que la construcción prefabricada resulta en proyectos con menores costos. El segundo aspecto, es mostrar algunos de los mecanismos a través de los cuales se logra este beneficio. Para un análisis más detallado, véase Burgess et al (2013).

Al igual que la disminución de los plazos de la construcción, la mayoría de los autores coinciden en que la prefabricación conlleva a una reducción de los costos (Haas et al, 2000 en Schoenborn et al, 2012; Tam et al, 2007; McGraw-Hill Construction, 2011; Legmpelos, 2013; Wong et al, 2013; Burgess et al, 2013). Incluso, Cowles & Warner (2013) encontraron que este es uno de los dos principales beneficios de la prefabricación.

De acuerdo a las cifras de *SmartMarket Report 2011* de McGraw-Hill Construction (2011: p.19), el 65% de las firmas consultadas que actualmente emplean la prefabricación/modularización reportan que ha reducido su presupuesto de proyecto. El 42% del total de los que respondieron, encuentra que dichas técnicas les permiten reducir el presupuesto por 6% o más. En un caso de estudio realizados en USA, el arquitecto Michelle Kaufmann construyó un mismo diseño dos veces, una vez utilizando métodos de construcción tradicional, y la segunda vez, usando construcción modular. Según Burgess et al (2013), citando a otro autor, se determinó que la casa modular costó 25% menos que aquella con construcción en terreno.

Los mecanismos documentados en la literatura, a través de los cuales la prefabricación logra reducir los costos del proyecto, son varios. Algunos guardan relación con otros beneficios de esta técnica constructiva presentados en esta sección, mientras que otros destacan el efecto de los costos indirectos. Un ejemplo de ahorro relacionado con otro beneficio es el que indica Burguess et al. (2013): “El tiempo y, usualmente, los créditos, son factores en todos los proyectos de construcción, donde a más tiempo gastado en el proyecto, mayores se vuelven los costos”. En este marco, como la prefabricación reduce la duración de los proyectos, se reduce el periodo de préstamo, el de uso de instalaciones alternativas, acelera la entrada en producción de la inversión, entre otros.

Por último, de acuerdo a Kaufmann & Remick (2009) y McGraw-Hill Construction (2011), el mejor control de costos de la construcción prefabricada prefabricación en conjunto con una predictibilidad más certera del valor final, le otorgan gran valor a esta metodología desde la postura del mandante.

3. Mayor calidad

En la literatura, se documenta ampliamente el consenso de los expertos de la industria, en relación a que los componentes prefabricados ofrecen una calidad superior que los construidos en terreno (Legmpelos, 2013: p. 66; Burgess et al, 2013: p. 32; Wong et al, 2013: p. 3; Lu, 2007: p. 126-127; Tam et al, 2007: p.7; Cowles & Warner, 2013: p. 10). Inclusive, hay autores como Bell (2009), que apuntan a la alta calidad de la construcción prefabricada como su principal ventaja.

Sin embargo, la construcción tradicional no tiene ninguna limitación para lograr una alta calidad, pero como indica Davies (2005), el problema es la cantidad de recursos que se deben destinar para lograrlo. "No es que la construcción en sitio no pueda ser de alta calidad, más bien, la alta calidad es lograble a un costo inferior con la prefabricación fuera de sitio".

Las razones que entrega Burgess et al. (2013: p.32), en base al trabajo de otros autores, por las cuales se logra una mayor calidad empleando la prefabricación, se listan en la Tabla 2:

Tabla 2: Justificación de la mayor calidad a través de la prefabricación, según Burguess et al. (2013)

• **Instalaciones con ambiente controlado** (Bell, 2009; Fawcett et al., 2005; Huang, 2008, Wong et al, 2013: p. 3). • **Control de calidad** (Fawcett et al., 2005; Robichaud et al, 2005; Kaufmann & Remick, 2009). • **Automatización** (Robichaud et al, 2005). • **Precisión** (Robichaud et al, 2005; Kaufmann & Remick; 2009). • **Consistencia** (Johnsson & Meiling, 2009; Productivity Commission NZ, 2012; Kell, 2012). • **Prevención/reducción de defectos** (Productivity Commission NZ, 2012). • **Coordinación** (Bell, 2009). • **Proceso de mejora continua** (Gray & Davies, 2007).

Por otra parte, la mayor calidad se relaciona con menores costos por re-hacer trabajos mal hechos, así también con una reducción en los plazos. Otros beneficios derivados de la alta calidad de la construcción prefabricada es que, como indica Craig et al. (2002: p.40), "[…] puede manifestarse en la estética, requerimientos de mantención e incluso los costos de operación".

4. <u>Reducción de residuos sólidos</u>

Los residuos sólidos son un subproducto, en este caso de la construcción, los cuales deben ser retirados del sitio y dispuestos según la legislación vigente.

La experiencia de la industria estadounidense que emplea la prefabricación/modularización en la construcción, según el *SmartMarket Report 2011* de McGraw-Hill Construction (2011: p. 39-40), indica que:

- Un 76% reporta una reducción en la cantidad de residuos sólidos en el sitio de construcción, donde un 41% señala que lo hace en 5% o más.
- Además, un 62% reconoce que permite reducir el uso de materiales en la construcción, donde un 27% del total reporta reducciones del 5% o más.

En particular, se ha documentado por Koones (2010) que la industria de casas modulares en Estados Unidos genera residuos de alrededor del 2%, comparado con la construcción tradicional en terreno cuyos niveles llegan hasta el 40%. Según señalan Kaufmann & Remick (2009), esto se traduce en que el empleo de la modularización permite ahorrar entre un 50% a un 75% de los residuos sólidos.

Por otra parte, y debido a que los rellenos sanitarios de Hong Kong se están quedando sin espacio según cita Tam et al. (2007) al Departamento de Protección Ambiental del Gobierno de Hong Kong (1998), se llevó a cabo un estudio donde se cuantificó la reducción de residuos sólidos que permite la prefabricación frente a la construcción tradicional, separada en distintas partidas. Los resultados se presentan en la Tabla 3:

Tabla 3: Reducción del residuo sólido por partida asociado a la prefabricación de acuerdo a Tam et al. (2007).

Partida	Nivel de residuos promedio [%]	

	Convencional (A)	Prefabricación (B)	Porcentaje de reducción de residuos {C=(A-B)/A} [%]
Hormigonado	20	2	90
Instalación del refuerzo	25	2	92
Rematar con yeso	23	0	100
Colocación de azulejos	27	7	74

Actualmente en Chile, según un estudio realizado por la CONAMA (2010), la industria de la construcción es la mayor productora de residuos sólidos, con una participación que varía entre el 26% al 34% del total de residuos generados en el país. Dichos valores se asemejan a los de países desarrollados hace 15 años atrás, como indica Craven et al. (1994: pp. 89-98) para el caso de Australia, con una participación ente el 20% y el 30%, o el de Estados Unidos con un 29% según Rogoff & Williams (1994). En este marco y considerando los niveles de reducción asociados al uso de elementos prefabricados/modulares presentados en los párrafos anteriores, la industria tiene una gran oportunidad de mejora.

Las razones por las cuales la prefabricación puede resultar en una reducción de los residuos sólidos, radican principalmente en que sus operaciones se llevan a cabo en una fábrica especializada. Esto le permite lograr trabajos con mayor precisión y menos errores, reducir el despunte mediante una mejor asignación de los materiales, y una mejor preservación de estos al estar protegidos del deterioro por el clima, entre otros.

5. Mayor seguridad contra accidentes

De acuerdo a la literatura, es ampliamente reconocido que la construcción prefabricada reduce los riesgos de salud y seguridad de los trabajadores (Scofield et al, 2009; Shahzad, 2011 en Burgess et al, 2013; Lu, 2007: pp. 126-127 en Schoenborn et al 2013; Legmpelos, 2013: p. 34; MBI, 2010: p. 8).

Nuevamente, según las cifras de *SmartMarket Report 2011* de McGraw-Hill Construction (2011: p. 20), un 34% de los encuestados que actualmente emplea la prefabricación y/o construcción modular, encuentra que se obtuvo como resultado una mejora en la seguridad en el sitio de la construcción. De hecho, un estudio realizado en Nueva Zelanda por Burgess et al. (2013: p. 30), concluye que la tasa de accidentes fatales en las fábricas es un 75% menor que en la construcción.

Las razones por las cuales la construcción prefabricada contribuye a reducir los riesgos de salud y seguridad, tienen el mismo origen que la reducción de desechos; se traslada el trabajo desde el sitio a una fábrica. Esto tiene como implicancia una potencial mejora en las condiciones, ya que trabajadores no están expuestos a las condiciones climáticas adversas como indican Bell (2009) y Fawcett et al. (2005) en Burgess et al. (2013), los puestos de trabajo son fijos, se reduce o elimina el trabajo en altura, hay una mejor oportunidad de identificar y señalizar los riegos, además de una supervisión más efectiva.

Figura 6: Condiciones de los puestos de trabajos de una fábrica de ventanas para edificos habitacionales

6. Finalizar el diseño en una etapa temprana del proyecto

De acuerdo a la masiva encuesta realizada a actores de la industria de la construcción en Hong Kong por Tam et al. (2007), se determinó que una de las ventajas es congelar el diseño en una etapa temprana. Esto pasa a ser un requerimiento para adoptar la prefabricación de una cantidad significativa de elementos o de aquellos que sean críticos para el proyecto.

Por otra parte, el hecho de congelar el diseño en una fase temprana lo hace menos flexible a introducir cambios. Sin embargo, esto puede ser considerado como una ventaja, ya que, al invertir un mayor esfuerzo en el diseño en una fase temprana, permite introducir cambios con un costo mucho menor que si se introdujeran en una fase más avanzada. Durante varias de las reuniones sostenidas con expertos de la construcción, el autor pudo constatar que introducir cambios en el diseño posterior a adquirir compromisos con proveedores, es una práctica habitual. Un ejemplo es introducir cambios en la estructura posterior a la modulación del encofrado.

En este marco, el cliente debe tener claro que una vez congelado el diseño, no se deberían introducir cambios, considerando que los elementos se prefabrican en paralelo con las obras en terreno. Es por esta razón, que es importante incorporar al cliente en la toma de decisiones en una fase temprana, lo cual es una técnica de la ingeniería de valor.

7. Menor impacto en el sitio de la construcción

El menor impacto en el ambiente en que se ve envuelto el sitio de la construcción, es otro de los beneficios de la prefabricación documentados por el MBI (2010: p. 8) y Lu (2007) en Schoenborn et al. (2013: p. 6).

Esto se debe a que al emplear la prefabricación se traslada parte del trabajo a una fábrica, reduciendo las actividades en terreno, y, por consiguiente, minimizando el impacto en el entorno que rodea al sitio de construcción.

Por otra parte, como se presenta en el punto 1, al implementar la prefabricación típicamente los plazos de construcción son menores, por lo que, junto con disminuir la intensidad del impacto en el sitio, también reduce el periodo de exposición. Esto es de particular interés para industrias cuyas

operaciones se ven dificultadas durante la construcción de ampliaciones, o en el caso de universidades u hospitales.

8. Menor espacio de acopio en terreno

De acuerdo a la información recabada en diversos casos de estudio y entrevistas por McGraw-Hill Construction (2011: p. 23), Wong et al. (2013: p. 3) y el MBI (2010: p. 8), se determinó que la construcción prefabricada tiene asociada una amplia reducción de los recursos requeridos en terreno, como andamios, áreas de acopio y almacenamiento de materiales, producto de las entregas justo-a-tiempo.

9. Menor necesidad de mano de obra en la construcción

De acuerdo al *Análisis de la Productividad en Obras de Edificación en Chile* de abril de 2013, conducido por la CDT (2013) de la CChC, el sector de la construcción se encontraba demandando una alta cantidad de mano de obra, producto de la gran actividad y número de proyectos en ejecución, que, en conjunto con la alta demanda del sector minero, generó una escasez de recursos humanos capacitados. Esto resultó finalmente en que los proyectos de edificación debieron reestructurar sus procesos y asumir ritmos de avances menores a los proyectados.

En este marco, el beneficio de la construcción prefabricada de reducir la demanda de mano de obra en terreno, es de gran relevancia. Los mecanismos por los cuales logra esta reducción son principalmente dos. El primero, es que requiere menos personas trabajando en el sitio de la construcción, al trasladar el trabajo a una fábrica. Según Burguess et al. (2013), para que la fábrica funcione bien, se requiere un flujo de trabajo constante, acceso a herramientas y maquinaria, y uno personal entrenado apropiadamente. La importancia de dicho flujo de trabajo consistente, es que según Bell (2009), mejora la posibilidad de tener un personal permanente reteniendo la inversión de capacitación. El segundo mecanismo, relacionado con el primero, es que, a mayor nivel de mecanización de la fábrica, se requiere mayor habilidad en los trabajadores, pero menor número. Esto según la investigación de Clarke & Wall (2000: pp. 689-698) citada por Burgess et al. (2013).

2.1.2.3. Potenciales restricciones y obstáculos de adoptar la prefabricación

En la presente sección se presentan las principales restricciones y obstáculos potenciales asociados a la adopción de la prefabricación y/o modularización como método de construcción, los cuales se resumen en la Figura 7. Cabe resaltar que, en la mayor parte de la literatura, se observa mucho más contenido en los beneficios/ventajas que en las restricciones/desventajas.

Figura 7: Potenciales obstáculos principales al adoptar la prefabricación

1. Normas

En primer lugar, toda construcción debe estar dentro del marco de la normativa legal vigente de la zona donde se emplaza la obra. En Chile, el Instituto Nacional de Normalización (INN) es el organismo que tiene a su cargo el estudio y preparación de las normas técnicas a nivel nacional.

De acuerdo al área temática del Catálogo de Normas Chilenas Vigentes del INN (2015), la construcción tiene asociado el código F. Dentro de sus contenidos, se listan los de la Tabla 4:

Tabla 4: Listado contenidos normados en la construcción

F.1 General: Normas básicas de construcción
F.2 Diseño Arquitectónico
F.3 Diseño, Cálculo y Ejecución de Estructuras
F.4 Acondicionamiento Ambiental
F.5 Seguridad
F.6 Materiales y Componentes
F.7 Instalaciones
F.8 Herramientas
F.9 Mobiliario

El objeto de listar los contenidos que norman la construcción, es que la prefabricación es un concepto muy amplio donde cada elemento debe encontrarse dentro de las normas específicas que lo regulan; por ejemplo, un panel prefabricado debe cumplir algunas normas específicas, mientras que un módulo completo destinado a campamento minero debe cumplir una serie amplia de normas, al involucrar múltiples disciplinas.

En el marco normativo en cuestión, todas las soluciones deben cumplir con el diseño sismo resistente. Esto es una restricción para los elementos estructurales prefabricados, ya que es necesario conocer su comportamiento bajo estas condiciones de carga. Ejemplos de estudios en Chile que abordan este obstáculo es el de Plubins (2008): “conexiones sismo resistentes viga-columna en elementos prefabricados de hormigón”, o el de Loyola (2015): “diseño por desempeño de un edifico de paneles *insulated concrete form* (ICF)”. No obstante, en las subsecciones 2.2.1 y 2.2.2 se presentan ejemplos de soluciones prefabricadas, todas ellas con diseño sismo resistente.

2. Condiciones de mercado

En las reuniones que el autor sostuvo con expertos de la construcción, por ejemplo, con Juan Pablo Galleguillos (2015), pudo constatar que gran parte de ellos coincidían en que una de las principales restricciones de la prefabricación en Chile viene dado por las condiciones de mercado. La restricción en cuestión se puede separar en tres componentes; tamaño del mercado, oferta y demanda, y la percepción de la prefabricación por parte de los clientes.

La primera componente es el relativamente pequeño mercado nacional, comparado con países donde la prefabricación tiene mucha mayor penetración, como Estados Unidos, Alemania o Japón. Esto producto de que un mercado limitado impide una economía a escalas, que según Burgess et al. (2013: p. 2), es un requerimiento importante para que la prefabricación sea eficiente. En la sub-subsección 2.1.2.4 se presenta la experiencia de Nueva Zelanda en esta materia, cuya realidad es comparablemente similar con la de Chile.

El segundo componente es el círculo vicioso entre la oferta y la demanda; al introducir una nueva solución prefabricada en el mercado nacional, generalmente es una única empresa que la ofrece. Desde la perspectiva de la demanda, es decir, de aquellos que diseñan considerando implementar dicha solución, por lo general deciden no correr el riesgo de trabajar con un proveedor único, por lo que el nuevo producto no tiene demanda. Al no haber mayor demanda, tampoco aumenta la oferta, por lo que se genera un círculo vicioso. No obstante, de acuerdo a la filosofía lean, la transparencia entre la empresa y los proveedores puede ser una forma de sobrellevar esta restricción de mercado.

La tercera componente, es la percepción que tiene el cliente final de la prefabricación. Si es negativa, también pasa a ser una restricción para su implementación. Históricamente en Chile se ha utilizado esta técnica para la construcción de viviendas sociales, como es el caso del sistema prefabricado KPD, del cual se trata con mayor profundidad en 2.2.2.1. Al ver la construcción prefabricada como algo económico y de baja calidad, el cliente opta por la construcción tradicional en sitio. De acuerdo a un estudio realizado en la Universidad de Washington por Azari et al. (2013), para revertir esta situación, la principal estrategia es que las casas prefabricadas se vean como como cualquiera otra construida de la forma tradicional.

3. Transporte

La presente sección hace referencia al transporte por camión, puesto que, según un estudio publicado por CONICYT (2010: p. 10), es el principal modo de transporte de carga en Chile, siendo incluso cinco veces mayor que todos los otros combinados. Este modo de transporte introduce dos restricciones que cobran gran relevancia en la construcción modular; el aumento de costos, y las limitaciones por peso o dimensión de la carga.

Respecto de la limitación por el aumento de costo, un estudio específico para del transporte de módulos realizado en Estados Unidos por Smith (2011) y citado por Azari et al. (2013: P. 12), determinada que el costo por envío se vuelve prohibitivo cuando éstos deben viajar más de 150 a 200 millas desde la fábrica hasta el sitio de construcción. En ese el mismo país, Azari et al. (2013: p. 13) establece que la industria reconoce 125 millas (equivalentes a 200 kilómetros) como la máxima distancia práctica para el transporte de módulos. Sin embargo, las distancias mencionadas dependen de muchos factores, que no son necesariamente iguales en Chile, por lo que las cifras locales pueden variar significativamente.

La segunda restricción impuesta por el transporte en camión tiene dos componentes. La primera es el peso, donde en Chile los límites con los cuales pueden circular vehículos de cualquier especie por los caminos públicos, se fijan en el Decreto Supremo MOP Nº 158 de 1980. En dicho decreto, se establece que el límite de pesos máximos por eje o conjunto de ejes depende del tipo de eje y el tipo de rodado, mientras que el peso bruto total depende del tipo de remolque y de la distancia entre ejes. Para mayor información, véase el Manual de Autorizaciones Para Transportes Especiales (MOP, 2014: p. 3).

La segunda componente, es la limitación producto de las dimensiones máximas de vehículos, con o sin carga. Estas se establecen en la Resolución Nº1 de 1995 del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, y se presentan en la Tabla 5. Cabe resaltar que las dimensiones listadas consideran tanto el vehículo como la carga.

Tabla 5: Dimensiones máximas permitidas para el transporte en carretera en Chile

Dimensión	Descripción	Valor [m]
Alto	Para los vehículos en general	4,20
Ancho	Para todos los vehículos	2,60
Largo	Tracto-camión con semirremolque	18,60
	Camión con remolque o cualquier otra combinación	20,50

Sin embargo, el Artículo Nº63 del DFL Nº1 de 2007 establece que: “en casos de excepción debidamente calificados y tratándose de cargas indivisibles, la Dirección de Vialidad podrá autorizar la circulación de vehículos que excedan las dimensiones o pesos establecidos como máximos, con las precauciones que en cada caso se disponga”. Para mayor información respecto de los pesos máximos autorizables y las condiciones a cumplir, refiérase al Manual de Autorizaciones Para Transportes Especiales (MOP, 2014). Cabe resaltar que en dichos casos se debe emplear una solicitud de sobredimensión y/o sobrepeso, según corresponda.

4. <u>Financiamiento</u>

   Esta restricción afecta principalmente a la construcción prefabricada modular.

La construcción tradicional en terreno permite que los materiales y la mano de obra se vayan desplegando en fases espaciadas según la planificación de la obra. Esta división del trabajo permite que los pagos se realicen a lo largo del proceso de construcción. Según Azari et al. (2013: p. 21) y Tam et al. (2007), en cambio, los proyectos que adoptan la construcción modular, requieren una mayor concentración de pagos, y por consiguiente de financiamiento por adelantado. Por dicha razón, según indica Azari et al (2013) citando a Pickerell (2012), en muchos casos, el fabricante de los módulos requerirá un depósito considerable, si es que no el pago completo, antes de comenzar la fabricación.

Esta restricción pudo ser corroborada por el autor en una entrevista a un arquitecto experto de la industria nacional, donde se puso como ejemplo los altos costes iniciales como una de las restricciones de implementar baños modulares completos en edificios habitacionales, ya que producto de la alta densidad de muros perimetrales típicos de los edificios en Chile, se debían insertar antes de concluir la obra gruesa de cada piso, por lo cual se debían comprar con mucha anticipación, incrementando considerablemente los costos iniciales.

No obstante, a pesar de que implementar la construcción prefabricada modular requiere mayor financiamiento por adelantado, la experiencia de la mayoría de los autores indica que ésta definitivamente conduce a reducciones de costos totales frente a la construcción tradicional, como se muestra en el punto 2 de la sub-subsección 2.1.2.2.

5. Diseño arquitectónico

El diseño arquitectónico es otra de las restricciones que afecta tanto a la prefabricación como la construcción modular, como el autor pudo constatar en las múltiples reuniones sostenidas con los expertos de la construcción. A pesar de que afecta a la prefabricación de elementos individuales, como las ventanas, cobra mayor importancia como restricción para la construcción modular.

Las principales restricciones asociadas al diseño arquitectónico, según Azari et al. (2013: p. 36) se listan a continuación:

- Falta de estandarización.
- La cantidad de planificación requerida en una fase temprana del proceso de diseño, puede verse incrementada si el arquitecto no está familiarizado con las restricciones de la construcción modular.
- En comparación con la construcción tradicional, el proyecto tiene una mayor necesidad de coordinación entre el arquitecto, el fabricante y la empresa constructora.
- El diseño debe considerar como limitación el transporte de los módulos desde la fábrica hasta el sitio de construcción.

La falta de estandarización es una restricción que tiene varios componentes, entre ellos no considerar la modulación del moldaje durante las fases de diseño de los elementos, dimensionar en unidades de centímetro en vez de múltiplos de 5 o 10, variar la altura entre pisos en cada edificio, considerar puertas y ventanas de dimensiones no establecidas por los fabricantes, entre un sin número de otros.

2.1.2.4. Estudio del impacto de los beneficios de la prefabricación en Nueva Zelanda

Según el estudio conducido por Burguess et al. (2013: p.21), aparentemente los beneficios de la prefabricación, y en particular los asociados a reducción de costos, dependen del tamaño del mercado. Es por dicha razón, junto con una escasa bibliografía de origen nacional, que es importante que se hagan estudios de esta materia en la realidad chilena.

Sin embargo, al comparar el tamaño del mercado y la sismicidad característica de la región, la realidad de Nueva Zelanda es relativamente más comparable al caso chileno, por lo que es de interés para esta memoria estudiar su experiencia, la cual se resume en la presente sub-subsección.

En este contexto, el beneficio de reducir los costos de un proyecto al emplear la prefabricación frente a la construcción tradicional, lo cual es ampliamente documentado en la literatura de países con mercados grandes, no se confirmaba siempre en el caso de Nueva Zelanda. Esto según la investigación de Burgess et al. (2013: p. 41), basado en un caso de estudio y en conjunto con la la experiencia de los miembros afiliados a PrefabNZ, una organización que agrupa a empresas dedicadas a la prefabricación. La principal causa a la cual se apunta, es al pequeño tamaño del mercado de este país, lo cual conlleva a la incapacidad de explotar la mayor eficiencia inherente de la producción mecanizada en masa de productos similares.

No obstante, Burguess et al. (2013: p. 41) demuestra que hay una amplia gama de beneficios económicos al utilizar la prefabricación en la construcción, donde la principal es una mayor certeza en la estimación del presupuesto. También son considerables el acopio más eficiente en terreno y una menor cantidad de trabajo en el sitio, los cuales se traducen en mayor seguridad, menor impacto en el entorno y menos retrasos. Esto se demostró por dicho autor tanto para la construcción residencial como la no-residencial.

Por otra parte, internacionalmente se documenta que la prefabricación tiene un menor impacto en el medio ambiente que la construcción tradicional, lo cual es también válido en el estudio realizado por Burguess et al. (2013: p. 42) en Nueva Zelanda.

A pesar de que hace falta mayor investigación del impacto de la prefabricación en la realidad chilena, el autor pudo visitar sitios de construcción y una planta de elementos prefabricados. Esto le permitió constatar que las condiciones de trabajo en la fábrica son muy superiores a las del terreno, donde en la primera son caracterizadas por espacios de trabajo fijos, herramientas industriales automatizadas, mano de obra especializada que se dedica a una tarea única, buena iluminación y posturas de trabajo cómodas. Adicionalmente, se observó que no se hacen trabajos en altura y que los riegos debidamente señalados, resultando en estándares de seguridad más altos. Respecto de la producción de residuos, se pudo observar que gran parte de ellos, el cual consistía principalmente en despunte, tenían destinado un espacio de acopio y que posteriormente era vendidos a una fábrica de reciclaje. En general, se observó todos aquellos motivos por los que el trabajo de manufactura es mucho más eficiente que el de la construcción en terreno, y que conlleva a los beneficios indicados en 2.1.2.2.

2.2. ESTADO DE LA PRÁCTICA

La presente sección contiene ejemplos de construcción prefabricada, tanto en el extranjero como en Chile.

2.2.1. Ejemplos de construcción prefabricada en el extranjero

En la presente sección se presentan proyectos modernos a lo largo del mundo que emplean la prefabricación o construcción modular. Con el efecto de hacerlo comparable con la realidad nacional, marcada por la alta sismicidad, se escogieron solamente proyectos con diseño sismo-resistente.

2.2.1.1. T30A Tower Hotel (China): 30 pisos en 15 días

De acuerdo a Magee (2012), en la Provincia China de Hunan, cerca del lago Dongting, la compañía constructora Broad Group, especializada en arquitectura sustentable, logró erguir un hotel de 30 pisos y 17.000 [m^2] en sólo 15 días. En la Figura 8 se muestran tres fotografías capturadas a lo largo del proceso de construcción, el cual puede ser visto en línea en el siguiente link[2].

[2] http://en.broad.com/video.html?3

Figura 8: Construcción de Hotel en 360 horas, Hunan, China (Failed Architecture, 2013)

De acuerdo a la compañía encargada de su construcción, Broad Group (2012: p. 2), el complejo fue construido a partir de elementos prefabricados transportados por camión y montados con grúa, donde solamente el 7% del total de las horas de construcción fueron empleadas para la instalación en terreno. El sistema modular se basa en un "panel principal" de 3,9 x 15,6 [m], el cual comprende tanto el cielo como el piso, conteniendo además los ductos de ventilación, agua y electricidad. Todas las columnas, diagonales, puertas, ventanas, muros e incluso las partes de la cocina y baños, son transportadas desde la fábrica sobre el "panel principal.

Según la compañía Broad Group (2012: p. 2), esta metodología les permitió un ahorro de materiales frente a la construcción tradicional, siendo 10 a 20% menor el consumo de acero y un 80 a 90% el de hormigón. Por otra parte, indican que las pérdidas asociadas a la construcción fueron menos del 1% del de un edifico convencional.

La estructura es de marcos de acero arriostriados, la cual, de acuerdo a la compañía constructora, tiene una resistencia a terremotos de magnitud 9. El comportamiento fue verificado con una simulación de un modelo a escala 1:10 en el State Key Laboratory of Building Safety and Environment of China Academy of Building Reaserch (CABR) (Broad Group, 2012: p. 10).

2.2.1.2. Cityspaces 38 Harriet (EEUU): Reducción de un 77% de la duración del proyecto

El edificio Cityspaces 38 Harriet es un ejemplo de interés para efectos de esta memoria ya que es completamente modular, está ubicado en una zona con alto riesgo de actividad sísmica, y además, según la compañía inmobiliaria Panoramic Interests (2015), cuenta con la certificación de edificio sustentable más alta: LEED Platinum.

Es un edificio de 23 micro-departamentos, que cuenta con aproximadamente 1.100 metros cuadrados repartidos en 4 pisos. Se ubica en la ciudad norteamericana de San Francisco, California, la cual, de acuerdo al mapa de riesgo por actividad sísmica del USGS (2014), es una de las zonas más peligrosas de todo Estados Unidos.

Los módulos fueron manufacturados en una fábrica especializada de la compañía ZETA, y transportados alrededor de 140 kilómetros por camión, hasta el vecindario de South of Market. De acuerdo a la publicación del MBI (2015), la construcción completa tomó tres meses, una fracción de los trece meses estimados para el mismo proyecto empleando la construcción tradicional. La Figura 9 muestra la instalación de los módulos en el sitio:

Figura 9: Instalación de los módulos del edificio CITYSPACE 38 en el sitio (MBI, 2015)

En la entrevista publicada por el MBI (2015), el vicepresidente de marketing de la empresa manufacturera de los módulos, Shilpa Sankaran, señala: "Hay entre un 50 a 90% menos de pérdidas en la construcción a causa del proceso y de la adquisición de materiales, debido a que éstos se compran exactamente según las necesidades del proyecto, por ejemplo, la madera pre-cortada. También podemos reutilizar materiales en vez de tirarlos a la basura, producto de que no estamos en el sitio de la construcción".

2.2.2. Ejemplos nacionales de construcción prefabricada

Hasta la fecha, se ha implementado la prefabricación y modularización en distintas industrias en Chile, con distintos resultados. En la presente sección se muestran algunos ejemplos de interés, como es el caso de los descontinuados edificios habitacionales KPD, los campamentos modulares para las compañías mineras, y un sistema de edificación en altura a partir de elementos estructurales prefabricados.

2.2.2.1. Conjuntos habitacionales KPD

En el ámbito de la edificación habitacional, un ejemplo destacable es el de los conjuntos habitacionales KPD. El sistema KPD es un sistema productivo de fabricación en serie de paneles de

hormigón armado, aportado por el gobierno ruso después del terremoto de Illapel de 1971. El sistema fue ideado en 1948 por el francés Raymond Camus (PUCV, 2014).

El sistema consistía en grandes paneles de hormigón, los cuales tenían ya integrados todas las instalaciones como cañerías, y canalización eléctrica, además de los anclajes para su instalación en terreno. "[…] Estos paneles eran fabricados por un sistema de cadena de montaje que implicaba una gran infraestructura del tipo industrial bajo un circuito lógico de fabricación: comenzaba con el acopio de materia prima en grandes canchas al interior del terreno que ocupaba en Belloto, y luego bajo una gran nave techada, la integración a los moldes de todo lo necesario para sacar al final de la línea los paneles listos para ser transportados a terreno" (PUCV, 2014).

La fábrica llegó a construir 153 blocks de departamentos -de entre 64 a 74 m^2- esparcidos en Viña del Mar, Quilpué y Santiago (PUCV, 2014). Posterior al golpe de estado de 1973, se le cambió el nombre de la fábrica a VEP: Vivienda Económica Prefabricada. El año 1979, la fábrica fue finalmente cerrada.

De acuerdo al texto "Conjuntos habitacionales KPD, V Región" de la Escuela de Arquitectura y Diseño de la Universidad Católica de Valparaíso (PUCV, 2014), las estructuras no han tenido problemas con los terremotos de 1985 y 2010. La Figura 10 es una fotografía reciente del Bloque Belloto, construido con el sistema en cuestión.

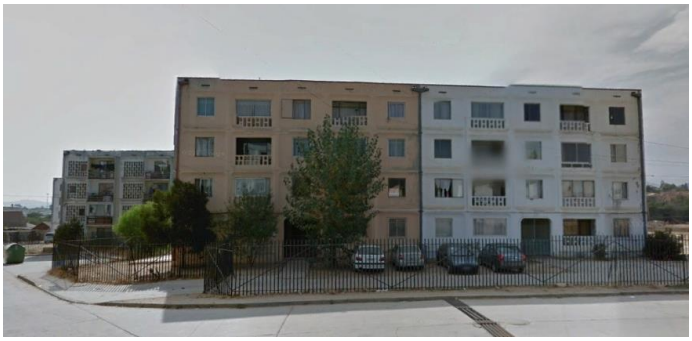


Figura 10: Bloque El Belloto, construido con el sistema KPD (PUCV, 2014)

2.2.2.2. Campamentos mineros

A juzgar por la mayor cantidad de proyectos en las páginas web de las empresas especializadas en construcción prefabricada y/o modular, junto con la experiencia del autor en esta industria, en la minería es frecuente el uso de dicha técnica para la construcción de los edificios de oficinas a emplazarse en faena y para aquellos destinados a campamentos.

La principal razón de optar por esta metodología constructiva es que permite trasladar el trabajo desde el sitio de emplazamiento del edifico a una fábrica especializada, ventaja que cobra gran relevancia al considerar las adversas condiciones de las zonas donde típicamente se encuentran las minas, como el clima, la altura geográfica, y la escasez de mano de obra especializada. A esto se le suman las estrictas políticas de seguridad de la industria, donde se reduce el riesgo de accidentes disminuyendo la cantidad de personas trabajando en terreno.

La Figura 11a corresponde al *Campamento 5.400* de Minera Escondida, ubicado a una altura de 3200 msnm en la región de Antofagasta. Fue construido por la empresa TECNO FAST (2015a),

la cual indica que “la obra está conformada por cuatro edificios de tres pisos, con tecnología modular Plug & Play, y tiene una superficie cercana a los 14.000 m^2, donde cada uno de estos edificios consta de 86 unidades modulares transportables de dos dormitorios y baño privado”

(a) (b)

Figura 11: (a) Campamento 5.400 – Minera Escondida (TECNO FAST, 2015a); (b) Campamento 2000 - Minera Doña Inés de Collahuasi (TECNO FAST, 2015b)

Otro campamento minero, también construido por TECNO FAST (2015b), se muestra en la Figura 11b. Corresponde al *Campamento 2000* de la Minera Doña Inés de Collahuasi, ubicada en la región de Tarapacá, a 180 km al sur-este de Iquique. El proyecto incluyó 51 edificios, donde “la construcción de este inmenso campamento inicial, para trabajadores y contratistas, fue realizada en sólo 6 meses, venciendo dificultades climáticas y geográficas, ya que fue construido a 3.500 msnm y a más de 2000 km de distancia a nuestra planta” (TECNO FAST, 2015b).

2.2.2.3. Edificio Chacay (Temuco): Reducción de un 33% del tiempo de obra gruesa

Este ejemplo es de gran interés para esta memoria, ya que, según García (2014), el Edificio Chacay se presenta como uno de los primeros edificios prefabricados de oficinas en altura con aislación sísmica en Chile.

El edificio, de aproximadamente 2.700 m^2 repartidos en 6 pisos y 1 subterráneo, está estructurado en base a pórticos compuestos por elementos prefabricados de hormigón armado. De acuerdo a su compañía constructora MOMENTA (2015), el proceso de montaje consiste en erguir las columnas, las cuales contienen los soportes para montar las vigas, como se muestra en la Figura 12. Después de las vigas, se instalan las losetas, para posteriormente colocar la malla electrosoldada y la armadura superior de las vigas que atraviesa las columnas. Luego, se montan los ductos de instalaciones que van embebidos en la losa, para finalmente proceder al hormigonado de la sobrelosa estructural. “Adicionalmente, este edificio cuenta con un sistema de aislamiento sísmico conformado por aisladores elastoméricos y friccionales, instalados en el cielo del subterráneo, y en otra a nivel de fundaciones” (MOMENTA, 2015).

(a) (b)

Figura 12: (a) Unión de viga-columna; (b) la unión incluyendo la terminación (MOMENTA, 2015)

La Figura 13 contiene dos fotografías durante el proceso de construcción, donde la de la izquierda se observa el montaje de las columnas prefabricadas, mientras que la de la derecha corresponde a un entrepiso típico.

(a) (b)

Figura 13: Fotografías durante la construcción del edificio Chacay (MOMENTA, 2015)

De acuerdo al artículo de García (2014) en la revista BIT de julio de 2014, el montaje se realizó en doce días con seis trabajadores. La obra gruesa se realizó en poco menos de cuatro meses, la cual, bajo un sistema de construcción tradicional, estaba proyectada para seis. Como resultado, el costo de la obra gruesa fue muy similar al sistema tradicional.

2.2.3. Otras buenas prácticas relacionadas con la memoria

En el Anexo A se presentan instrumentos aptos para la construcción que permiten generar los flujos de información requeridos por el modelo de Bernold & AbouRizk (2010) presentado en 2.1.1.5., donde además algunos fueron utilizados en esta investigación como se detalla en el Capítulo 5.

En el Anexo B se resumen características importantes de los encofrados modernos, tales como sus tipos, ecuaciones de diseño relevantes y la modulación de los paneles de muro.

CAPÍTULO 3: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Tal como se menciona en la introducción, la construcción es una industria con una alta tasa de pérdidas. Sin embargo, se ha planteado que la prefabricación es una metodología constructiva que tiene el potencial de reducir dicha tendencia, en base a los resultados de numerosos estudios presentados en 2.1.2.2. Algunos ejemplos son el trabajo publicado en el *SmartMarket Report 2011* de McGraw-Hill Construction (2011: p. 39-40), donde se indica que un 76% de los encuestados reporta una reducción en la cantidad de residuos sólidos en el sitio de la construcción, mientras que, en algunas actividades específicas, Tam et al. (2007) encontró que la reducción de residuos puede llegar al 90%. No obstante, para que los beneficios de la prefabricación se materialicen, Ghio et al. (1997) establece que es necesario que se utilicen procedimientos específicos desde las fases iniciales del proyecto, así como durante el proceso constructivo.

Un ejemplo de dichos procedimientos específicos según Burguess et al. (2013), es que los elementos se prefabriquen en masa y de dimensiones estándar. Sin embargo, en base a observaciones realizadas en construcción en sitio, entrevistas a expertos de la industria, y a lo observado durante una visita a una fábrica proveedora de elementos para la construcción, la práctica de usar la prefabricación en masa y de dimensiones estándar, no es habitual en algunos elementos de las edificaciones habitacionales en altura. Un ejemplo destacado por un arquitecto durante una entrevista con el autor (Juan Pablo Galleguillos, 2015), son las ventanas prefabricadas, las cuales se utilizan como objeto de estudio según se detalla a continuación.

Típicamente las ventanas se fabrican bajo la modalidad de medidas rectificadas, la cual consiste en medir cada vano posterior al proceso de terminaciones finas para luego fabricar cada ventana según las medidas específicas del vano que las aloja. Esto es análogo a hacer cada ventana como un traje a la medida en vez de dimensiones estandarizadas o tallas. Debido a esta situación, el proveedor no puede fabricarlas en masa, mermando los beneficios de la prefabricación en serie, lo cual se traduce en pérdidas, y consecuentemente, en un aumento del costo unitario de cada ventana. Basado en observaciones en terreno y entrevistas a expertos, el problema radica en la poca precisión en la construcción en obra de muros de hormigón que dan lugar a un vano.

Para efectos de esta memoria, hay dos tipos de vanos. El primer tipo son los originados como una abertura en el muro y que poseen un antepecho, por lo se encuentran sobre el nivel del piso. La Figura 14 muestra este tipo de vanos y su metodología constructiva típica, la cual consiste en insertar los moldes de las jambas dentro de los paneles de muro. El segundo tipo son los vanos originados entre dos términos muro, que generalmente se utilizan para puertas y puerta-ventanas, al encontrarse a nivel del piso. La Figura 15 muestra este tipo de vanos y su metodología constructiva, la cual consiste en colocar los moldes de las jambas como tapas en los paneles de dos muros coplanares distintos. Como son dos problemas diferentes, para la presente investigación se selecciona el segundo tipo: el de los vanos originados entre dos términos de muro.

Por consiguiente, es necesario generar el conocimiento de las causas que tienen como efecto, la baja precisión de vanos de ventanas en términos de muro construidos en obra. Una vez determinadas dichas relaciones, se propone una solución que apunta a la causa raíz. Para establecer que la solución propuesta efectivamente elimina el problema, es necesario probarla mediante un experimento. Esto conlleva a otro problema, que es la alta cantidad de variables no controlables debido a las difíciles condiciones en la construcción, a lo cual se suma la dificultad de encontrar obras que estén dispuestas a realizar los experimentos.

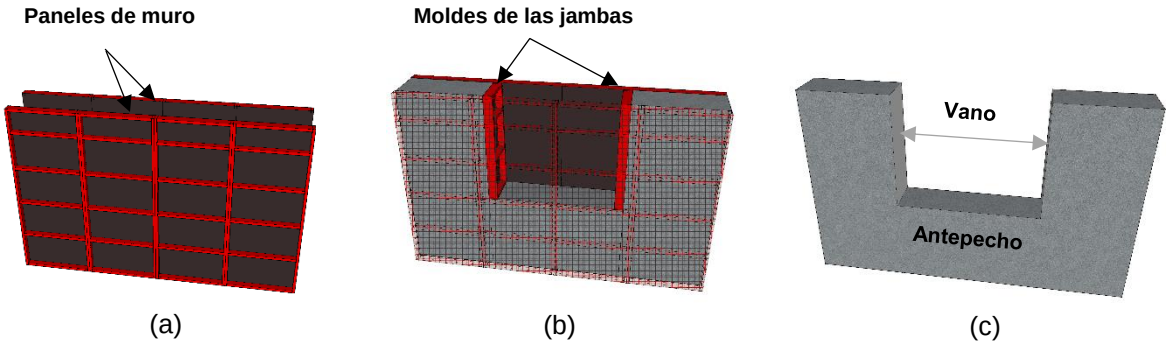


Figura 14: Proceso constructivo de vanos originados como abertura de un muro: (a) paneles de muro; (b) molde de las jambas al interior del panel de muros; (c) vano y antepecho

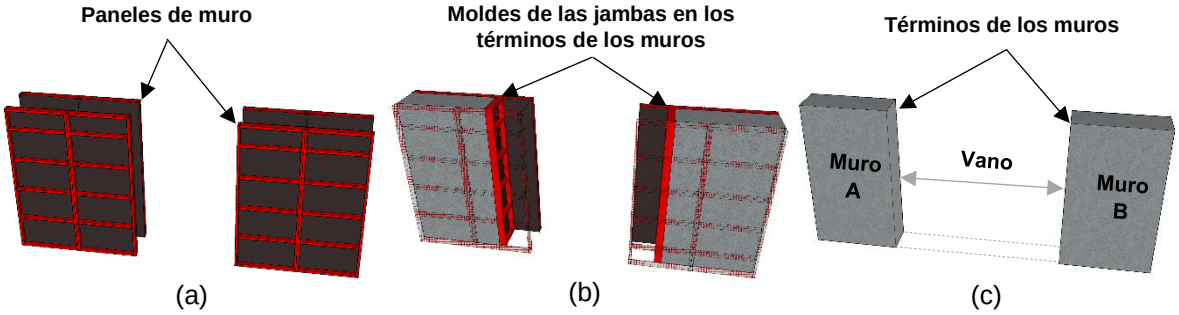


Figura 15: Proceso constructivo de vanos en términos de muro: (a) paneles de dos muros coplanares; (b) molde de las jambas como tapas del moldaje; (c) vano entre dos muros o secciones de muro

Adicionalmente, es de interés cuantificar las pérdidas producto de hacer las ventanas en masa en vez de a la medida. Esto permite conocer el beneficio de aplicar la solución propuesta al problema, junto con presentar las pruebas de que la prefabricación en masa de las ventanas resulta en una reducción de las pérdidas.

3.1. HIPÓTESIS

En base a lo establecido, las hipótesis de trabajo son las siguientes:

a. Prefabricar las ventanas de acuerdo a las dimensiones establecidas en los planos, en vez de a la medida de cada vano ya construido, permite reducir los costos de su fabricación en un 10%;

b. Es posible crear un nuevo soporte para los moldes de las jambas originadas en el término de muros, el cual permite controlar la geometría de los vanos con suficiente precisión para instalar ventanas prefabricadas de medidas pre-establecidas;

c. En base a la presión lateral del hormigón durante el vertido (ACI, 2004), la resistencia a la fuerza axial de un soporte individual en cuestión será de 692 [kgf], con una respectiva deformación menor o igual a 2 [mm], la cual es determinada por la tolerancia en vanos en muros de hormigón (CDT, 2009: p.11).

CAPÍTULO 4: METODOLOGÍA

En este capítulo se detalla cómo se probarán las hipótesis. En este contexto, como la hipótesis (a) guarda relación con las pérdidas, en la última sección del presente capítulo se presenta la metodología para la colección y análisis de los datos, con el objetivo de cuantificar dichas actividades. Sin embargo, en primer lugar, un modelo del proceso que tiene como producto una ventana instalada en una obra de edificación tiene que ser establecido, de lo cual trata la sección 4.1. En segundo lugar, es necesario generar un modelo causa-efecto, el cual, en conjunto con el del proceso, permiten identificar la causa raíz del problema. Una vez identificada la causa raíz, el capítulo finaliza con una breve descripción de cómo los capítulos siguientes probarán las hipótesis, mediante el diseño, desarrollo y pruebas de una nueva tecnología que aborde la causa en cuestión.

4.1. MODELO DE LOS PROCESOS

Con el objeto de estudiar los procesos para tener una ventana instalada en un edifico habitacional de hormigón armado, se realiza una modelación de los cuatro subprocesos involucrados; obra gruesa, terminaciones, fabricación e instalación. El tipo de modelo a utilizar corresponde al input-output, el cual permite representar la naturaleza secuencial cíclica de los procesos.

La modelación se realiza en base a extensas observaciones del trabajo en terreno, las cuales se resumen para cada subproceso en una subsección diferente, incluyendo fotografías.

4.1.1. Análisis del proceso de Obra gruesa

El proceso comienza con el dibujo de las trazas en la losa, las cuales indican la posición donde se debe instalar el refuerzo y donde deben instalarse los moldes del encofrado, delimitando el contorno de los muros. Se observa que las trazas que marcan el término de muro (originando un vano de puerta-ventana entre dos términos), se realizan considerando como punto de referencia los ejes del edificio, y no relativas entre los términos. Esto puede generar que un vano quede trazado con dimensiones diferentes a las estipuladas en los planos.

La segunda tarea consiste en la instalación del refuerzo de muro, y luego se continúa con el levantamiento de los moldes de muro. En esta última tarea, se clavetean unas tablas en los paneles de muro (ver Figura 16b), las cuales se utilizan como tope para el molde de las jambas o términos de muro. Se observa que este sistema de soporte es impreciso, ya que las tablas se colocan previo al levante de los paneles y no permite ajustes posteriores. A continuación, se procede a la instalación del molde de las jambas (Figura 16a), donde se observa que este molde es de madera construido en obra. Para posicionarlo sobre la traza y aplomarlo, se introducen cuñas entre el molde en cuestión y las tablas mencionadas en la tarea anterior, utilizando un plomo que en los días de viento debe ser introducido en un balde con agua para evitar su movimiento. En general, se observa que la fijación del molde de jambas carece de un accesorio apropiado provisto por el fabricante de encofrados, y que se realiza con una solución ideada en obra, la cual es imprecisa y, además, daña la placa fenólica del panel al perforarla con clavos. También se observa que los accesorios del encofrado son constantemente golpeados y arrojados, razón por la cual poseen un diseño y construcción tan robusta. Además, los maestros evitan utilizar accesorios cuya instalación no sea fácil y rápida, y que requiera herramientas especiales.

Posterior a la instalación del encofrado, se procede al vertido del hormigón. En esta tarea se observa que no se realiza ninguna medición para controlar si el molde de la jamba artesanal se mantiene en su posición. El proceso continúa con la instalación del encofrado de la viga superior del vano en conjunto con el de la losa superior. Posteriormente se instala el refuerzo de la loza, terminando con el vertido del hormigón. En estos procesos, se observa que para el encofrado de la viga se utilizan clavos que fijan placas fenólicas a la jamba hormigonada previamente (Figura 16c).

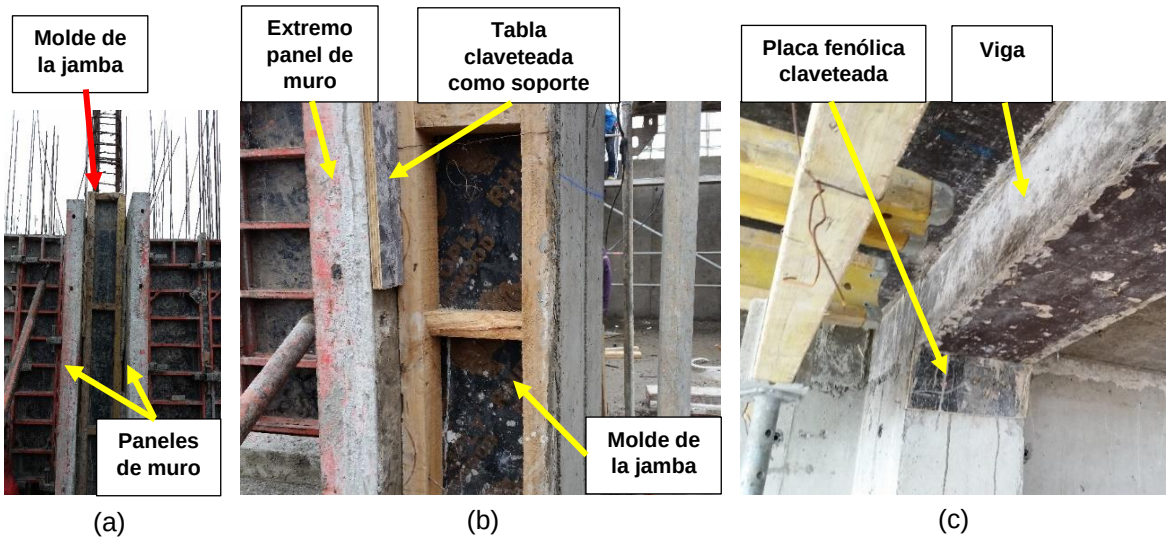


Figura 16: (a) Instalación del molde de la jamba hacia el interior de los extremos de los paneles de muro; (b) Descimbrado de muros, donde se observa la tabla claveteada que se utiliza como soporte; (c) Descimbrado del encofrado de viga y losa del piso superior, se observa la placa fenólica claveteada a la jamba hormigonada previamente

En el Anexo C – Mediciones de vanos en construcción se resumen los datos obtenidos utilizando un instrumento láser, cuya precisión es de ± 1 [mm] (Anexo A). Como en el diseño del proceso constructivo del edificio al cual corresponden las medidas, se asumió que los vanos son sometidos a reparaciones mediante terminaciones gruesas y finas, incluyendo la construcción del alféizar, los vanos son de mayor tamaño considerando el espesor de la reparación, por lo no se puede calcular la variabilidad de las dimensiones con respecto a la establecida en los planos. Sin embargo, en los vanos que por planos deberían ser iguales al ser de dos pisos consecutivos, se observan diferencias mayores a 5 [mm], que es la tolerancia de las ventanas prefabricadas, justificando la necesidad actual de hacerlas a la medida.

4.1.2. El proceso de terminaciones

Terminaciones posee dos partes; (a) gruesas y (b) finas. Las gruesas consisten en añadir una capa de mortero de aproximadamente 1,5 [cm] a todo el contorno del vano, exceptuando el piso (Figura 17a). Se observa que esta tarea se realiza por dos jornales posterior a un nuevo trazado, de forma manual utilizando una llana rectangular lisa. Este proceso toma alrededor de 1 día para ventanas de 2,5 x 1,7 [m], 1,5 día para ventanales de 4,5 x 2,2 [m], y 2 días para ventanales de 7,7 x 2,2 [m]. En la Figura 17b se observa la jamba o pierna de muro con terminación gruesa.

La segunda parte es la terminación fina y la construcción del alféizar. Se observa que posteriormente se realiza una recepción del vano por parte de la empresa proveedora de ventanas, la cual puede ser rechazada o aceptada según las mediciones se encuentran dentro de la tolerancia especificada. En caso de ser aceptada, se procede a tomar las medidas de fabricación.

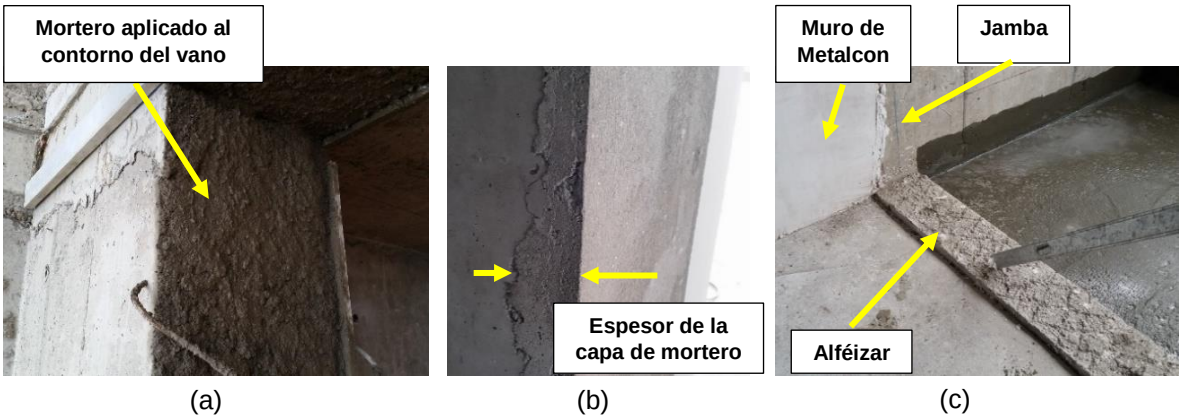


Figura 17: (a) Terminación gruesa del vano, consiste en aplicar mortero a todo el contorno de forma manual usando una llana; (b) Pierna de muro con capa de terminación gruesa; (c) Construcción del alféizar posterior a la terminación fina con yeso

4.1.3. Proceso de fabricación de las ventanas

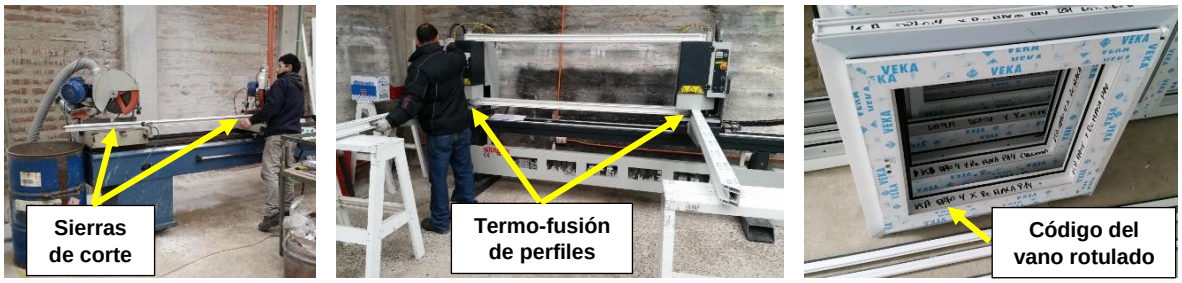
El proceso observado corresponde a la fabricación a la medida de ventanas tipo termopanel con marco de PVC. El proceso comienza con la tabla de medidas de los vanos, donde a cada uno se le asigna un código de identificación dependiendo de la obra, piso, departamento y número de ventana. Con esta tabla, se manda a hacer a otra fábrica especializada el termopanel a la medida, y se comienza con el corte de los perfiles para el marco y el bastidor. Posteriormente, se realiza el sacado o remoción de material para la instalación de los herrajes. Luego, se lleva a cabo la termo-fusión o soldado de los perfiles que conforman el bastidor o el marco, la cual finaliza con una limpieza de los cordones de soladura. El proceso continúa con la instalación de los herrajes, el corte e instalación de los junquillos, una prueba para verificar que los herrajes funcionen correctamente, y de pasar la prueba, se acopian para el posterior despacho.

En la fábrica se realizan varias observaciones producto de hacer las ventanas y puerta-ventanas a la medida, metodología que en la industria le denominan de medida rectificada, en vez de fabricarlas en masa, a la cual se le llama de medidas acordadas. En primer lugar, en los procesos corte de perfiles, sacado de herrajes y termo-fusión, las máquinas deben ser reconfiguradas al tamaño de cada vano, lo cual toma más tiempo que el proceso propiamente tal. Además, los perfiles cortados deben ser rotulados y acopiados dentro de la línea de producción en grupos según al vano al cual pertenecen. Esto también requiere de mucho más tiempo y gestión que si fueran hechas todas en masa. Por otra parte, al producirse un error en alguna parte del proceso, hay que comenzar desde un principio cortando los perfiles a la medida, ya que al ser de distinta medida no son reemplazables.

En la entrevista con el jefe de operaciones de la fábrica Aluvima, Cristian Morales (2015), indicó al autor que el ahorro de tiempo por hacerlas en masa de medidas pre acordadas en los planos, puede llegar a ser hasta un 50% versus a hacerlas a la medida. Además, permite a la planta gestionar de forma más eficiente qué pedidos producir, al no tener que esperar las medidas para comenzar la

fabricación. Por otra parte, la tasa de errores (por ejemplo, que una ventana no calce en un vano) es mucho menor, lo cual tiene un gran impacto en el costo considerando los materiales, el tiempo, el transporte y hacer una ventana única cuando la línea de producción se encuentra realizando otros pedidos. En base a todas las razones planteadas, el Gerente de Administración y Operaciones de dicha empresa, Victor Riquelme (2016), indica al autor que fabricar las ventanas en masa versus a hacerlas de medida rectificada, permite reducir los costos de fabricación entre un 5% y un 8% dependiendo del modelo. En el caso de los termopaneles de PVC, dicha reducción es aproximadamente un 7%.

Por otra parte, se observa que las condiciones de trabajo son muy superiores a las en obra, como se planeta en el estado del arte. Los puestos de trabajo son fijos y ergonómicos, hay buena iluminación, los riesgos están debidamente señalados, no hay trabajos en altura, tanto los trabajadores como los materiales están protegidos del clima, entre otras.



(a) (b) (c)

Figura 18: (a) Corte de los perfiles de PVC, de acuerdo a la medida de cada vano, lo cual requiere ajustar la máquina para cada corte; (b) Termo-fusión realizada por una máquina, la cual también se debe ajustar para el tamaño de cada ventana; (c) Acopio de ventanas pre-armadas, donde se observa el código del vano al cual pertenece rotulado con plumón en cada perfil.

4.1.4. Instalación

El subproceso de instalación comienza con el acopio en obra de los marcos, bastidores y cristales por separados (Figura 19a). Éstos son izados con la grúa si está disponible, o con un huinche eléctrico en caso contrario. Luego, se realiza una asociación entre cada vano y su correspondiente ventana o puerta-ventana, la que es seguida por una comprobación de si la ventana calza en el vano, utilizando para ello el marco (Figura 19b). En caso de que no calce, se opta por reparar el vano, cortar el borde exterior del marco de la ventana, o bien fabricando nuevamente la ventana luego de volver a medir el vano. En caso de que la comprobación sea favorable, se procede a perforar el vano con taladro y a instalar los tarugos, a situar el marco y fijarlo con tornillos y cuñas, a la instalación de la hoja y al sellado con espuma. Para finalizar, se realiza una recepción por parte de la constructora (Figura 19c).

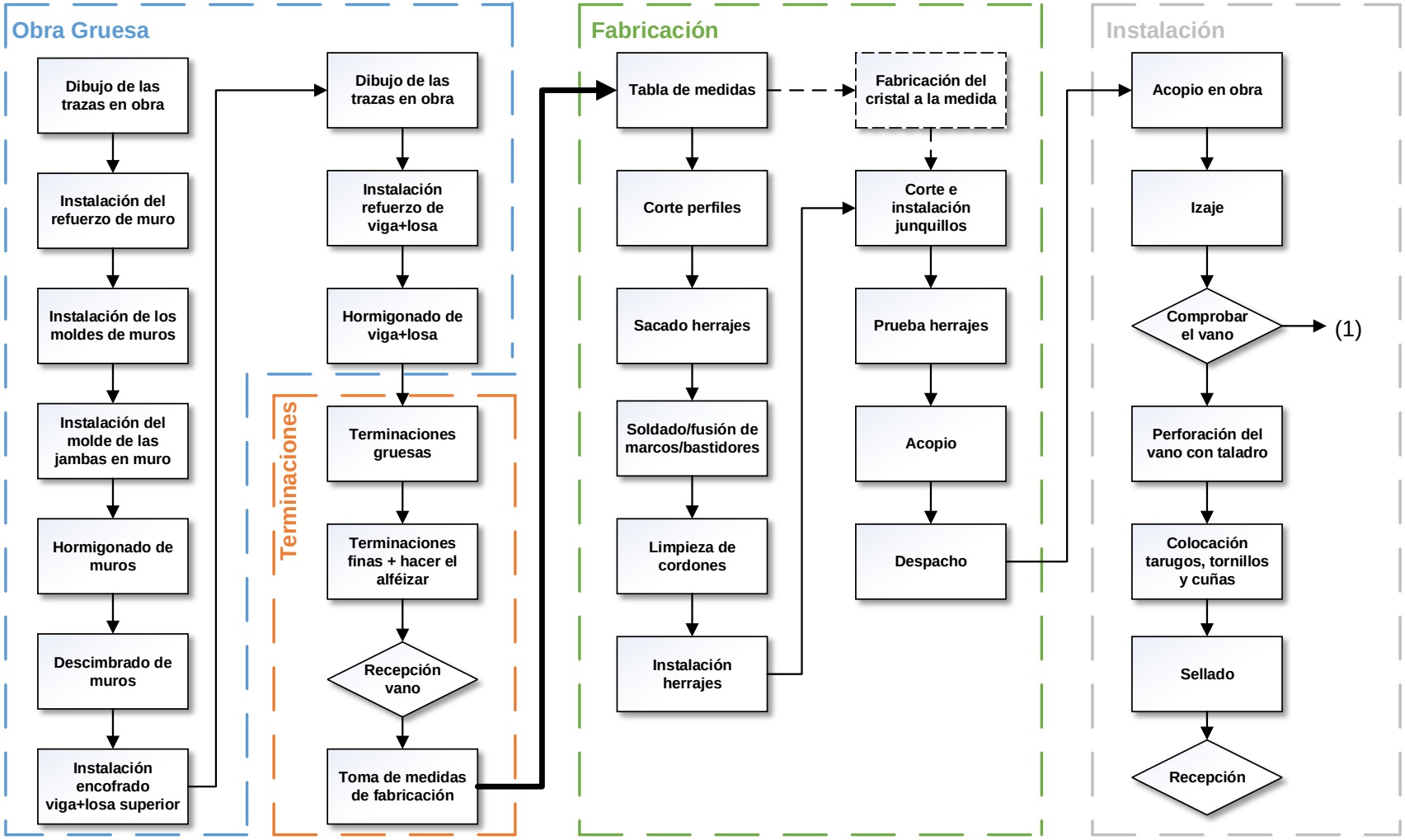
Durante este subproceso se observa que, en el chequeo de los vanos, es común que la parte central de la viga tenga un mayor ancho o tenga flecha, lo cual se traduce en un menor alto del vano en su centro. También es común que las jambas o piernas de muro estén desaplomadas. Por otra parte, se observa que durante el izaje, acopio e instalación, la tasa de daños es de en promedio una ventana por piso (8,3% al haber 12 ventanas/puerta-ventanas por piso). Otra observación, es que previo al despacho no se realiza una verificación de las medidas de los vanos, si no que se dan cuenta cuando

comprueban con el marco. Esto claramente es evitable con una medición feed-forward, como plantea el modelo preventivo de los procesos de la construcción, en la sub-subsección 2.1.1.5.

(a) (b) (c)

Figura 19: (a) Acopio en obra de los bastidores, previo al izaje; (b) Comprobación del vano usando su respectivo marco; (c) Puerta-ventana repecionada por la empresa constructora.

En base a las observaciones de los cuatro subprocesos descritos en los puntos 4.1.1 a 4.1.4, se genera el modelo de los procesos para tener una ventana instalada en una obra de edificación en altura de hormigón armado, el cual se presenta en la Figura 20. Como se menciona anteriormente, cabe resaltar que el modelo refleja el estado de la práctica actual observado. Dicho modelo se caracteriza por ser secuencial, ya que las ventanas son fabricadas a la medida de cada vano, lo cual se representa en la Figura 20 por la fecha que une las *Terminaciones* con la *Fabricación* mediante la tarea de *Toma de Medidas de Fabricación*. Esto impide tener sub-procesos paralelos que sean independientes entre sí, mermando las ventajas de la prefabricación en masa detalladas en la sub-subsección 2.1.2.2. Como se detalla en la sección 3.1, la hipótesis (a) plantea que prefabricar las ventanas en masa y de medidas pre-establecidas, permitiría reducir las pérdidas traduciéndose en un menos costo de fabricación. La metodología para cuantificar dichas pérdidas se presenta en la última sección del presente capítulo.



(1) Al no cumplir, se debe optar por reparar el vano o cortar el borde exterior del marco de la ventana, dependiendo de la magnitud del problema

Figura 20: Modelo integrado de los procesos para tener una ventana prefabricada instalada en obra

4.2. MODELACIÓN DEL PROBLEMA

En esta sección se resumen las observaciones realizadas durante la ejecución de los cuatro subprocesos descritos en la sección anterior, en conjunto con información obtenida durante entrevistas a expertos. Dichas observaciones se enfocan en las causas del problema, las cuales se pueden clasificar en cuatro categorías: (1) Diseño; (2) Encofrado; (3) Mediciones y (4) Hormigonado.

4.2.1. Diseño

El arquitecto de la inmobiliaria Dhelos, Juan Pablo Galleguillos (2015), en una entrevista con el autor, menciona que actualmente durante el diseño arquitectónico se da poca importancia a las dimensiones de elementos prefabricados de menor envergadura, como ventanas, puertas y planchas varias. Esto genera que dichos elementos sean prefabricados a la medida en vez de en masa, de forma mucho más ineficiente como pudo observar el autor en la fábrica de ventanas.

Por otra parte, se observa que cuando la longitud de los elementos de muro, como un ala de un muro T, no coincide con ninguna modulación del encofrado, presentada en la Anexo B, se debe optar en obra por soluciones artesanales para lograr la longitud indicada en los planos. En el punto siguiente se presentan observaciones del uso y de los resultados de dichas soluciones artesanales.

4.2.2. Encofrado

Cuando la modulación del encofrado no coincide con la longitud indicada en los planos de un elemento de muro, como se menciona en el punto anterior, se opta por soluciones ideadas en obra. Un ejemplo que se relaciona con los vanos mal construidos en obra gruesa, es el uso de molde de jambas construidas en terreno, como muestra la Figura 21.

Figura 21: Molde de la jamba artesanal, y su sistema de soporte

Como se observa en la Figura 21, este molde artesanal se inserta dentro de los paneles de muro industriales en la posición donde debe ubicarse la jamba o pierna de muro. El problema radica en que los paneles no son diseñados para trabajar de dicha forma, por lo que no poseen ningún tipo

de soporte para fijar este molde en su posición. Para sobrellevar dicha dificultad, se observa que en obra clavetean tablas a las placas fenólicas de los paneles, las que hacen de tope para que el molde artesanal no se salga producto de la presión del hormigón fresco. Algunas características del sistema de soporte empelado actualmente son las siguientes:

- **Impreciso**: Las tablas son puestas sin mayores mediciones de la posición, y además no presentan restricción a que el molde de la jamba se desplace hacia el interior del muro, donde va el refuerzo del hormigón.
- **Deteriora los paneles de muro**: Al ir claveteado, se hacen agujeros durante la instalación a los paneles con recubrimiento fenólico, los cuales tienen un elevado costo de reparación que solamente se puede realizar en las instalaciones del proveedor del encofrado. También se produce daño cuando las tablas son retiradas al momento de descimbrar, ya que la práctica es removerlas con la parte trasera del martillo.
- **No permite ajustes**: Las tablas una vez claveteadas en su posición no permiten una regulación milimétrica de la posición del moldaje que origina la pierna de muro.
- **Incómoda instalación**: Principalmente para muros de bajo espesor, por ejemplo 20 centímetros, producto del reducido espacio para clavetear.

En la parte inferior del molde artesanal, el soporte corresponde a barras de refuerzo de hormigón que son parcialmente enterradas en la losa, como se muestra en la Figura 22. Este sistema presenta una instalación más precisa ya que se pueden colocar directamente sobre los trazos, no genera daños en los paneles de muro, y la instalación tampoco es incómoda ya que se colocan previo a los paneles. No obstante, no permiten ajustes y se requiere trabajo adicional y herramientas para taladrar la losa.

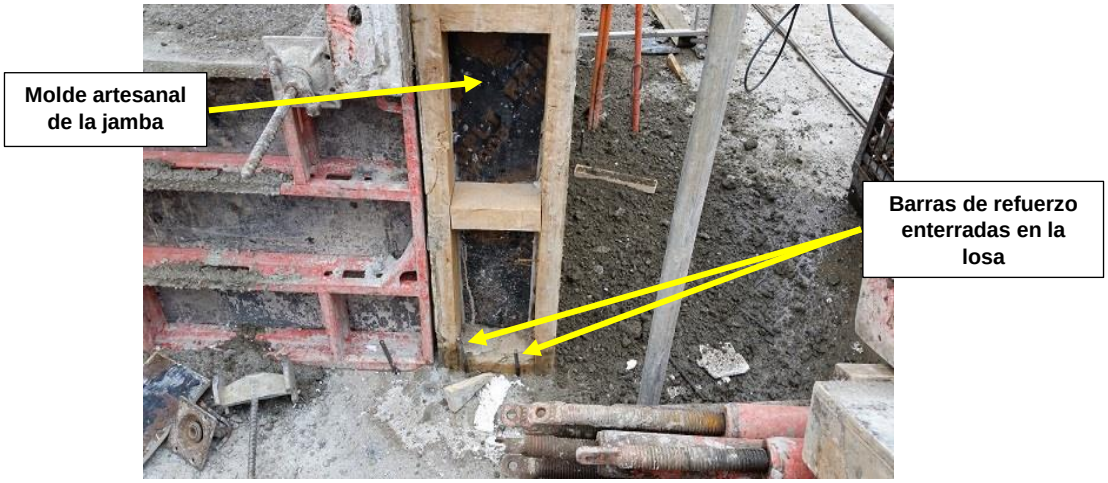


Figura 22: Mecanismo de soporte del molde artesanal empleado actualmente en la parte inferior

Otros problemas observados fueron el no utilizar desmoldante, en algunos casos el descimbrado prematuro de las vigas que delimitan el contorno superior del vano, mala mantención al encofrado en obra, y la pérdida de la secuencia constructiva, lo cual origina que quede el panel de

una cara del muro más larga que el de la cara opuesta (Figura 23) producto de utilizar paneles destinados por diseño para otros muros.

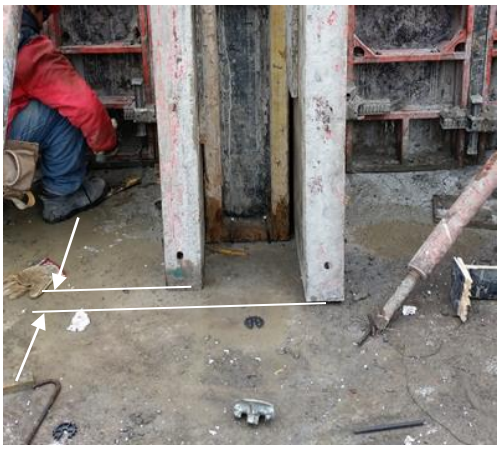


Figura 23: Paneles de caras opuestas de un mismo muro, pero de distinta longitud

4.2.3. Mediciones

Se observa que para la instalación del molde de la jamba y su aplome, se utilizan herramientas precarias como una huincha y un plomo, el cual se mueve constantemente con el viento. Adicionalmente, dichas mediciones para la instalación del molde, se realizan con respecto a las trazas dibujadas previamente en la losa, en vez de utilizar mediciones relativas entre las jambas comunes a un vano.

Por otra parte, durante el hormigonado no se realizan mediciones de la posición del molde artesanal, con lo cual no se percatan del desplazamiento de dicho molde hasta que el hormigón se endurece. Esto impide que se tomen acciones correctivas como disminuir la velocidad de vertido, reforzar el sistema de soporte, etc.

4.2.4. Hormigonado

Se observa durante el hormigonado, que un vibrado excesivo produce una separación entre las componentes líquidas y las sólidas disueltas con las no disueltas, a lo que se denomina un chorreo de la lechada. Por otra parte, un vibrado insuficiente deja zonas con burbujas de aire, las cuales pueden generar irregularidades en la superficie de los vanos. Otro problema observado es la discontinuidad en las superficies producto de hormigonar en múltiples etapas.

En base a las observaciones presentadas en las subsecciones 4.2.1 a 4.2.4, se realiza una modelación del problema mediante un diagrama causa-efecto, el cual se presenta en la Figura 24.

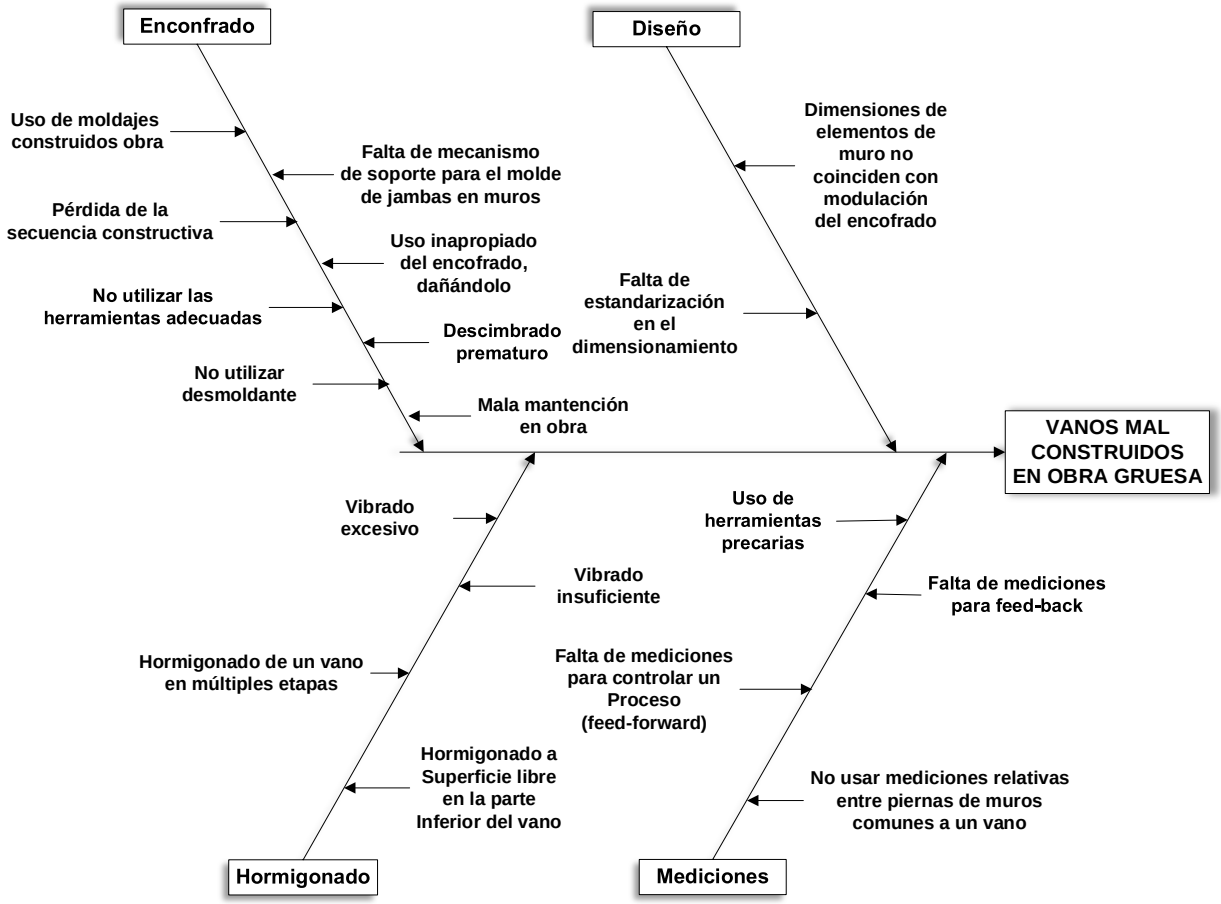


Figura 24: Modelamiento del Problema a través de un Diagrama Causa-Efecto

El factor más crítico para los vanos en términos de muros estudiados en esta memoria, corresponde a la falta de un mecanismo de soporte para el molde de las jambas de muros. Las razones, como se resumen en 4.2.2, son que el soporte actual es impreciso, no permite ajustes, y, además, daña a los paneles de muro, lo cual se traduce en vanos de calidad insuficiente para la instalación de ventanas prefabricadas. Además, dicha causa tiene el potencial de ser modificada para entender si es posible resolver el problema, lo cual permite una investigación en el marco de una memoria considerando las difíciles condiciones de la construcción descritas en el planteamiento del problema. En la última parte del presente capítulo, se describe como los capítulos siguientes permiten contrastar las hipótesis (a) y (b), las cuales hacen referencia al soporte en cuestión.

4.3. METODOLOGÍA PARA CUANTIFICAR LAS PÉRDIDAS

La reducción de pérdidas que tiene como objetivo la presente memoria, como se menciona en el planteamiento del problema, posee dos componentes. La primera, es que se reducen las pérdidas producto de utilizar los beneficios de la manufactura, al prefabricar las ventanas en masa de las dimensiones pre-acordadas, en vez de hacer cada una a la medida del vano. La segunda componente, es eliminar la necesidad de reparar cada vano. Esta tarea es denominada terminaciones gruesas, y consiste en añadir mortero o desbastar mediante cincel, por lo cual, la reducción de pérdidas proviene de ahorro de tiempo de trabajadores y herramientas, junto con los materiales utilizados.

Por consiguiente, para cuantificar la reducción de pérdidas, la cual se realiza en base a reducción de costos, se debe considerar la información del fabricante de las ventanas, de la construcción propiamente tal, y del proveedor de encofrados, según se detalla a continuación:

4.3.1. Fabricante de ventanas

Es de interés conocer cuánto es la reducción porcentual de costos de fabricación producto de hacerlas en masa de medidas pre-establecidas, en vez de cada una a la medida. Para estos efectos, se hace lo siguiente:

- Visita a una planta de ventanas prefabricadas, donde se hacen dos cosas. La primera, es realizar observaciones al proceso de fabricación, con énfasis en constatar si hacer cada ventana a la medida resulta en una fabricación menos eficiente, en términos de mayor necesidad de horas hombre, horas máquina y materiales. La segunda, es entrevistar al encargado de operaciones, con el objeto de saber si han medido cuánto menos cuesta hacer las ventanas en masa que a la medida, y cuál es la justificación.

- Pedir cotizaciones para el mismo proyecto a tres proveedores de ventanas prefabricadas de la quinta región, con el objeto de conocer el precio por metro cuadrado de ventana instalada. El proyecto utilizado es real, y se considera el mismo tipo de ventana observado durante la visita a la fábrica, que a su vez es el mismo utilizado en la obra donde se realizan las mediciones. El tipo corresponde a una puerta-ventana corredera de termopanel con perfiles de PVC.

4.3.2. Proveedor de encofrados

En base a observaciones en el sitio de la construcción, y según se describe en el punto 4.2.2 del modelamiento del problema, el soporte para los moldes de las jambas empleado actualmente daña los paneles fenólicos del molde de los muros. Por consiguiente, se desea cuantificar dicho daño, ya que, al cambiar el sistema de soporte, se evitaría. Por otra parte, al introducir un nuevo soporte, se introduce un nuevo costo, el cual debe ser incluido en el presente análisis. En base a lo descrito, se realiza lo siguiente:

- Entrevista al gerente técnico de una compañía de encofrados, donde se obtienen dos cosas. En primer lugar, comentarios y restricciones para el diseño de la solución, las cuales se utilizarán para el diseño del soporte nuevo que se plantea como solución. En segundo lugar, el costo de reparación de los paneles producto de un uso inadecuado, como es el caso del estado de la práctica actual.

- Se pide la cotización de un accesorio del encofrado, el cual sea los más similar a la solución propuesta. De esta forma, se tiene el costo de fabricación de la solución, directamente del desarrollo, y el costo de mercado de un accesorio similar proporcionado por el proveedor del encofrado, lo cual permitirá estimar el precio de mercado de la solución propuesta. El accesorio escogido posterior a estudiar los catálogos de distintos proveedores, corresponde al Cerrojo Domino DRS, de la empresa Peri.

4.3.3. Construcción in situ

La reducción de pérdidas proviene de eliminar la necesidad de terminaciones gruesas, por lo cual se realizan visitas a la construcción de un edificio habitacional en altura. Durante las visitas, se llevan a cabo las siguientes tareas:

- Mediciones de las dimensiones de los vanos que debiesen ser iguales, al estar en la misma posición de los departamentos subyacentes de pisos distintos. De esta medición, se obtienen dos cosas. En primer lugar, la variabilidad de las dimensiones de construcción, la que, al ser mayor que la tolerancia requerida por las ventanas, prueba la falta de precisión del método actual. En segundo lugar, se obtiene el área de los vanos, los que, junto con el tiempo requerido, permiten cuantificar el costo de horas hombre por metro cuadrado de terminación gruesa.
- Observaciones y entrevista a los maestros que realizan la terminación gruesa, con el objeto de conocer el tiempo que les lleva reparar cada vano, según su dimensión.

4.4. METODOLOGÍA: CAPÍTULOS SIGUIENTES

En esta última sección, se establece cómo los capítulos siguientes permiten probar las hipótesis (b) y (c). En este contexto, se diseña una nueva tecnología con todas las funciones necesarias para eliminar la causa raíz que conlleva a los problemas observados en terreno. Además, un prototipo es fabricado. De esto trata el *Capítulo 5: Diseño y desarrollo del soporte*.

Posteriormente y para contrastar la hipótesis (c), el prototipo es probado en el laboratorio simulando las solicitaciones para las cuales fue diseñado. Por consiguiente, se presenta el diseño del experimento y el establecimiento de las instalaciones en el laboratorio en el *Capítulo 6: Diseño y establecimiento de las pruebas experimentales del soporte a carga axial*.

La adquisición de datos, análisis y observaciones durante las pruebas, necesarias para contrastar la hipótesis (b), son presentadas en el *Capítulo 7: Adquisición de datos y análisis*.

CAPÍTULO 5: DISEÑO Y DESARROLLO DEL SOPORTE

El presente capítulo contiene el estudio, diseño y desarrollo de un nuevo soporte para eliminar las causas fundamentales que conllevan a los problemas descritos en los capítulos anteriores. En primer lugar, se estudian las fuerzas a las cuales será sometido el soporte y las funciones que debe poseer. En segundo lugar, se presenta el diseño final que posee todas las funciones identificadas en el primer paso. El capítulo finaliza presentando la fabricación de un prototipo, detallando sus características en base a las funciones identificadas previamente.

5.1. ESTUDIO DE LAS SOLICITACIONES DEL ENCOFRADO DE MUROS

Tras numerosas observaciones en terreno y entrevistas a profesionales que se desenvuelven en el diseño de encofrados, se identifican dos tipos de solicitaciones que condicionan el diseño. El primer tipo, corresponde a las fuerzas que deberá aguantar el soporte, al actuar como reacción a la presión del hormigón durante el vertido. El segundo tipo de solicitaciones, proviene de las duras condiciones a las cuales son sometidos los accesorios del encofrado en la construcción. Debido a las limitaciones para la cuantificación de este tipo de solicitaciones, estas se introducen como restricciones para el diseño o funciones requeridas. Ambos tipos de solicitaciones se desarrollan en las subsecciones a continuación.

5.1.1. Análisis de las fuerzas actuantes sobre el soporte

El diseño del encofrado de muros se realiza en base a la *Guide to formwork for concrete* ACI 347-04 (ACI, 2004) para los Estados Unidos, mientras que para Europa es según la DIN 18202. En la presente memoria se utiliza la norma del país americano empleando el sistema internacional de unidades, siendo consecuente con otras normas del ACI utilizadas en Chile para el diseño de hormigón armado.

El soporte propuesto como solución, actúa como reacción para el molde de término de muro o jamba, el cual, por su otra cara, es sometido a la presión del hormigón, como se muestra en la Figura 25. Para el análisis de las fuerzas se considera el caso más general posible, el cual, de acuerdo a lo presentado en el Anexo B - Encofrados, corresponde al hormigón en estado líquido y, consecuentemente, con una distribución hidrostática de presión.

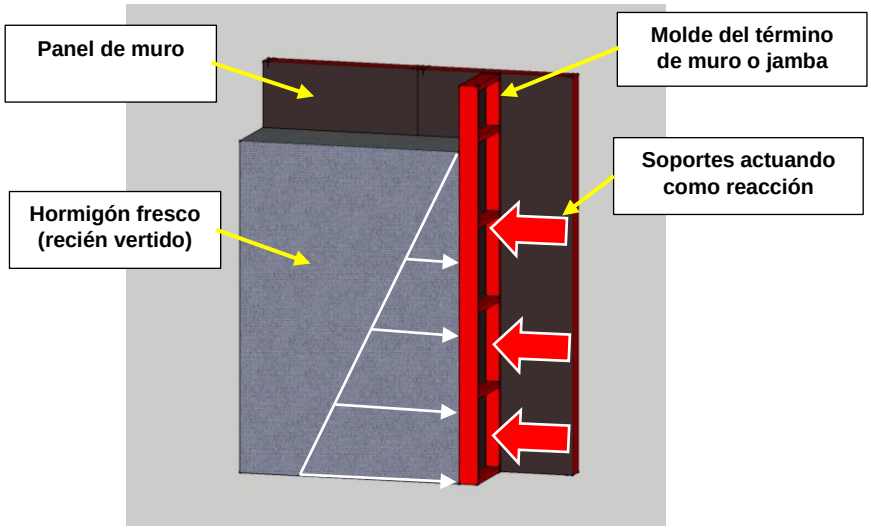


Figura 25: Esquema de la distribución de la presión del hormigón durante el vertido y su transmisión a los soportes

En base a lo establecido en Anexo B y en la Figura 25, se emplea la ecuación 2.1b del ACI 347-04 para el cálculo de la presión (ACI 347, 2004):

$$p = \rho g h \ \ [Pa]$$

Donde:

$p =$ Presión lateral, [Pa]
$\rho =$ Densidad de la mezcla, [kg/m^3]
$g =$ Constante gravitacional, 9,81 [m/s^2]
$h =$ Profundidad del hormigón en estado líquido, [m]

Si se considera una densidad de la mezcla (ρ) de 2400 [kg/m^3], una profundidad del hormigón en estado líquido (h) igual a la altura entre pisos típica de 2,40 [m], se obtiene una presión máxima en la parte inferior igual a:

$$p = 56{,}51 \ [kPa]$$

Al considerar además un espesor de muro de 30 [cm], la fuerza horizontal resultante es:

$$F_{h\,tot} = \frac{1}{2} \cdot 56{,}51 \cdot 2{,}40 \cdot 0{,}3 = 20{,}34[kN] = 2073{,}60 \ [kgf]$$

Si además si consideran deseables un máximo de 6 soportes por molde de jamba, para satisfacer el punto 5 de la Tabla 6, la fuerza que toma cada soporte, bajo el supuesto que se distribuyen espacialmente en la vertical de forma tal que cada uno reciba la misma fuerza, es:

$$F_{soporte} = \frac{2073{,}50}{6} = 345{,}6 \ [kgf]$$

De acuerdo al Anexo B - Encofrados, en particular en la Tabla 21 el factor de seguridad para accesorios del encofrado es de 2,0. Por consiguiente, la fuerza deseada para el diseño de cada soporte, es de:

$$F_{diseno\ soporte} = 345{,}60 \cdot 2{,}0 = 691{,}2 \approx 692\ [kgf]$$

5.1.2. Desplazamiento máximo deseado

El desplazamiento de los soportes producto de la fuerza calculada en 5.1.1, no debe superar la tolerancia de construcción de los muros que originan vanos. De acuerdo al Manual de Tolerancias Para edificaciones, de la Comisión de Desarrollo Tecnológico (CDT, 2009), dicha tolerancia es de ±5 [mm]. Considerando dos jambas por vano (Figura 15), se obtiene el desplazamiento máximo deseado de cada soporte:

$$\delta_{diseno\ soporte} = \pm\frac{5}{2} = 2{,}5 \approx 2\ [mm]$$

Como se observa en el Anexo C, las dimensiones de los vanos que por planos debiesen ser iguales, y que además están en la misma ubicación pero en pisos distintos, difieren en más de 5 [mm] incluso después de las terminaciones gruesas. Esto genera la necesidad de que las ventanas sean hechas a la medida, situación que se desea revertir con este nuevo soporte.

5.1.3. Restricciones y respectivas características deseables de diseño

En base a observaciones en terreno presentadas en 4.1, junto con la ayuda de los gerentes técnicos Octavio Lira (2015) y Benito Jiménez (2015) de las empresas de encofrados Soinsa S.A y Doka Chile LTDA. respectivamente, se determinan las funciones requeridas del soporte propuesto y las características para cumplir dichas funciones. Esta información se resume en 9 puntos en la Tabla 6 a continuación:

Tabla 6: Funciones requeridas y sus respectivas características adoptadas en el diseño

	Funciones requeridas	Característica
1	**Resistente a los golpes**: En obra los accesorios son constantemente golpeados para la remoción del hormigón y arrojados durante el descimbrado, como se describe en 4.1.1.	**Diseño y construcción robusta**: Se emplea acero como material base, de un espesor de 6 [mm].
2	**Compatible con diversos encofrados**: Los paneles varían entre los distintos fabricantes, e incluso dentro de las distintas líneas de un mismo fabricante como se muestra en el Anexo B.	**Universal**: Se considera la forma y espesor de los bastidores y paneles de tres proveedores de encofrados, por lo que el grosor máximo de bastidor para panel de muro seleccionado en este análisis es de 110 [mm].
3	**Ubicación variable**: Producto de la modulación de los paneles de muro presentada en el Anexo B, debe permitir ubicar el panel de la pierna hasta 40 [cm] al interior del borde del panel de muro.	**Regulable en profundidad**: Se empleará un tornillo de gran longitud, el que permite situar el molde de la jamba a un mínimo de 5 [cm] del borde del panel de muro y a un máximo de 40 [cm]. En la Figuras 16a y 16b se observa un molde de jamba dentro de los paneles de muro.

4	**Ubicación precisa**: Debe permitir situar el panel de la pierna de muro en la posición deseada con una tolerancia de ± 1 [mm].	**Ajuste mediante un tornillo**: Permite desplazar el panel de forma continua y no en etapas, en base al giro de un tornillo.
5	**Fácil y rápida instalación**: Accesorios de difícil instalación simplemente no son usado en obra como se describe en 4.1.1. Por otra parte, si es lenta, limita el avance de una de las partidas críticas de la mayoría de las edificaciones habitacionales en altura; el encofrado (CDT, 2013).	**Instalación manual sin herramientas**: Se considerará una pieza única de instalación sin herramientas. Además, se diseña simétrica, por lo que se puede usar en ambas caras indistintamente.
6	**Resistente al hormigón**: Las salpicaduras y chorreos de hormigón en los accesorios de los encofrados son usuales, por lo que deben permitir su remoción con facilidad, incluso luego del endurecimiento.	**Hilos de tornillos especiales**: Se considera emplear barras con el sistema de hilo GEWI, de uso especial para hormigón ya que, al tener un paso grueso y no continuo en todo el perímetro de la sección de la barra, le permite ser auto-limpiante (Ver recomendaciones en el Capítulo 8).
7	**No debe contener partes que se pierdan**: Los accesorios removibles de las herramientas típicamente se pierden o son robados.	**Pieza única**: Se diseña toda la herramienta en una pieza única, con todas las partes firmemente adheridas entre sí.
8	**Evitar que el desplazamiento hacia dentro del moldaje de la jamba**: Para una instalación precisa, se debe restringir el desplazamiento del moldaje de la pierna en ambos sentidos.	**Elemento de fijación**: Se diseña un accesorio que se fija al panel de molde de la jamba, el cual se acopla a un extremo del soporte. Impide el desplazamiento hacia el interior del muro.
9	**Instalación a pesar de la pérdida de la secuencia del encofrado**: Tras el uso repetitivo del encofrado, se suele perder la secuencia de uso, es decir, que no se vuelve a armar exactamente como se indica en los planos. Esto genera, entre otras cosas, que en los extremos de los elementos de muro los paneles de ambas caras no sean de la misma longitud (Figura 23).	**Sujeción independiente**: Se considera que cada soporte se monte sobre un panel de muro a la vez, por lo que las diferencias de longitud son compensadas por la regulación en profundidad de la herramienta.

5.2. DISEÑO DEL SOPORTE

El soporte propuesto consiste en un accesorio del encofrado, el cual se monta sobre los paneles de las caras opuestas de un mismo muro, y que desde dicha posición actúan como reacción para el molde de las jambas, según se muestra con flechas rojas en la Figura 25. De acuerdo a los cálculos presentados en 5.1.1, debe ser capaz de soportar una fuerza axial de 692 [kgf] con un desplazamiento máximo deseado de 2 [mm] como se especifica en 5.1.2. Por otra parte, debe poseer características que le permiten satisfacer las 9 funciones requeridas identificadas en la Tabla 6.

En esta sección se presenta el diseño final del soporte, al cual se llega luego de una serie de iteraciones y mejoras. Se presentan sus componentes y su relación con las funciones requeridas. La Figura 26 corresponde a dos vistas 3D del modelo computacional de la nueva herramienta:

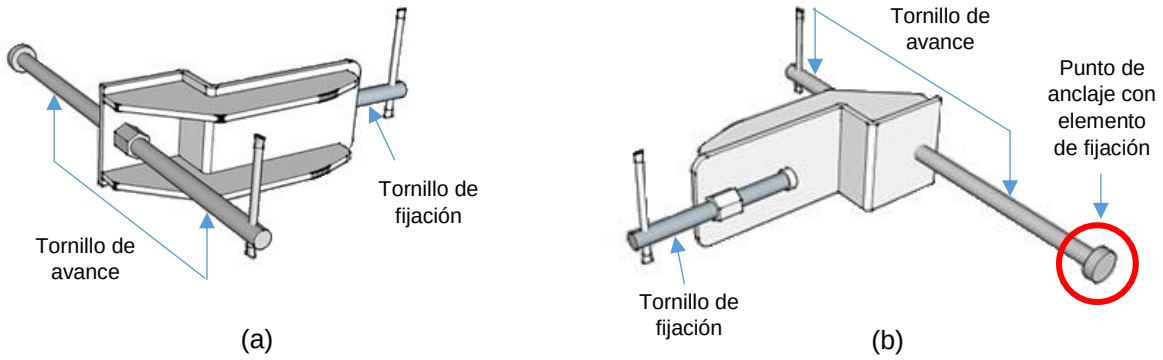


Figura 26: Vistas del modelo computacional 3D del mecanismo de soporte: (a) frontal; (b) posterior

Como se observa en la Figura 26, el soporte está compuesto por tres partes principales: (1) mecanismo de sujeción; (2) bastidor; (3) mecanismo de avance. Dichas partes se destacan en colores distintos en la vista en planta en la Figura 27, donde además se indican algunas medidas relevantes:

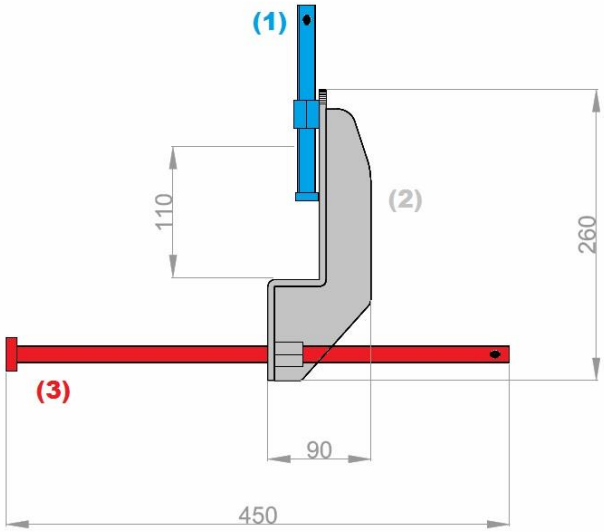


Figura 27: Vista en planta del soporte diseñado, las tres componentes se destacan en colores distintos

(1) <u>Mecanismo de sujeción</u>

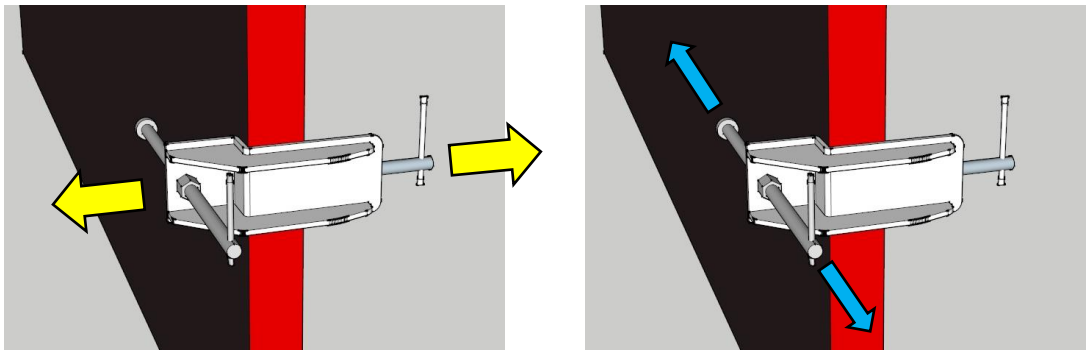
Se destaca en azul en la Figura 27. Tiene como función montar el soporte al extremo del panel de muro. Por consiguiente, debe abordar las funciones 2, 5 y 9 identificas en la Tabla 6. Para la función 2, que debe ser compatible con los encofrados de distintos fabricantes y sus modelos, el mecanismo de sujeción es universal ya que se puede ajustar al espesor del bastidor del moldaje de muro, como muestran las flechas en amarillo de la Figura 28a. Este mecanismo se instala sin herramientas, de forma fácil y rápida permitiéndole cumplir la función 5. Además, se puede instalar de forma independiente al panel de cada cara, permitiendo su uso inclusive cuando se pierde la secuencia constructiva del encofrado, lo cual corresponde a la función 9.

(2) *Bastidor*

Se destaca en gris en la Figura 27. Tiene como función unir y brindar soporte estructural a las otras dos componentes de la herramienta, por lo que aborda las funciones 1, 2 y 7. La función 1, respecto a la resistencia a los golpes, se aborda mediante un diseño compacto, utilizando tres placas de acero de espesor 6 [mm] soldadas entre sí. Para la función 2, la longitud del bastidor se determina en 260 [mm], lo que le permite montarse sobre bastidores con un espesor de 110 [mm]. Por otra parte, este elemento mantiene unidas a las componentes 1 y 3, lo que permite no tener piezas sueltas abordando la función 7.

(3) *Mecanismo de avance*

Se destaca en rojo en la Figura 27. Tiene la función de situar el molde de la jamba en la posición establecida al interior de los paneles de muro. Como consecuencia, debe abordar las funciones 3, 4, 5 y 8. Según se menciona en la Tabla 6, la función 3 se aborda con un tornillo de longitud 450 [mm], el cual permite situar el molde a un mínimo de 50 [mm] del extremo del panel, y un máximo de 400 [mm]. Dicho tornillo tiene un avance continuo y no se requieren herramientas para su uso, lo cual aborda las funciones 4 y 5. El desplazamiento se destaca con flechas azules en la Figura 28b.



(a) (b)

Figura 28: Modelo de un soporte montado sobre el panel de muro: (a) movimientos del mecanismo de sujeción en flechas amarillas; (b) movimientos del mecanismo de avance en flechas azules

Por otra parte, para abordar la función 8, el mecanismo de avance posee en el extremo una arandela (destacada en rojo en la Figura 26b) que sirve para anclarla con el elemento de fijación, como se muestra con más detalle en la sección 5.4 desarrollo del soporte.

5.3. DISEÑO DE LA METODOLOGÍA DE INSTALACIÓN

En esta sección se describen los 11 pasos para la instalación del diseño final del soporte presentado en 5.2. Cabe resaltar que el paso 1 de esta secuencia se encuentra en el proceso *instalación de los moldes de muro* según el modelo integrado presentado en la Figura 20 en la metodología, por lo cual el *dibujo de las trazas* fue realizado previamente.

(1) Colocar los elementos de fijación a los moldes de las jambas (o términos de muro), usando cuatro tornillos. Colocar 3 elementos de fijación en cada lado.

(2) Instalar el moldaje de muro de la primera cara sobre el trazo correspondiente.

(3) Utilizando un láser Hilti PMC 46 o similar (Anexo A), trazar la vertical que delimita el término de muro sobre el lado interior del panel del encofrado utilizando la traza sobre la losa dibujada previamente. Agregar una traza paralela tanto en el suelo como en la placa fenólica del panel, a una distancia igual al espesor del molde de la jamba. Dicha traza debe ser dibujada hacia el exterior el muro, como muestra la Figura 29.

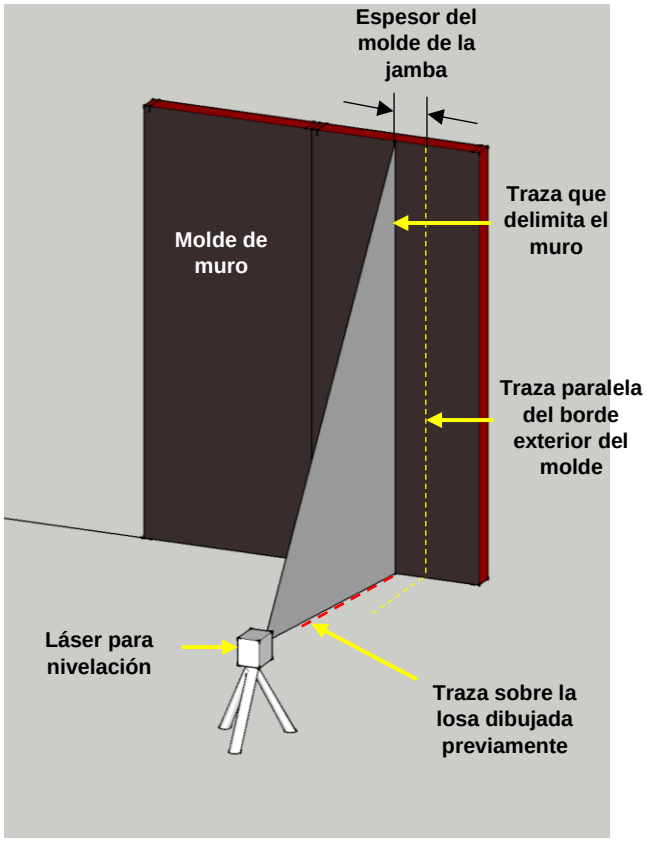


Figura 29: Traza de la vertical que delimita el muro y de la paralela que indica el bore exterior del molde de la jamba

(4) Medir la distancia entre la vertical paralela y el borde del panel de muro. Extender el mecanismo de empuje del soporte la misma distancia medida.

(5) Instalación del refuerzo de muro, como indica el modelo integrado de la Figura 20.

(6) Situar la pierna de muro en su posición utilizando las trazas de (3). Insertar el extremo del mecanismo de empuje en el punto de anclaje, como muestra la Figura 32b. Si se utilizan 3 soportes por lado, hacerlo para los 3 soportes.

(7) Posicionar los soportes en el extremo del molde de muro y fijarlo usando el mecanismo de sujeción, apretando de forma manual.

(8) Ajustar el mecanismo de avance girando el tornillo hasta que el borde posterior del molde de la jamba coincida con la traza vertical paralela dibujada en 3, como muestra la Figura 30a.

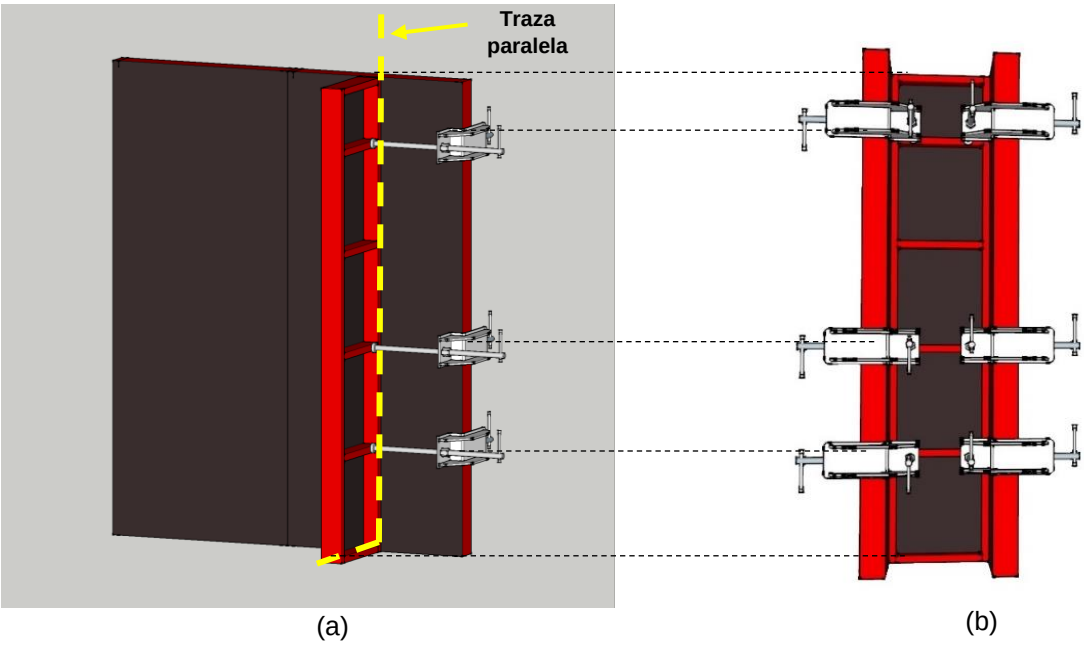


Figura 30: (a) Borde exterior del molde de la jamba sobre la traza paralela; (b) Vista frontal de los 3 soportes a cada lado instalados Por simplicidad, los elementos de fijación no fueron dibujados.

(9) Instalar la otra cara del panel de muro, usando los accesorios del encofrado

(10) Colocar los extremos de los mecanismos de avance de los tres soportes restantes en los elementos de fijación instalados en (1) en el lado opuesto del molde de la jamba.

(11) Situar los soportes al extremo del panel de la cara opuesta instalada en (9), y fijar usando los mecanismos de sujeción, análogo a (7). Ajustar el mecanismo de avance hasta que la traza paralela en el suelo coincida con el borde del panel de la jamba. Una vez terminada la instalación, un modelo de la vista frontal se muestra en la Figura 30b.

5.4. DESARROLLO DEL SOPORTE

En esta sección se presenta un prototipo, el cual fue fabricado de acuerdo al diseño final presentado en 5.2. Cabe resaltar que, durante la fabricación se identificaron numerosas oportunidades de mejora, las cuales ya fueron incorporadas al diseño final presentado anteriormente. La Figura 31 corresponde a dos fotografías de vistas generales del prototipo:

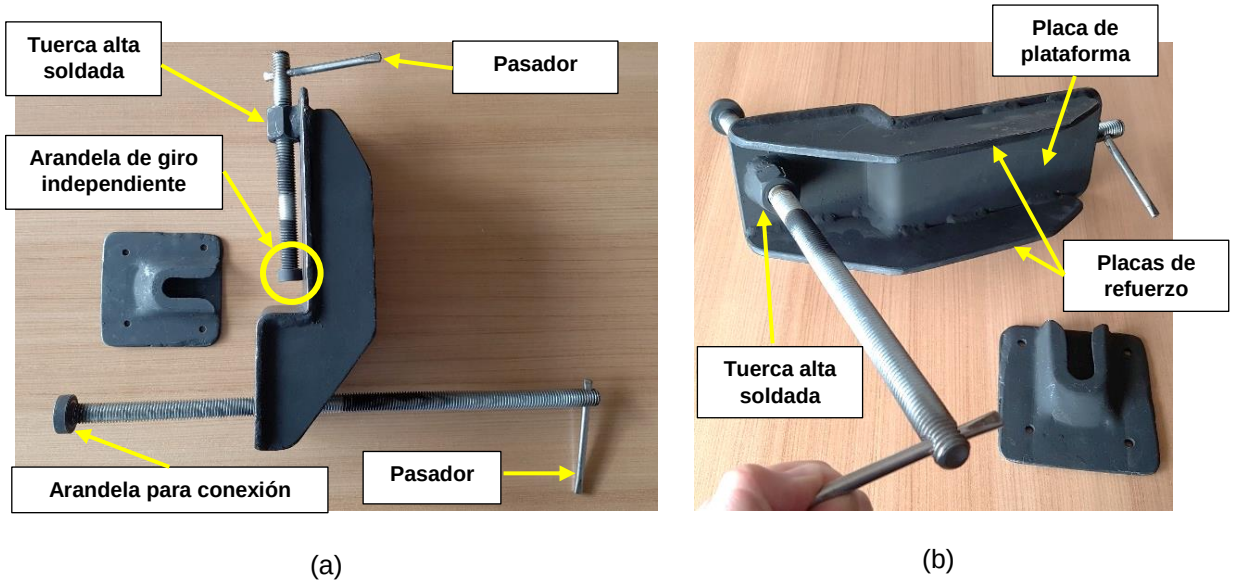


Figura 31: Fotografías de la versión final del prototipo fabricado: (a) vista en planta; (b) vista frontal en ángulo

A continuación, se presentan detalles de la fabricación de los tres componentes del soporte diferenciados en la Figura 27.

5.4.1. Mecanismo de sujeción

Tiene el objeto de anclar la herramienta al extremo del panel de muro. Está constituido por un hilo de acero de 5/8 [in], de longitud 200 [mm]. Está unido al bastidor mediante una tuerca alta soldada, como se observa en la Figura 31a. En el extremo que se une al bastidor del panel de muro, posee una arandela metida a presión que gira independiente al hilo, lo cual evita daños en la superficie del bastidor. Al otro extremo, contiene un pasador que permite su instalación manual.

5.4.2. Bastidor

Es la pieza que une el mecanismo de sujeción con el de empuje, transmitiendo las fuerzas de reacción de la presión durante el vertido del hormigón al panel del encofrado de muro. Ambos mecanismos se encuentran adheridos mediante una tuerca alta soldada a la base, como se muestra en la Figura 31a y 31b.

Se construye en tres piezas de acero de 6 [mm] de espesor, donde la primera actúa como plataforma y las otras dos, como refuerzo para otorgar rigidez y resistencia a los golpes. La plataforma

es doblada en caliente empleando una prensa, y la unión con las otras dos de refuerzo se realiza mediante soldadura.

5.4.3. Mecanismo de avance

Se emplea para ajustar la posición del moldaje de la pierna de muro en la posición determinada, al interior de los paneles para muros. Al igual que el mecanismo de sujeción, está constituido por un hilo de acero de 5/8 [in], pero su longitud es de 450 [mm]. También posee una arandela de giro independiente para conexión, la cual se acopla elemento de fijación como se muestra en la fotografía de la Figura 32b, de acuerdo al paso 1 del diseño de la metodología de instalación en 5.3. El otro extremo del mecanismo posee el pasador para la rotación manual o con herramienta como se muestra en la Figura 31a.

(a) (b)

Figura 32: Dos fotografías del elemento de fijación: (a) vista frontal; (b) detalle entre la conexión del soporte y elemento de fijación

5.5. VERIFICACIÓN RESISTENCIA NOMINAL DEL SOPORTE

En la subsección anterior se selecciona el diámetro del hilo de acero el mecanismo de avance. Por consiguiente, en esta sección se presenta su verificación a pandeo y se calcula el acortamiento elástico producto de la carga máxima calculada en 5.1.1, comparándola con el desplazamiento máximo deseado de 5.1.2.

5.5.1. Verificación a pandeo

Como se especifica en el punto 3 de la Tabla 6, la longitud máxima (L) del mecanismo de avance, cuando este se encuentra completamente extendido, es de 40 [cm]. A su vez, en 5.4.3 se seleccionó un hilo de acero de diámetro 5/8 [in], por lo que en esta subsección se verifica el factor de seguridad (FS) a pandeo. Se considera que en la unión del mecanismo de avance con el bastidor hay un apoyo empotrado, mientras que, en el extremo opuesto donde se conecta con el elemento de fijación, articulado como se muestra en la Figura 33:

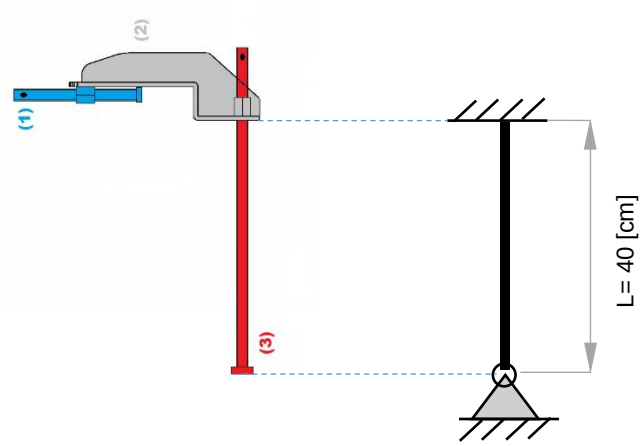


Figura 33: Mecanismo de avance completamente extendido y tipos de apoyos para el cálculo de la longitud de pandeo

En base a la Figura 33, se realiza la verificación al pandeo usando la carga crítica de Euler con $k = 0{,}7$:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 E \cdot I_{min}}{(k \cdot L)^2}$$

$$I_{min} = \frac{\pi r^4}{4} = \frac{\pi \cdot 0{,}794^4}{4} = 0{,}312\ [cm^4]$$

Reemplazando:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot 2{,}1 \cdot 10^6 \cdot 0{,}312}{(0{,}7 \cdot 40)^2} = 8.214{,}9\ [kgf]$$

Se calcula el factor de seguridad (FS) con respecto a la carga máxima calculada en 5.1.1:

$$FS = \frac{P_{cr}}{F_{soporte}} = \frac{8.214{,}9}{345{,}6} = 23{,}8$$

Por lo tanto, se verifica que el soporte cumple a pandeo.

5.5.2. Verificación acortamiento elástico de la barra del mecanismo de avance

Se verifica que el acortamiento elástico de la barra completamente extendida producto de la fuerza de diseño sea despreciable en comparación con el desplazamiento máximo, detallado en 5.1.2:

$$\delta = \frac{\sigma \cdot L}{E} = \frac{691{,}2 \cdot 40}{\pi \cdot 0{,}794^2 \cdot 2{,}1 \cdot 10^6} = 0{,}00665\ [cm] \ll 0{,}2\ [cm]$$

Por lo tanto, se comprueba que la contribución del acortamiento elástico es despreciable (del orden del 3%) para el desplazamiento de la herramienta.

5.6. RESUMEN

En este capítulo se presenta el estudio, diseño y desarrollo de un soporte para el molde de jambas, el cual aborda la causa crítica del problema según se plantea en 4.2. En el estudio, se realiza un análisis de las fuerzas que actúan en el encofrado de muros en conjunto con la tolerancia de los vanos. Luego, se resumen una serie de funciones que debe tener el soporte para un desempeño apropiado, producto de las duras condiciones en obra y de la modulación de los paneles de muro. En el diseño se presenta la versión final, y cómo sus componentes abordan las necesidades identificadas. El capítulo finaliza presentando el desarrollo de un prototipo y algunas verificaciones de sus capacidades nominales, donde su comportamiento real es determinado en base a pruebas experimentales en el capítulo siguiente.

CAPÍTULO 6: DISEÑO Y ESTABLECIMIENTO DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES DEL SOPORTE A CARGA AXIAL

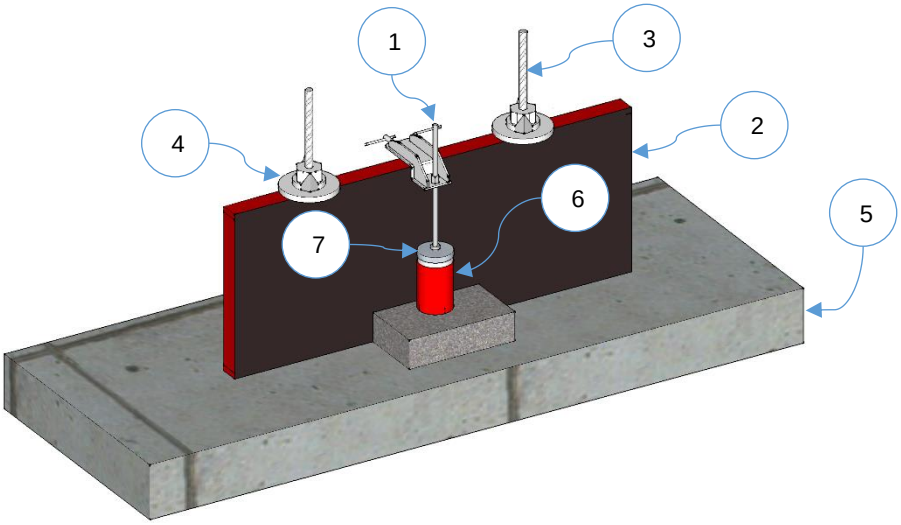
El trabajo presentado en este capítulo pretende determinar el comportamiento del prototipo del soporte desarrollado en el capítulo anterior, con el objeto de establecer si es suficientemente resistente para soportar las fuerzas que experimentará en terreno. Además, el sistema de fijación, el de carga y los instrumentos para realizar las mediciones son especificados.

6.1. SISTEMA DE PRUEBA PARA MEDIR LA FUERZA Y DESPLAZAMIENTO

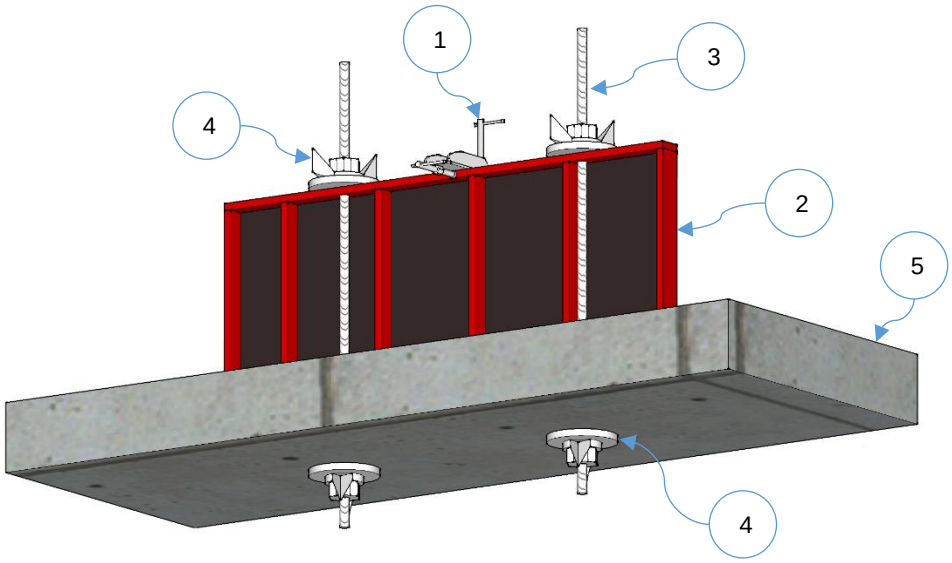
El objeto del experimento es conocer la resistencia de la herramienta, simulando las condiciones a las cuales está diseñada para trabajar en obra. Como se muestra en la Figura 25, la presión del hormigón durante el vertido se transfiere como fuerza axial a los soportes. Por otra parte, y como se describe en la subsección 5.1.2, dicha fuerza axial es de esperar que provoque un desplazamiento de la herramienta, el cual no debe superar la tolerancia de los vanos. Por lo tanto, en base a estos dos planteamientos, es de interés conocer la curva fuerza-desplazamiento que describe el comportamiento de la herramienta, y en particular, la fuerza con la cual se alcanza un desplazamiento de 2 [mm], que corresponde a la tolerancia especificada en 5.1.2.

6.1.1. Disposición de los elementos

Para determinar la curva fuerza-desplazamiento del soporte desarrollado, se emplea la configuración mostrada en la Figura 34, la cual corresponde a un modelo computacional 3D. La descripción de los elementos a utilizar se describe a continuación:



(a)



(b)

Figura 34: Modelos 3D del experimento: (a) Vista frontal superior; (b) Vista posterior inferior

Donde:

1: Soporte: el mecanismo de soporte se ensaya extendido a 20 [cm];
2: Panel de moldaje para muros;
3: Barras Dywidag con hilo trapezoidal, de largo 150 [cm];
4: Supér Placas Doka (incluyen tuerca para barra Dywidag);
5: Losa de espesor 200 [mm];
6: Prensa Hidráulica;
7: Celda de carga y LVDT.

De acuerdo a la configuración mostrada en la Figura 34, la prensa hidráulica (6) ejercerá una fuerza axial hacia arriba sobre el soporte (1), el cual se encuentra montado sobre un panel de moldaje para muros (2), que a su vez se encuentra fijo a la losa del laboratorio mediante las barras Dywidag (3) y las Súper Placas Doka (4). Entre la prensa y el soporte, se dispondrá de una celda de carga (7) para medir la fuerza, junto con un sensor LVDT empleado para medir el desplazamiento en el mismo sentido que la fuerza (no dibujado por simplicidad en la Figura 34). De esta forma, se espera generar una curva fuerza-desplazamiento que caracteriza el comportamiento del soporte, y que permitirá determinar cuántos son necesarios a ocupar en función de la presión del hormigón y la tolerancia de los vanos que permitan acomodar ventanas prefabricadas en masa.

6.2. ESTABLECIMIENTO DE LAS INSTALACIONES PARA EL EXPERIMENTO

La descripción de las instalaciones se realiza en dos partes: la primera, corresponde a las preparaciones y anclaje del encofrado sobre el cual se instala el soporte, para conducir las pruebas. La segunda parte, describe y presenta detalles de la instrumentación y su configuración en los ensayos.

6.2.1. Preparaciones y anclaje del encofrado

6.2.1.1. Panel Doka Frami Xlife

El panel de encofrado seleccionado corresponde a un panel de muro Doka Frami Xlife usado, en el mismo estado en que se encuentran en obra, con lo cual se pretende simular las condiciones más parecidas a las de terreno.

El panel original mide 270 [cm] por 90 [cm] y pesa 70 [kg], lo cual dificulta su transporte e instalación. Por esta razón, se decide cortar el tercio inferior del panel resultando en uno cuadrado de lado 90 [cm], el cual será utilizado para el experimento. En la Figura 35 se muestra el panel posterior al corte:

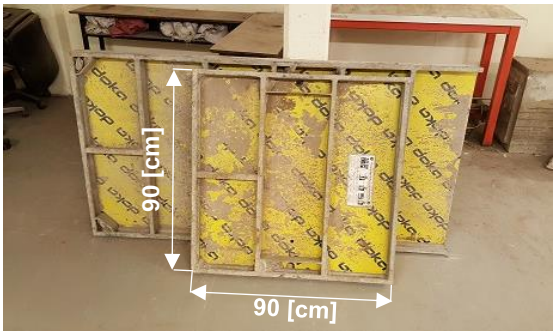
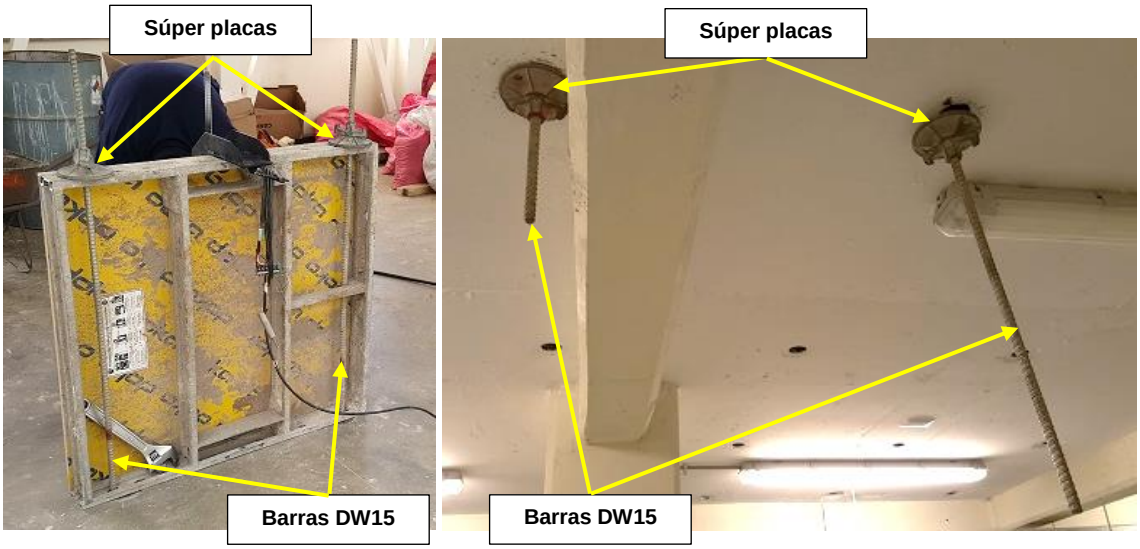


Figura 35: Panel de muro Doka Frami Xlife, posterior al corte para el experimento

6.2.1.2. Barras Dywidag DW15 y Súper Placas Doka

Para anclar los paneles a la losa del laboratorio LEMCO de la Universidad Técnica Federico Santa María, se utilizan las barras proporcionadas por Doka como accesorio de anclaje para sus paneles. Tienen un diámetro de 15 [mm] y una longitud de 1500 [mm]. Se caracterizan por tener un hilo de paso largo, no continuo en todo el contorno, lo cual les permite ser auto-limpiantes contra los restos de hormigón que no fueron propiamente removidos. La resistencia a la fluencia es de aproximadamente 500 [MPa], y el módulo de elasticidad de 205.000 [MPa]. Se colocan a través de los agujeros del bastidor del panel y de la losa del laboratorio, como se muestra en las fotografías de la Figura 36:



(a) (b)

Figura 36: Sistema de anclaje del panel a la losa del laboratorio: (a) Por sobre la losa; (b) Por debajo de la losa

Las Súper Placas son el accesorio que se emplea junto a las barras DW15, ya que contienen la tuerca para el apriete y tensado de las barras. Éstas fueron apretadas empleando la llave inglesa que se observa en la fotografía a de la Figura 46a.

Finalmente, se monta la herramienta mecanismo de soporte al panel de muro, y se extiende 20 [cm], que es la posición a la cual se decide hacer el ensayo.

6.2.2. Sistema de carga e instrumentación

6.2.2.1. Prensa hidráulica de 55 Ton

Es una prensa hidráulica de marca Power Team, modelo C552C, con una capacidad de 55 toneladas y una carrera de 2 pulgadas. El alto retraído es de 17,5 [cm] sin la base, que es como se dispone en el experimento.

Debido a que el ancho del panel, que está dispuesto de costado, es de 90 [cm], y que la longitud de ensayo del soporte es de 20 [cm], se instalan dos cubos de hormigón de alta resistencia de 20 [cm] de lado para compensar la diferencia de altura, junto con una placa de acero de 6 [cm] que se instala sobre la prensa, como se observa en la Figura 37a. Note que el soporte tiene 4 [cm] adicionales necesarios para la sujeción en el panel de muro, y que el espesor de la celda de carga es aproximadamente 2 [cm], con lo cual se llega a los 90 [cm].

6.2.2.2. Celda de carga

La celda de carga empleada para medir la fuerza ejercida por la prensa hidráulica al soporte, es una Sartorius-intec modelo PanCake PR 6251/13. Tiene una capacidad de carga nominal de 1 [Ton-f], con una precisión del 0.5% de la medición (Sartorius, 2015). Se muestran instalados en la Figura 37a y 37b.

(a) (b)

Figura 37: (a) Compensación de la altura del panel; (b) Instrumentación

6.2.2.3. LVDT

El LVDT, del acrónimo en inglés *Linear Variable Differential Transformer*, es un transductor de posición/desplazamiento que convierte la posición o desplazamiento lineal desde una referencia mecánica (considerada como posición nula, o cero) en una señal eléctrica proporcional que contiene la información de la fase (para la dirección) y la amplitud (para la distancia)

La señal eléctrica emitida por el LVDT es medida por un sistema de adquisición de datos, el cual se encuentra conectado a una computadora que digitaliza la medición. El LVDT empleado en el experimento corresponde a un Schaevitz 300 HR, de rango lineal ±7.62 [mm] y resolución infinita (Schaevitz Sensors, 2015), el cual se muestra instalado en la Figura 37b. El sistema de adquisición de datos usado es un National Instruments SCXI-1000 junto con el software LabVIEW, donde se obtiene en digital la medida de la fuerza y del desplazamiento.

En resumen, el LVDT, en conjunto con el sistema de adquisición de datos y el software computacional, son empleados en el experimento para medir el desplazamiento del soporte de forma digital producto de la fuerza axial ejercida por la prensa hidráulica.

CAPÍTULO 7: ADQUISICIÓN DE DATOS Y ANÁLISIS

En el presente capítulo se presenta el análisis de los datos de las dos partes que componen este estudio. Para la primera parte, los datos se emplean para la cuantificación de la reducción de las pérdidas producto de la fabricación e instalación de ventanas prefabricadas en masa de medidas pre establecidas, en vez de hacerlas a la medida. En la segunda parte, se determina el comportamiento del prototipo del soporte desarrollado, presentado en la sección 5.4, en base al experimento descrito en el Capítulo 6, el cual simula la carga proveniente de la presión de vertido del hormigón, como se calcula en la subsección 5.1.1.

7.1. CUANTIFICACIÓN DE LA REDUCCIÓN DE LAS PÉRDIDAS

Para cuantificar la reducción de las pérdidas, como se detalla en la sección 4.3, se utilizan las mediciones y datos provenientes del fabricante de ventanas, de la construcción in situ, y del proveedor de encofrados.

7.1.1. Criterios y supuestos

Por parte del proveedor de ventanas, las consideraciones se presentan en la Tabla 7:

Tabla 7: Criterios y supuestos relacionados con el proveedor de ventanas

- **La reducción del costo de fabricación de cada ventana**: por el hecho de prefabricarlas en serie, es decir, con las dimensiones pre-acordadas en los planos, en vez de hacerlas a la medida de los vanos, como es el estado de la práctica actual. La información proviene de una entrevista a Cristian Morales (2015), Jefe de Operaciones e Instalaciones de Aluvima Estructuras LTDA, y a Victor Riquelme (2016), Gerente de Administración y Operaciones de la misma empresa.

- **Línea de ventanas considerada**: es la mostrada en las Figuras 18c y 19 (metodología), la cual corresponde a una puerta-ventana tipo corredera de termo-panel con marco y bastidor de PVC. El valor unitario se calcula como el promedio de 3 cotizaciones de distintos proveedores ubicados en la V región (Anexo E), con el valor actualizado a la fecha de octubre de 2015. Cabe destacar que se considera el valor neto incluyendo instalación y flete

Por parte del proveedor de encofrados, las consideraciones se presentan en la Tabla 8:

Tabla 8: Criterios y supuestos relacionados con el proveedor de encofrados

- **Aumento de la vida útil de las placas fenólicas en los paneles de muro**: El método de soporte actual para el molde de las jambas, como se detalla en 4.2.2, produce daños a las placas fenólicas producto de los agujeros de clavos y hendiduras durante su posterior remoción. El soporte propuesto, como se muestra en el diseño en 5.2, se ancla del bastidor metálico del panel de muro evitando los deterioros en cuestión. Por consiguiente, se supone pasar del número de puestas mínimo (30), al valor promedio (55), de acuerdo a la especificación técnica de la placa fenólica Peri Fin-Ply (CDT, 2016).

- **Número de paneles dañados por rasgo**: se utilizan 4 paneles por rasgo, pasando de un número de puestas de 30 a 55 según el punto anterior. Para el cálculo, se supone un panel de ancho 0,75 [m] y alto 2,5 [m], que permite hacer un ventanal de 2,50x2,20 [m] (utilizado para el cálculo por m^2 de ventana).

Por parte de la obra in situ, se consideran los puntos presentados en la Tabla 9:

Tabla 9: Criterios y supuestos relacionados con la obra in situ

- **Eliminar la necesidad de terminaciones gruesas de vanos**: la reducción de las pérdidas proviene de eliminar la necesidad de re hacer trabajos mal hechos, según se presenta en 4.1.2 *El proceso de terminaciones*. Esta tarea consiste en dos jornales que añaden mortero en un espesor aproximado de 1,5 [cm] a cada jamba, y que, en algunos casos, requiere un desbaste previo mediante cincel.

- **Solamente se considera el ahorro de tiempo (horas-hombre)**: al eliminar la terminación gruesa de las jambas del vano. Esto debido a que el material (m^3 de hormigón), debe ser puesto durante la obra gruesa, y se supone que el ahorro en herramientas (horas-máquina) es despreciable, basado en el análisis del proceso de obra gruesa presentado en 4.1.1 y en el de terminaciones en 4.1.2.

- **Costos del nuevo soporte**: son incorporados al análisis (más detalles del precio de mercado en el punto siguiente). Para determinar el número de veces que se pueden reutilizar, de acuerdo a Benito Jimenez (2016), Gerente Técnico de Doka Chile, un accesorio similar, como la grapa Frami (Doka, 2016b), se reutilizan en la medida que no estén rotas. En dicho contexto, Don Benito indica que en promedio un 5% de las grapas no vuelve o vuelve rota de obra, por lo que una misma grapa podría salir a 20 obras distintas durante su vida útil. Al suponer como obra promedio un edificio de 20 pisos, utilizando la misma grapa 2 veces por piso, se obtiene 20x20x2=800 el número de puestas de un soporte.

- **Estimación del costo de mercado del nuevo soporte**: se calcula como el promedio del costo de su fabricación y del precio de mercado del accesorio de encofrado más parecido. Se selecciona para tal efecto el Cerrojo Domino DRS de la empresa Peri. La cotización se encuentra en el Anexo D.

- **Instrumentos de medición láser**: se supone que dichos instrumentos, utilizados según la metodología de instalación presentada en 5.3, no incrementan los costos. La razón, es que son ocupados actualmente en el proceso *Dibujo de las trazas en obra* según el modelo integrado de la Figura 20 en la metodología.

- **El tiempo de instalación del nuevo soporte**: es considerablemente menor al sistema utilizado actualmente, basado en las observaciones en obra gruesa presentadas en 4.1.1, por lo que se hace el supuesto que no influye en los costos (es decir, no añade ni quita horas-hombre en la instalación del encofrado).

7.1.2. Datos para la cuantificación de las pérdidas

7.1.2.1. Proveedor de ventanas

El precio por metro cuadrado de ventana tipo termo-panel de PVC, determinado como el promedio de las tres cotizaciones en el Anexo B y de acuerdo a los criterios de la Tabla 7, es de $154.918.-

Por otra parte, según los datos provistos por el Gerente de Administración y Operaciones de una fábrica de ventanas en una entrevista con el autor, Victor Riquelme (2016), el hecho de hacerlas en masa en vez de a la medida, genera una reducción en el costo por ventana instalada de aproximadamente 7%. Las razones se resumen en la Tabla 10 a continuación:

Tabla 10: Motivos que explican la reducción del costo unitario de ventana instalada, Cristian Morales (2015)

- **Ahorro de tiempo**: Es la principal fuente de reducción de costo, ya que los tiempos de fabricación son hasta un 50% menores. Esto se traduce en ahorro de horas-hombre y horas-máquina por cada ventana. Las razones son las siguientes: (1) se ahorra el tiempo de medición de los vanos en obra; (2) el de medir los perfiles en la fábrica; (3) el de ajustar la configuración las máquinas de corte y termo-fusión en cada ventana; (4) se elimina la necesidad de agrupar, transportar y acopiar los perfiles según la ventana a la cual corresponden; (5) se elimina el tiempo de rotulado de las partes que componen una ventana, (6) el tiempo necesario para corregir errores cuando ventanas no calzan en los vanos, (7) la espera de las medidas para comenzar la fabricación; (8) el tiempo de asociar cada ventana a su determinado rasgo en obra. Respecto del ahorro en la espera de las medidas para comenzar la fabricación, esto tiene como consecuencia que la fábrica puede planificar de mejor manera qué encargos va a fabricar en un determinado momento, aumentando considerablemente la producción.

- **Ahorro de materiales**: Se reducen los metros lineales de perfil necesarios por m^2 de ventana, al lograr una mejor distribución de las tiras de perfiles que componen los marcos y bastidores, generando un menor despunte. La reducción en la necesidad de reparaciones también contribuye a una disminución en los materiales.

- **Ahorro en transporte**: Se reduce el uso de combustible y desgaste de los vehículos, en dos situaciones; al no existir los viajes para medir los vanos, y al hacer menos despacho cuando una ventana no calza en el vano o sufre daños (situaciones bastante frecuentes, las cuales combinadas representan aproximadamente un 30% del total de las ventanas).

7.1.2.2. Proveedor de encofrados

De acuerdo a lo supuestos establecidos en 7.1.1, se evita el daño a la placa fenólica del panel de muros, permitiendo pasar de 30 a 55 número de puestas. Se utilizan 4 paneles por jamba, de dimensiones supuestas en 0,75x2,50 m. En base a la información proporcionada por el Gerente Técnico de Doka Chile, Benito Jiménez (2016), el costo total de cambiar una placa se resume en la Tabla 11:

Tabla 11: Detalle del costo total de cambiar una placa fenólica de un panel de muro (Benito Jiménez, 2016)

Costo placa:	34.500 \$/ m^2
Costo insumos:	3.200 \$/ m^2
Costo mano de obra:	3.260 \$/ m^2
Costo total de cambiar una placa:	**40.960 \$/ m^2**

7.1.2.3. Construcción in situ

La terminación gruesa, que directamente es una reparación del contorno del vano, consiste en agregar 1,5 [cm] de hormigón en cada jamba y en el borde superior, lo cual se realiza con dos trabajadores posterior a un trazado.

- **Ahorro de tiempo**: De acuerdo a las mediciones en obra, la reparación de un vano de dimensiones 2,50 x 2,20 [m] tarda aproximadamente 1,5 días usando dos jornales. De esta manera, las horas hombre ahorradas por ventana:

$$HH_{ventanal} = 1{,}5 \cdot 2 \cdot 9 = 27\ [hh]$$

- **Costo por hora-hombre**: Para los jornales que hacen las terminaciones gruesas, el salario neto estimado en la quinta región por el Profesor de la Universidad Técnica Federico Santa María, Juan Valenzuela (2016), es de $450.000.- Se consideran 45 horas por semana.
- **Costo del nuevo soporte**: De acuerdo a 7.1.1, el precio de mercado del soporte se calcula como el promedio del costo de fabricación del prototipo ($25.000.-) y el accesorio similar cotizado en el Anexo D ($26.877.-), resultando en $25.939.- Además, de acuerdo a la estimación en la Tabla 9, se considera reutilizable 800 veces. Por otra parte, de los resultados obtenidos en las pruebas experimentales en 7.2.9, se requieren 28 soportes por cada jamba, y, por consiguiente, 56 por cada vano de alto 2,40 [m] y ancho 2,5 [m].

7.1.3. Cálculo de la reducción de las pérdidas

Se calcula como el cociente entre el costo por m^2 de ventana hecha en masa instalada sin terminación gruesa ni daños al encofrado, y el costo m^2 de ventana instalada según la práctica actual, que consiste en hacerlos a la medida requiriendo de terminaciones gruesas y dañando los paneles de muro. Este cálculo se representa en la ecuación siguiente, donde se emplean los datos de 7.1.2:

$$WR_{\%} = 100 - \frac{C_{vent\ masa} + C_{soporte}}{C_{vent\ a\ medida} + C_{TG} + \Delta C_{enc}} \cdot 100\ [\%]$$

Donde: $C_{vent\ masa} =$ Costo por m^2 de ventana hecha en masa incluyendo el servicio de instalación, según 7.1.2.1.

$C_{soporte} =$ Costo del nuevo soporte, considerando el número requerido y la cantidad de reutilizaciones, según 7.1.2.3.

$C_{vent\ a\ medida} =$ Costo por m^2 de ventana hecha a la medida incluyendo el servicio de instalación, según 7.1.2.1.

$C_{TG} =$ Costo de la terminación gruesa, según 7.1.2.3.

$\Delta C_{enc} =$ Diferencia en el costo del encofrado, asociado al cambio de placa prematuro producto de los daños según 7.1.1 y los datos de 7.1.2.2.

Por consiguiente, respecto al proveedor de ventanas según los datos de 7.1.2.1:

$$C_{vent\ a\ medida} = 154.918\ [\$/m^2]$$

$$C_{vent\ masa} = (1 - 0{,}07) \cdot 154.918 = 144.074\ [\$/m^2]$$

Respecto al proveedor de encofrados según 7.1.2.2:

$$\Delta C_{enc} = \left(\frac{1}{n_{p\,min}} - \frac{1}{n_{p\,prom}}\right) \cdot \frac{C_{placa} \cdot n_{placas/jamba} \cdot A_{placas}}{A_{ventanal}}$$

$$\Delta C_{enc} = \left(\frac{1}{30} - \frac{1}{55}\right) \cdot \frac{40.960 \cdot 4 \cdot (2{,}50 \cdot 0{,}75)}{(2{,}50 \cdot 2{,}20)} = 846 \left[\frac{\$}{m^2}\right]$$

Respecto a la construcción in-situ, según 7.1.3:

$$C_{TG} = \frac{HH_{ventanal}}{A_{ventanal}} \cdot \frac{Salario_{mensual}}{hr_{por\,mes\,trabajo}} = \frac{27}{(2{,}50 \cdot 2{,}20)} \cdot \frac{450.000}{180} = 12.273 \left[\frac{\$}{m^2}\right]$$

$$C_{soporte} = \frac{P_{soporte} \cdot n_{sop/vano}}{n_{puestas} \cdot A_{ventanal}} = \frac{25.939 \cdot 28}{800 \cdot (2{,}50 \cdot 2{,}20)} = 165 \left[\frac{\$}{m^2}\right]$$

Por lo tanto, al reemplazar las cinco componentes calculadas en la ecuación de $WR_{\%}$, se obtiene el porcentaje de reducción de las pérdidas, calculado sobre el costo por m^2 de ventana instalada bajo el método tradicional:

$$WR_{\%} = 100 - \frac{144.074 + 165}{154.918 + 12.273 + 846} \cdot 100 = 14{,}2\ [\%]$$

7.1.4. Reducción de las pérdidas en términos del costo total del edificio

En primer lugar, se procede a estimar el costo total de un edificio habitacional de hormigón armado con terminaciones de alta calidad. No se incluye el costo del terreno ni las excavaciones. Las características del edificio y datos para el cálculo se resumen en la tabla siguiente:

Tabla 12: Datos para la estimación del costo del edificio

Características del edificio	
Pisos	20
Departamentos por piso	6
Superficie por departamento	90 m^2
Área ventanas por piso	100 m^2

Partida	Costo UF/m^2
Obra gruesa	15
Terminaciones	12
Valor UF (SII, 2016)	$ 26.224,30

El área de ventanas por piso fue medida por el autor durante las visitas a terreno, en un edificio de superficie similar. Dichas mediciones se presentan en el Anexo C. El costo unitario de la obra gruesa y las terminaciones fueron estimadas por el Profesor de la UTFSM Juan Valenzuela (2016), en entrevista con el autor. Utilizando los datos de la Tabla 12, se estima el costo total del edificio:

$$C_{Total\ edificio} = 20 \cdot 6 \cdot 90\ [m^2] \cdot (15 + 12)\ \left[\frac{UF}{m^2}\right] = 291.600\ [UF]$$

$$C_{Total\ ventanas} = 100 \cdot 20\ [m^2] \cdot 154.918\ \left[\frac{\$}{m^2}\right] \cdot 26.224{,}3^{-1}\ \left[\frac{UF}{\$}\right] = 11.815\ [UF]$$

$$\%C_{ventanas/edificio} = \frac{C_{Total\ ventanas}}{C_{Total\ edificio}} = \frac{11.815}{291.600} \cdot 100 = 4{,}05\%$$

Del cálculo anterior, se estima que las ventanas de PVC con termopanel, pueden representar un 4,05% del costo total del edificio, sin considerar las excavaciones. Este valor fue verificado utilizando los presupuestos reales de dos edificios construidos en la V región, sin embargo, dichos presupuestos no pueden ser incluidos en la presente memoria por razones de propiedad intelectual.

Como en la subsección 7.1.3 se determina que la reducción del costo por m^2 de ventana instalada mediante la metodología propuesta frente a la tradicional es de un 14,9%, se calcula la reducción de las pérdidas en términos del costo total del edificio:

$$WR_{\%\ edificio} = WR_{\%} \cdot \%C_{ventanas/edificio} = 14{,}2 \cdot \frac{4{,}05}{100} \approx 0{,}6\%$$

Finalmente, es importante recordar que el prototipo del soporte mostrado es solamente para las ventanas que se instalan en vanos originados en términos de muro, y no para todas las ventanas según el cálculo realizado en esta subsección. Sin embargo, el cálculo fue realizado para denotar la importancia del problema.

7.2. COMPORTAMIENTO DEL NUEVO SOPORTE

Cabe destacar que todos los ensayos se realizan de acuerdo a la configuración presentada en 6.1.1, sin embargo, se varía la torsión de apriete del mecanismo de sujeción; en los ensayos 1 y 2, el apriete fue manual, mientras que en los ensayos 3 y 4 se utiliza una herramienta con el objeto de lograr un par de apriete mayor. En cada subsección respectiva se presentan más detalles.

Por otra parte, en todos los ensayos se utiliza el panel de muro en las condiciones provenientes de obra, de acuerdo a 6.2.1.1.

7.2.1. Criterios de falla o de detención del ensayo

Se utilizan dos criterios, donde al cumplirse cualquiera, se da por concluido el ensayo:

Criterio 1: Que el desplazamiento del nuevo soporte, medido con el LVDT, sea igual o mayor a 1 [cm]. El fundamento se basa en la tolerancia de 5 [mm] para muros que originan vanos, de acuerdo a lo expuesto en 5.1.2.

Criterio 2: Que la carga producida por la prensa hidráulica alcance 1 [Ton-f], que es la capacidad nominal de la celda de carga empleada. De acuerdo al análisis de las cargas realizado en 5.1.1, la fuerza máxima a la cual será sometido el soporte en obra, incluyendo el factor de seguridad, es de 692 [kgf]. No obstante, se selecciona la capacidad de la celda de carga como criterio de detención.

7.2.2. Tratamiento general de los datos

Producto de que el sistema de adquisición de datos trabaja en forma continua, se eliminan los datos residuales en todos los ensayos, en base al algoritmo de la Tabla 13:

Tabla 13: Algoritmo para el tratamiento general de los datos

1.	Se eliminan los datos previos al contacto de la celda de carga con el extremo del mecanismo de avance, el cual se determina que ocurre cuando F ≈ 1 [kgf]. En la Figura 43 se observa una fotografía de cuando se comienza con la adquisición de datos, pero aún la celda no ha hecho contacto.
2.	En el instante de contacto, definido en el punto anterior, se considera el desplazamiento igual a cero (δ = 0). El valor medido en aquel instante es restado a todos los datos de deformación, y proviene del desplazamiento que mide el LVDT antes del contacto de la celda con la herramienta (Figura 38).
3.	Se eliminan los datos residuales posteriores al criterio de falla, donde la deformación se mantiene constante.

Debido a que la tolerancia de los vanos es de 5 [mm], se consideran como datos de interés aquellos donde el desplazamiento es menor o igual a 6 [mm]. Dichos datos son utilizados para generar las curvas que representan de manera más fidedigna el comportamiento fuerza-desplazamiento en la zona de interés. A pesar de que en la subsección 5.1.2 se determina como 2 [mm] el desplazamiento máximo deseable del soporte, como se menciona anteriormente, la curvas se generan utilizando datos de desplazamiento hasta 6 [mm], ya que, al haber repetitividad y una alta correlación entre las curvas ajustadas y las mediciones, se podría anticipar el desplazamiento del molde durante el vertido del hormigón, por lo que bastaría sumar dicho desplazamiento a la posición inicial, de forma tal que las dimensiones horizontales del vano sean las deseadas.

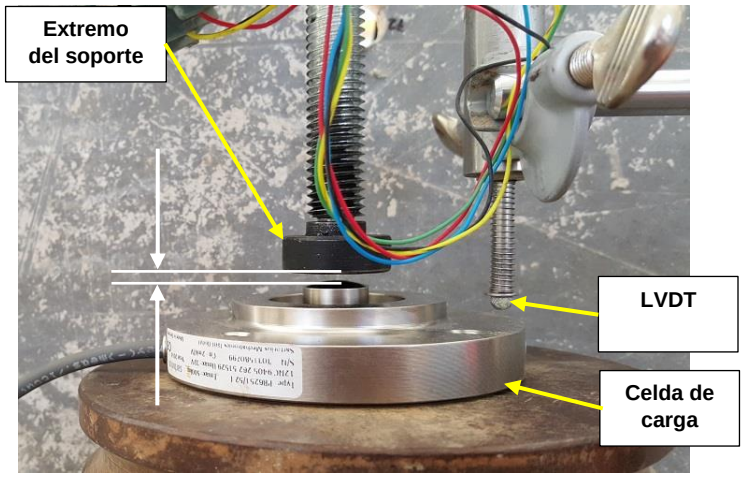


Figura 38: Celda de carga no ha hecho contacto con el extremo del soporte. Estos datos son eliminados del análisis.

7.2.3. Ensayo 1: Apriete manual

7.2.3.1. Datos relevantes y curva fuerza-desplazamiento

En este primer ensayo, el apriete del mecanismo de sujeción se realiza manualmente sin herramientas. Los datos relevantes para el análisis se resumen en la Tabla 14 y en la Figura 39:

Tabla 14: Datos relevantes ensayo 1

F_{MAX} [kgf]	282,7479
δ_{Fmax} [mm]	11,7447
$F_{@2\,[mm]}$ [kgf]	148,887
$F_{@5\,[mm]}$ [kgf]	176,470

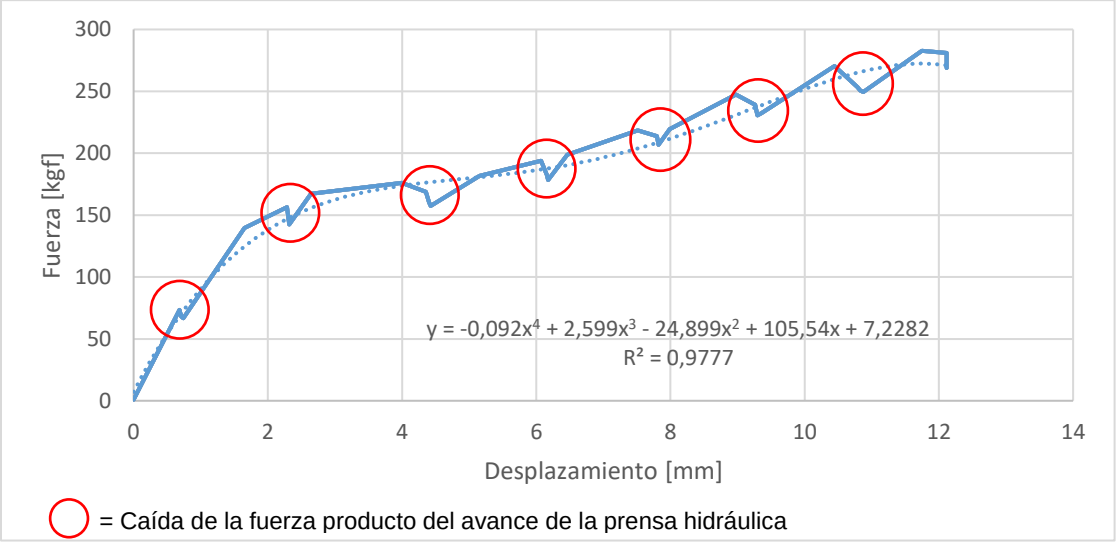


Figura 39: Curva fuerza-desplazamiento ensayo 1

7.2.3.2. Comentarios y observaciones

De la curva en la Figura 39, se destacan con círculos en rojo las caídas en la fuerza producto del avance de la prensa hidráulica, que corresponden al instante cuando se llena con aceite el cilindro para volver a bombear. Adicionalmente, se observa un comportamiento lineal con una pendiente alta, hasta aproximadamente un desplazamiento de 2 [mm], donde posteriormente se observa una disminución en la razón. Esto se corrobora con los datos relevantes en la Tabla 14, donde se observa que al pasar de un desplazamiento de 2 a 5 [mm], es decir, un incremento del 150%, la fuerza aumenta solamente un 18,5%.

Respecto del modo de falla, se observa que el soporte se desplaza como cuerpo rígido hacia arriba del bastidor del panel, lo cual se hace notorio a partir de los 5 mm aproximadamente. Posteriormente, se observa que la fuerza aumenta a una tasa mucho menor que el desplazamiento, y finalmente, cuando el desplazamiento alcanza un valor mayor al centímetro, se observa también rotación del soporte. La Figura 40 muestra la posición del soporte tras concluido el ensayo, donde se puede apreciar el desplazamiento en fases tempranas y la rotación que ocurre con posterioridad.

Figura 40: Soporte post-ensayo, las flechas en rojo indican la separación producto del desplazamiento del soporte

7.2.4. Ensayo 2: Apriete manual

7.2.4.1. Datos relevantes y curva fuerza-desplazamiento

El segundo ensayo se realiza en exactamente las mismas condiciones que el primero; con apriete manual. El objeto es determinar repetitividad en el comportamiento de la herramienta, lo que se comenta con más detalle en la sección de análisis conjunto. Los datos obtenidos se resumen en la Tabla 15 y en la Figura 41:

Tabla 15: Datos relevantes del ensayo 2

F_{MAX} [kgf]	229,8
δ_{Fmax} [mm]	11,9
$F_{@2\,[mm]}$ [kgf]	159,3
$F_{@5\,[mm]}$ [kgf]	191,1

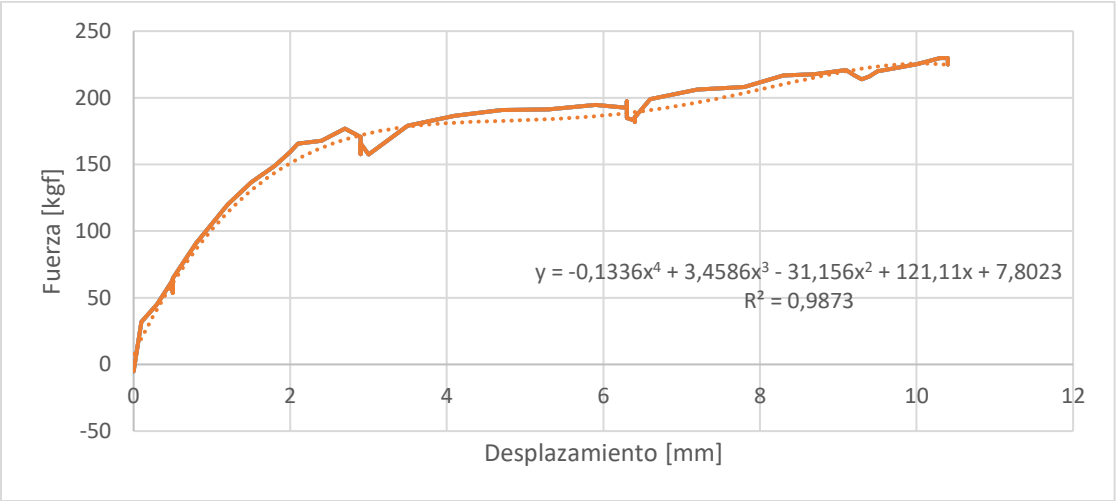


Figura 41: Curva fuerza-desplazamiento ensayo 2

7.2.4.2. Comentarios y observaciones

La comparación entre pruebas se realiza en el análisis conjunto en la subsección 7.2.7. No obstante, en este ensayo, se observa un menor número de caídas de fuerza asociadas a la acción de la prensa, y que, en parte, se puede explicar por una menor resolución seleccionada por el instrumentista, que fue de 10^{-1} [mm] para la prueba en cuestión, a diferencia del ensayo 1, donde fue de 10^{-6} [mm]. A su vez, se puede explicar por usar bombeos más largos que implican un mayor flujo de aceite, y, por ende, mayor desplazamiento.

Por otra parte, se observa el mismo comportamiento del ensayo 1; mayor pendiente de la curva hasta aproximadamente un desplazamiento de 2 [mm], donde luego se observa una notable pérdida en la resistencia, al disminuir la tasa de fuerza por desplazamiento. Esto nuevamente se corrobora con la información en la Tabla 15, donde al pasar de 2 a 5 [mm] en desplazamiento, que corresponde a un aumento de 150%, el incremento de fuerza fue sólo de un 20,0%, muy similar al caso del ensayo 1.

Respecto al modo de falla, se observa que fue muy similar al del ensayo 1, con un desplazamiento de cuerpo rígido que se hace evidente a partir de los 5 [mm], para luego pasar a un desplazamiento combinado con una rotación cuando la medición del LVDT está en torno al centímetro.

7.2.5. Ensayo 3: Apriete con herramienta

Este ensayo se diferencia de los 1 y 2 únicamente en que el mecanismo de sujeción fue apretado empleando una herramienta (como se muestra en la Figura 42), logrando un par de apriete superior al manual. El objetivo es determinar si al aumentar la torsión de apriete, aumenta la resistencia del soporte. La idea se fundamenta en el incremento de la normal entre el mecanismo de sujeción y el bastidor del panel.

Cabe destacar que, la herramienta fue diseñada para un par de apriete manual, por lo que, al usar la llave, se produjo flexión plástica en el pasador del extremo del mecanismo de sujeción.

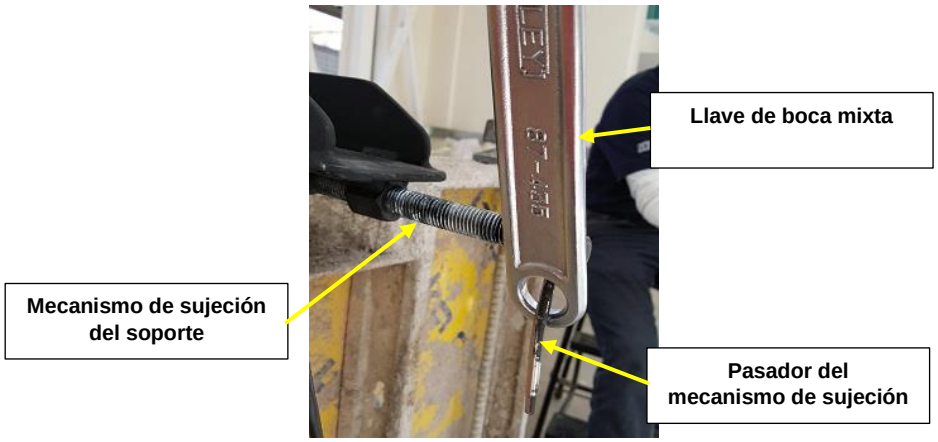


Figura 42: Apriete del mecanismo de sujeción usando una herramienta

7.2.5.1. Datos relevantes y curva fuerza-desplazamiento

Los datos y la curva de ajuste se presentan en la Tabla 16 y Figura 43, respectivamente y de manera análoga a los ensayos anteriores.

Tabla 16: Datos relevantes del ensayo 3

F_{MAX} [kgf]	272,0
δ_{Fmax} [mm]	12,86
$F_{@2\,[mm]}$ [kgf]	176,1
$F_{@5\,[mm]}$ [kgf]	215,4

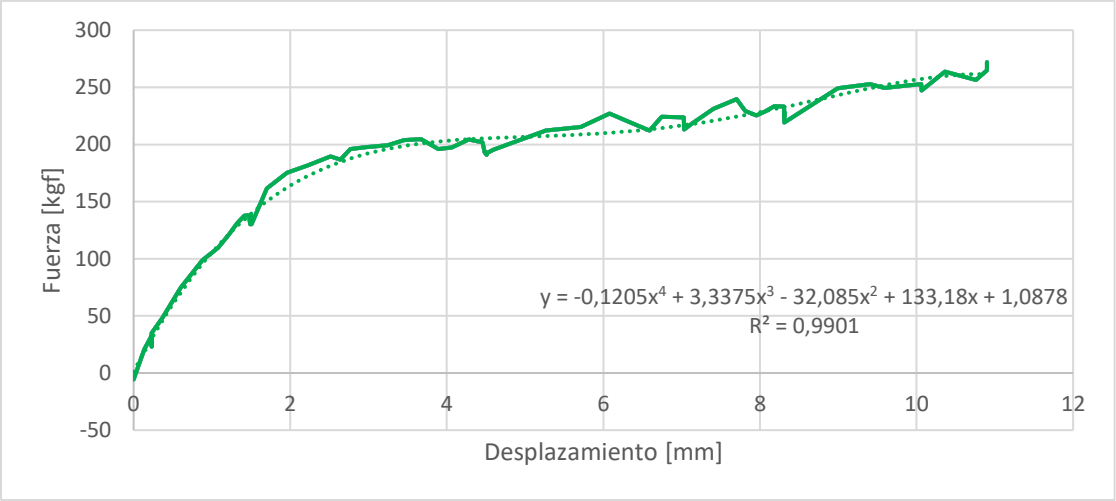


Figura 43: Cuerva fuerza-desplazamiento ensayo 3

7.2.5.2. Comentarios y observaciones

Al igual que en los ensayos 1 y 2, se observa una pendiente alta en la zona por debajo de 2 [mm], para posteriormente pasar a una baja tasa de fuerza por desplazamiento. De acuerdo a la Tabla 16, para pasar de 2 a 5 [mm], se requirió un aumento en la fuerza de sólo 22%, ligeramente superior a los ensayos 1 y 2, pero muy similar.

7.2.6. Ensayo 4: Apriete con herramienta y limpieza del panel

Este ensayo consideró la limpieza el hormigón fino en la cara del panel donde se ancla el mecanismo de sujeción, empleando para ello una lija gruesa. También se volvió a apretar con la llave, análogo al ensayo 3 y como muestra la Figura 42. El objetivo es determinar si los restos de hormigón en el panel sucio, influyen en la resistencia del soporte.

7.2.6.1. Datos relevantes y curva fuerza-desplazamiento

Tabla 17: Datos relevantes ensayo 4

F_{MAX} [kgf]	130,9
δ_{Fmax} [mm]	7,857
$F_{@2\,[mm]}$ [kgf]	-
$F_{@5\,[mm]}$ [kgf]	66,96

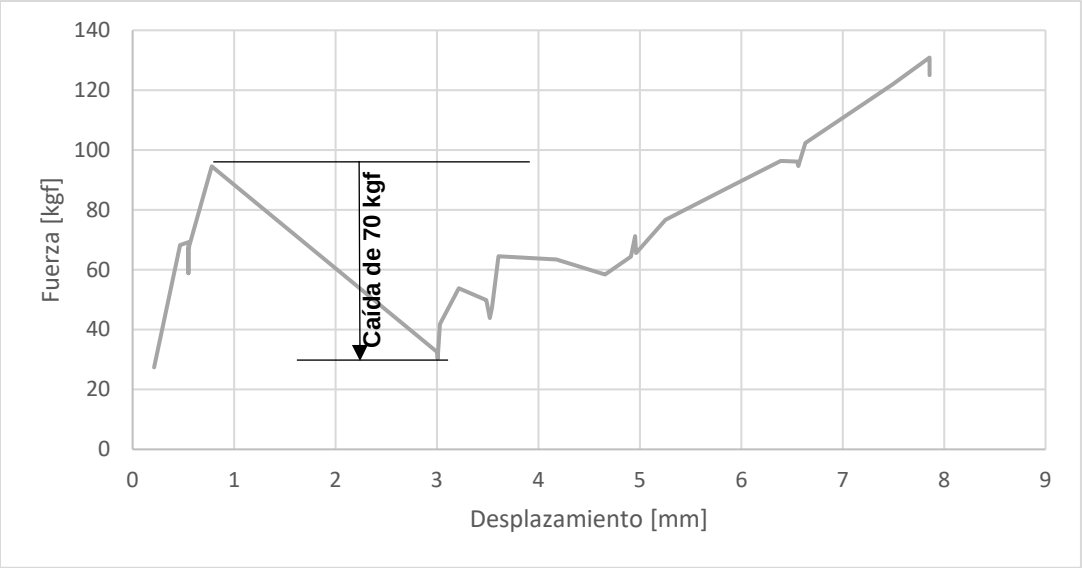


Figura 44: Curva fuerza-desplazamiento ensayo 4; se destaca con flechas la caída de 70 kgf producto del acomode de la arandela del mecanismo de avance

7.2.6.2. Comentarios y observaciones

Durante el presente ensayo, cuando la carga alcanza alrededor de 95 [kgf], se produce un ruido producto del acomodo de la arandela del mecanismo de avance, la cual se encontraba inicialmente fuera de su eje. Como se destaca con flechas en la Figura 44, la carga disminuye bruscamente al mismo tiempo que aumenta el desplazamiento. Además, el LVDT deja de registrar datos posteriores a 7,857 [mm], por lo que **la presente prueba se invalida y sus datos no son utilizados para el análisis**.

7.2.7. Análisis conjunto

En la presente subsección, se comparan los datos obtenidos en los tres ensayos validados, donde previamente se realiza un post-tratamiento adicional.

7.2.7.1. Post-tratamiento adicional a los datos

Con el objeto de generar las curvas que tengan mejor correlación con la parte del gráfico donde la información es de interés, se consideran solamente los puntos con un desplazamiento igual o menor a aproximadamente 6 [mm].

Por otra parte, se eliminan los datos distorsionados por las caídas de fuerza asociadas al bombeo de la prensa hidráulica, como los destacados en circunferencias color rojo en la Figura 39. Para ello, sólo se toman en cuenta los datos consecutivos con tendencia al alza en la fuerza.

7.2.7.2. Datos relevantes y curva fuerza-desplazamiento conjunta

La Tabla 18 a continuación, resume los datos de los tres ensayos validados, los cuales fueron sometidos al post-tratamiento adicional descrito en 7.2.7.1:

Tabla 18: Datos relevantes para el análisis en conjunto

	F max	**F @ 2 mm**	**F @ 5 mm**	**F(δ) [kgf]**	**R²**
Ensayo 1	193,9	148,9	180,9	$y = 2{,}36x^3 - 29{,}58x^2 + 124{,}38x + 1{,}39$	0,9994
Ensayo 2	194,7	159,3	191,1	$y = 2{,}29x^3 - 29{,}16x^2 + 124{,}38x + 8{,}26$	0,9941
Ensayo 3	226,9	176,1	210,8	$y = 2{,}36x^3 - 30{,}85x^2 + 137{,}32x + 0{,}31$	0,9977
Aumento*	16,8	14,3	13,4		

El aumento* presentado en la última fila de la Tabla 18, corresponde al incremento porcentual de la fuerza producto de utilizar la llave para lograr un mayor par de apriete del mecanismo de sujeción, como muestra en la Figura 42. En otras palabras, corresponde al aumento de la resistencia obtenida en el ensayo 3 por sobre los ensayos 1 y 2. Se calcula en base a la siguiente expresión:

$$Aumento = \frac{F_{ensayo\ 3} \cdot 100}{0{,}5 \cdot (F_{ensayo\ 1} + F_{ensayo\ 2})} - 100\ [\%]$$

La Figura 45, corresponde al gráfico simultáneo de los datos provenientes de los tres ensayos validados, los cuales fueron sometidos al post-tratamiento adicional descrito en 7.2.7.1:

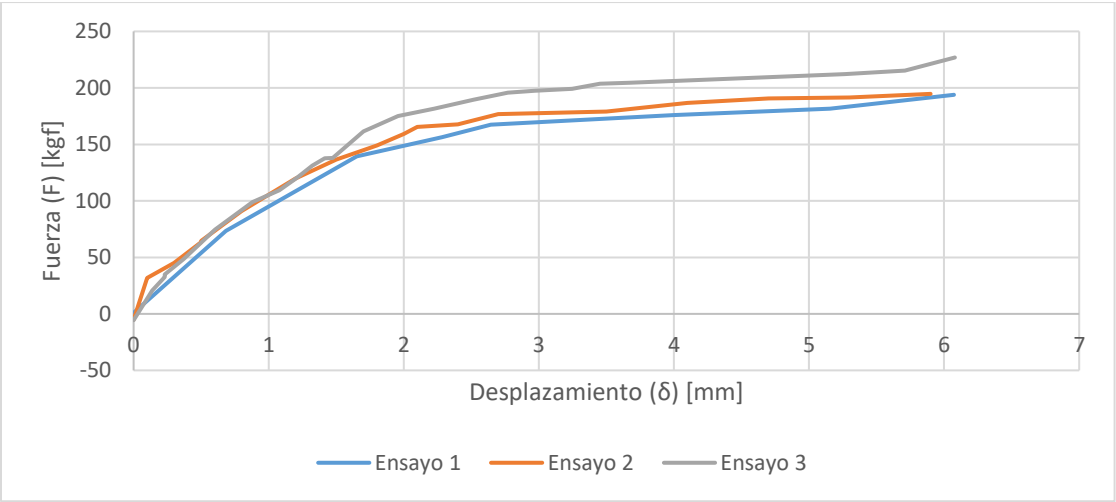


Figura 45: Curva fuerza-desplazamiento conjunta

7.2.7.3. Comentarios y observaciones

En primer lugar, se destaca la baja variabilidad entre los tres ensayos, ya que las curvas son muy parecidas en forma y magnitud. Esto es aún más notorio, si solamente se consideran los ensayos 1 y 2, en los cuales se empleó apriete manual en el mecanismo de sujeción. Por otra parte, se observa un aumento leve en la fuerza a un determinado desplazamiento, de aproximadamente un 15%, producto de aplicar un par de apriete mayor al usar una herramienta como se muestra en la Figura 42.

En segundo lugar, respecto de la forma de las curvas, se observa que en las tres hay una mayor pendiente en la zona donde la deformación es inferior a los 2 [mm], que es el punto de inflexión donde disminuye la tasa de aumento de fuerza comparada con la del desplazamiento. También se observan valores de correlación muy altos (superiores a 0,99), al emplear un polinomio de grado 3 para representar las curvas fuerza en función del desplazamiento (Tabla 18).

Finalmente, en tercer lugar, se observa que en los tres ensayos el modo de falla es el mismo; se produce un desplazamiento de cuerpo rígido hacia arriba cuando el valor medido por el LVDT se encuentra en la vecindad de los 5 [mm], pero al llegar los 10 [mm], se produce además una rotación. Posterior a dicha rotación, el aumento de la fuerza tiende a cero. Una fotografía de la herramienta una vez terminado el ensayo se presenta en la Figura 40.

7.2.8. Determinación de la capacidad de carga del nuevo soporte

En base al análisis conjunto realizado en la subsección 7.2.7 para los ensayos 1 y 2 con apriete manual, en particular considerando los datos de la Tabla 18 y las curvas en la Figura 45, junto con el desplazamiento deseado de 2 [mm] determinado en el diseño en 5.1.2, se calcula la resistencia del prototipo del nuevo soporte ensayado como el promedio aproximado a la decena:

$$F_{rated\ soporte\ @\ 2\ [mm]} = 148{,}9 + 159{,}3 = 154{,}1 \approx 150\ [kgf]$$

Por otra parte, considerando la alta repetitividad de los datos obtenidos en los ensayos, lo cual permite anticipar y compensar el desplazamiento producto de la presión del vertido del hormigón, se calcula también la resistencia del soporte considerando un desplazamiento de 5 [mm]:

$$F_{rated\ soporte\ @\ 5\ [mm]} = 180{,}9 + 191{,}1 = 186{,}0 \approx 190\ [kgf]$$

Para ambos casos, la curva de ajuste que determina el comportamiento de la herramienta, calculada como el promedio de las curvas de los ensayos 1 y 2 con post-tratamiento de la Tabla 18, es la siguiente:

$$F(\delta) = 2{,}33 \cdot \delta^3 - 29{,}37 \cdot \delta^2 + 124{,}38 \cdot \delta + 4{,}83$$

7.2.9. Determinación de la cantidad de soportes necesarios

De acuerdo a los cálculos de la fuerza lateral producto de la presión hidrostática del hormigón en estado líquido ($F_{h\ tot}$), calculada en 5.1.1., y de la capacidad de la herramienta ($F_{rated\ soporte\ @\ 2\ [mm]}$), calculada en 7.2.8., la cantidad de herramientas necesarias para soportar el molde de la jamba en un muro de 2,40 [m], es la siguiente:

$$N_{soportes} = \frac{F_{h\ tot}}{F_{rated\ soporte\ @\ 2\ [mm]}} = \frac{2073{,}60}{150} = 13{,}82 \rightarrow N_{soportes} = 14$$

Además, al incluir el FS igual a 2,0, según la Tabla 21 en el Anexo B correspondiente al ACI 347-04, el número de soportes:

$$N_{soportes\ FS} = N_{soportes} \cdot FS = 14 \cdot 2 = 28$$

Por otra parte, si se considera anticipar el desplazamiento del molde, lo cual implica utilizar ($F_{rated\ soporte\ @\ 5\ [mm]}$) de la subsección 7.2.8, el número de soportes disminuye a 11 (22 con el FS). No obstante, y siendo consecuente con el diseño general del soporte discutido en 5.1, para efectos de la presente memoria se considera la resistencia del soporte como 150 [kgf], y, por consiguiente, se requieren 28 por cada jamba.

7.3. RECOMENDACIONES PARA MEJORAS FUTURAS

En primer lugar, se comenta que la resistencia a la fuerza axial de la herramienta es menor a la esperada. De acuerdo a la información recopilada durante diversas entrevistas, junto con observar el comportamiento de los trabajadores en terreno, el autor estima que idealmente se instalen 6 soportes por cada molde de jamba. Las razones son, principalmente, lograr una instalación rápida y cómoda, de forma que los maestros efectivamente opten por usar el soporte.

Sin embargo, de acuerdo a la resistencia obtenida durante las pruebas de laboratorio, se determina que se requieren 28 soportes por cada molde de jamba considerando el FS, muy superior a las ideales 6. Por consiguiente, la principal recomendación es incrementar la resistencia a la fuerza axial de cada soporte. Para ello, es necesario estudiar las causas que generan el modo de falla observado, el cual, como se describe en 7.2.3.2 y se muestra en la Figura 40, corresponde a un desplazamiento de cuerpo rígido, con posterior rotación. En base a esto, se debe mejorar el mecanismo de sujeción del diseño actual, el cual se basa en la fuerza de roce, donde la normal entre el extremo del mecanismo de sujeción y el panel viene dada por el torque aplicado al primero. No obstante, en el experimento se observa que a pesar de incrementar significativamente la torsión de apriete empleando una llave en vez de torsión manual, la resistencia de la herramienta solamente aumenta aproximadamente un 15%.

Por consiguiente, se propone como principal mejora, cambiar el mecanismo de sujeción actual, a uno de acción combinada de roce con el bastidor del panel (por presión de contacto, como el sistema actual), así como también que se enganche a los perfiles metálicos del bastidor. Un ejemplo de accesorio de encofrado que funciona con este principio, es el Cerrojo Domino DRS de la compañía Peri, como se muestra en la Figura 46:

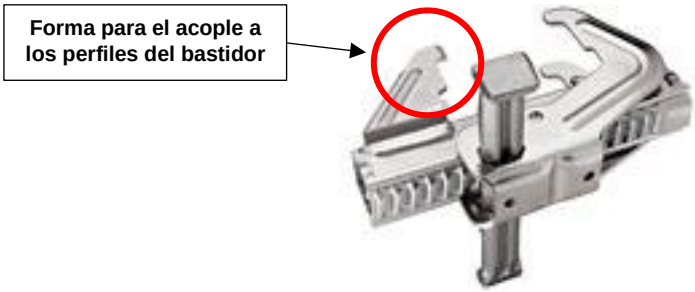


Figura 46: Cerrojo Domino DRS (PERI, 2016b). En el círculo rojo se destaca el sistema para acoplarse a los perfiles del bastidor

Sin embargo, la forma del mecanismo de soporte al incorporar el principio de acople por enchanche como el de la Figura 46, debe ser intercambiable de acuerdo al modelo y marca del encofrado, ya que los perfiles de los bastidores de las distintas líneas de paneles son distintos. Esto no supone un problema mayor, ya que usualmente en una misma obra se utiliza sólo una marca y modelo de encofrado.

CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES

Todas aquellas actividades que consumen recursos sin aportar valor al producto final, concepto denominado pérdidas productivas, resultan en un aumento en los costos del producto. En la construcción habitacional, esto resulta que las familias deban pagar más por un hogar a raíz de estas ineficiencias. Sin embargo, se ha demostrado que la prefabricación es una técnica constructiva que permite reducir dichas pérdidas. No obstante, para que estos ahorros se materialicen, es necesario que se utilicen procedimientos específicos desde las fases iniciales del proyecto, así como durante el proceso constructivo. Un ejemplo de dichos procedimientos, es la prefabricación en masa y de dimensiones estándar de los elementos, lo cual no es una práctica habitual en el caso de las ventanas de edificios habitacionales, donde se opta por hacerlos a la medida. En este contexto, en el presente trabajo de investigación se utiliza el método científico con el objetivo principal de generar conocimiento de (1) la magnitud de las pérdidas producto de no prefabricar las ventanas en masa, y (2) de las causas por las cuales no se opta por esta metodología, mediante el estudio, diseño, desarrollo y pruebas experimentales de una nueva tecnología que elimine la causa fundamental, resultando en un proceso constructivo más eficiente y con viviendas de menor costo, beneficiando a la sociedad.

Para conocer la magnitud de las pérdidas, en esta investigación se realizó un análisis de cuantificación de las pérdidas productivas, producto de que las ventanas sean prefabricados en masa en vez de hechos a la medida de cada vano ya construido, como se realiza tradicionalmente. Que sean hechos de esta forma es consecuencia del problema estudiado en esta memoria: la insuficiente precisión en la construcción de los vanos originados en el término de muros para la instalación de ventanas prefabricadas en masa. A partir del trabajo en terreno realizado durante la investigación, se logró identificar la causa fundamental del problema: el sistema de soporte rudimentario del molde de las jambas en término de muro, el cual es impreciso, no permite ajustes y, además, daña los paneles del moldaje. Dicho sistema es ideado en obra producto de que el encofrado es utilizado de forma distinta para el que fue diseñado, cuando la longitud de las secciones de muro no coincide con su modulación. Como consecuencia, se estudió, diseñó y desarrolló un nuevo soporte que permite situar el molde de la jamba de forma precisa y sin dañar el moldaje. Adicionalmente, se diseñó y llevó a cabo una prueba experimental de laboratorio, con la finalidad de determinar su comportamiento a la fuerza proveniente de la presión del hormigón durante el vertido.

En base al análisis de los datos de la prueba en el laboratorio y los obtenidos en terreno, se verifican o contrastan las hipótesis establecidas en el Capítulo 3:

a. *Prefabricar las ventanas de acuerdo a las dimensiones establecidas en los planos, en vez de a la medida de cada vano ya construido, permite reducir los costos de su fabricación en un 10%;*

Esta hipótesis no se comprueba, en base al análisis de los datos proporcionados por el fabricante de ventanas, resumidos en la sub-subsección 7.1.2.1, en conjunto con las observaciones realizadas en la planta, resumidas en 4.1.3. Los dos grupos de datos muestran que prefabricar en masa resulta en una reducción del costo de su fabricación del 7%.

Sin embargo, en el análisis de las subsecciones 7.1.3 y 7.1.4, al incluir la eliminación de la reparación los vanos en conjunto con incrementar la vida útil de las placas fenólicas del encofrado de muros, como consecuencia de cambiar el sistema de soporte rudimentario empleado actualmente por el desarrollado en esta investigación, las pérdidas, calculadas como el costo unitario por m^2 de ventana instalada, se reducen en un 14,2%. Al considerar que las ventanas de termopanel de PVC representan

aproximadamente un 4% del costo total del edificio, esta técnica permitiría reducir en un 0,6% el costo total, lo cual es una cifra considerable. El proceso de reparación de los vanos se presenta en la subsección 4.1.2, el sistema de soporte empleando actualmente que daña las placas fenólicas en 4.2.2, mientras que el desarrollo del nuevo soporte se detalla en el Capítulo 5.

b. *Es posible crear un nuevo soporte para los moldes de las jambas originadas en el término de muros, el cual permite controlar la geometría de los vanos con suficiente precisión para instalar ventanas prefabricadas de medidas pre-establecidas;*

Esta hipótesis se comprueba. En el transcurso de este estudio, se desarrolla y experimenta con un nuevo soporte para los moldes de las jambas, el cual fue diseñado para controlar la geometría de los vanos con una precisión suficiente para instalar ventanas prefabricadas de medidas pre-establecidas. Esta precisión se logra al emplear el giro de un tornillo en el mecanismo de avance, el cual le confiere un movimiento continuo. Dicho movimiento continuo permite posicionarlo en la posición seleccionada, muy por debajo de la tolerancia de ±2,5 [mm] en cada jamba de un vano, establecida en la subsección 5.1.2.

c. *En base a la presión lateral del hormigón durante el vertido (ACI, 2004), la resistencia a la fuerza axial de un soporte individual en cuestión será de 692 [kgf], con una respectiva deformación menor o igual a 2 [mm], la cual es determinada por la tolerancia en vanos en muros de hormigón (CDT, 2009: p.11).*

Esta hipótesis no se comprueba. Los resultados del análisis de los datos obtenidos en las pruebas de laboratorio, presentados en la subsección 7.3.8, establecen que la resistencia de un soporte a la fuerza axial, con un desplazamiento asociado de 2 [mm], es de 154,1 [kgf]. Este valor es muy inferior al esperado de 692 [kgf] de esta hipótesis, calculado en la subsección 5.1.1 en base al análisis de las fuerzas producto de la presión del hormigón durante el vertido y su respectivo factor de seguridad. Esto tiene como consecuencia que el soporte debe ser mejorado antes de ser probado en terreno. Sin embargo, el problema no radica en el diseño del soporte en sí mismo, sino en la conexión con el bastidor del panel de muros. El experimento reveló que el soporte sufre un movimiento de cuerpo rígido desprendiéndose del panel, como se detalla en 7.2.3.2 y en la Figura 40. No obstante, esta dificultad se puede superar al modificar el mecanismo de sujeción por uno tipo enganche, como se indica en la sección 7.3, el cual debe ser intercambiable para acomodarse al moldaje, lo cual no supone un problema mayor, ya que, usualmente, en una misma obra se utiliza sólo un modelo y marca de encofrado.

8.1. RECOMENDACIONES

El no alcanzar la resistencia esperada conlleva a las recomendaciones para un trabajo futuro. En primer lugar, se sugiere reemplazar los tornillos de 5/8 [in] con hilo normal, empleados en el prototipo desarrollado tanto el mecanismo de sujeción como en el de avance, por hilos trapezoidales no continuos en todo el contorno, como el que poseen las barras Dywidag DW15 utilizadas en el experimento, las cuales son detalladas en la sub-subsección 6.2.1.2. La razón, es que los hilos trapezoidales no continuos son auto-limpiantes, lo cual le confiere la resistencia al hormigón. Esta característica es requerida según el punto 6 de la Tabla 6.

En segundo lugar, se debe mejorar el mecanismo de sujeción del soporte. En la sección 7.3, se aconseja modificar el principio de funcionamiento actual, el cual se basa únicamente en el roce

entre el soporte y el panel metálico del bastidor del panel producto de la presión de contacto, por uno de acción combinada de roce y de enganche al perfil del bastidor. Un ejemplo de accesorio de encofrado que funciona con este principio, es el Cerrojo Domino DRS de la compañía Peri (Peri, 2016). Sin embargo, al utilizar un acople por enganche como el de la Figura 46, la forma del mecanismo de sujeción debe ser diseñada considerando la forma de los perfiles metálicos que conforman el bastidor de los paneles de moldaje, los cuales son diferentes según la marca y el modelo de cada una. Esto tiene como consecuencia que el soporte sea menos general.

Posterior a modificar el soporte, se recomienda determinar su nueva resistencia a la fuerza axial, siguiendo para tales efectos la metodología presentada en el Capítulo 6. Si se alcanza una fuerza igual o mayor a 692 [kgf], la cual se determinó en 5.1.1 para 6 soportes y una presión hidrostática de 56,51 [kPa], se aconseja realiza pruebas reales con hormigón en una obra siguiendo la metodología de instalación presentada en 5.3. En dichas pruebas, se aconseja medir el desplazamiento del molde de la jamba a medida que se vierte y vibra el hormigón, y medir la geometría de los vanos posterior al descimbrado para comparar con la dimensión esperada.

8.2. OBSERVACIONES PERSONALES

Respecto a las experiencias personales del autor durante la investigación, son varias, como es de esperar al hacer trabajo en terreno y en laboratorio. Al entrevistar a profesionales de distintos sectores involucrados en un mismo proyecto, como es el caso de la inmobiliaria, la empresa constructora, el proveedor de encofrados y el de ventanas, el autor pudo tener una visión más amplia de cómo se toman y ejecutan las decisiones. En este ámbito, se sugiere establecer una mejor integración entre las distintas partes en fases tempranas de los proyectos, para evitar problemas a futuro y optimizar los procesos, eliminando pérdidas.

Por otra parte, el autor pudo constatar personalmente la dificultad de realizar una investigación científica en la construcción, como se menciona en el planteamiento del problema en el Capítulo 3: la gran cantidad de variables incontrolables, las condiciones cambiantes, la dificultad de conseguir permisos para visitar y realizar mediciones, e inclusive aún más, para cambiar su metodología de trabajo. Sin embargo, el autor debe resaltar la gran disposición y colaboración de las empresas hacia su persona, lo cual hizo posible el trabajo. En este contexto la investigación fue una muy buena experiencia de aprendizaje, donde se pudo observar directamente los problemas y las consecuencias reales de cuando el diseño no considera exhaustivamente la constructabilidad[3] en fases tempranas del proyecto.

Finalmente, el autor quisiera destacar la importancia de resolver problemas reales de la industria, ya que a pesar de que, en este caso, no tenga una componente compleja de cálculos y modelos teóricos, una solución simple a un problema real puede hacer la diferencia entre inventar e innovar, teniendo un mayor impacto positivo para la sociedad.

[3] "Constructabilidad se define como el uso óptimo del conocimiento y experiencia de la construcción en la planificación, diseño/ingeniería, abastecimientos, y operaciones de terreno para asegurar los mejores resultados generales del proyecto. Constructabilidad resume en una palabra los conceptos de "construcción" y "habilidad", es decir, habilidad de construir óptimamente." Ghio et al., (1997).

REFERENCIAS

AMERICAN Concrete Institute (ACI). Guide to Formwork for Concrete. ACI 347-04. Estados Unidos, 2004. 32 p.

BELL, Pamela. Kiwi Prefab: Prefabricated Housing in New Zealand: An Historical and Contemporary Overview with Recommendations for the Future. Wellington. Victoria University of Wellington, New Zealand, 2009.

BERNOLD, Leonhard E. Construction Equipment and Methods: Planning, Innovation, Safety. Estados Unidos, Wiley, 2013. 608 p.

BERNOLD, Leonhard y ABOURIZK, Simaan. Managing performance in construction. Estados Unidos, John Wiley & Sons, 2010. 528 p.

BROAD Group. T30A Tower Hotel technical briefing. Enero, 2012. [en línea] <http://www.greenindustryplatform.org/wp-content/uploads/2013/07/Broad-Group-BSB-T30-Tower-Hotel_Technical-Briefing.pdf> [consulta: agosto 2015].

BRUE, Greg y HOWES, Rod. Six Sigma: The Mcgraw-Hill 36 Hour Course. Inglaterra, McGraw-Hill, 2006. 304 p.

BURGESS, J. C., BUCKETT, N. R., y PAGE, I. C. Prefabrication impacts in the New Zealand construction industry. BRANZ study report (279): 1815-1985, 2013.

CLARKE, Linda y WALL, Christine. Craft versus industry: the division of labor in European housing construction. Construction Management and Economics, 18(6): 689-698. 2000.

COFFEY, Manus. Cost-effective systems for solid waste management. Waterlines, 17(3): 23-4, enero 1999.

COMISIÓN Nacional de Investigación Científica y Tecnológica (CONICYT). Investigación en Transporte en Chile: Áreas de investigación y capacidades. [en línea] Programa Unión Europea del Departamento de Relaciones Internacionales de CONICYT, Santiago, Chile. <http://www.sti-cooperation.cl/jdownloads/Documentos%20de%20anlisis%20%20Analysis%20Documents/transporte_es.pdf> [consulta: agosto 2015].

COMISIÓN Nacional del Medio Ambiente (CONAMA). Primer reporte del manejo de residuos sólidos en Chile. Santiago, Comisión Nacional del Medio Ambiente, 2010.

CORPORACIÓN de Desarrollo Tecnológico (CDT). Análisis de la productividad en obras de edificación en Chile. Informe técnico de la Corporación de Desarrollo Tecnológico, Santiago de Chile, 2013. 28 p.

CORPORACIÓN de Desarrollo Tecnológico (CDT). Fichas técnicas: Placas Fenólicas PERI Fin-Ply. [en línea] <http://www.especificar.cl/fichas/tablero-contrachapado-para-moldajes> [consulta: junio 2016].

CORPORACIÓN de Desarrollo Tecnológico (CDT). Manual de Tolerancias para Edificaciones. 1ª Edición. Santiago, Corporación de Desarrollo Tecnológico, 2009. 71 p.

COWLES, E., y WARNER, P. Prefabrication and Modularization in Construction: 2013 Survey Results. FMI Corporation, 2013. 28 p.

CRAVEN, David J., OKRAGLIK, Henry M. y EILENBERG, Ian M. Construction waste and a new design methodology. En: 1st Conference of CIB TG 16 (6-9 noviembre 1994, Estados Unidos). Tampa, Sustainable Construction, 1994, pp. 89-98.

DAVIES, Colin. The prefabricated home. Inglaterra, Reaktion books, 2005. 10 p.

DAWSON, Chester. Kiichiro and Eiji Toyoda: Blazing The Toyota Way. [en línea] Revista BusinessWeek, 24 de mayo del 2004. <http://www.bloomberg.com/news/articles/2004-05-23/kiichiro-and-eiji-toyoda-blazing-the-toyota-way> [consulta: julio 2015].

DEPARTAMENTO de Protección Ambiental de Hong Kong. Waste reduction framework plan 1998-2007. Departamento de Protección Ambiental, Gobierno de Hong Kong. 1998. [en línea] <http://www.epd.gov.hk/epd/english/environmentinhk/waste/prob_solutions/wrfp_ch2.html> [consulta: agosto 2015].

DOKA Chile Encofrados LTDA. Encofrado marco Frami Xlife. [en línea] <http://www.doka.com/la/system-groups/doka-wall-systems/framed-formwork/frami-xlife/index> [consulta: mayo 2016a].

DOKA España. Encofrado marco Frami Xlife. [en línea] <https://www.doka.com/es/system-groups/doka-wall-systems/framed-formwork/frami-xlife/index> [consulta: junio 201ba].

DUMITRESCU, Corina, y DUMITRACHE, Marilena. The impact of lean Six Sigma on the overall results of companies. Economia: Seria Manage 14: 535-544, 2011.

FANTIN, Ivan. Applied Problem Solving: Method, Applications, Root Causes, Countermeasures, Poka-Yoke and A3. Milan, Italia, Createspace an Amazon company, 2014. 212 p.

FAWCETT, R., ALLISON, K., y CORNER, D. Using Modern Methods of Construction to build homes more quickly and efficiently. Inglaterra, National Audit Office, 2005.

GALLEGUILLOS, Juan Pablo. Arquitecto de la Inmobiliaria Dhelos, en entrevista con el autor, 2015.

GARCÍA, Fabiola. Construcción Prefabricada: Edificio Chacay, Temuco. Revista BIT (97): 58-60, julio 2014.

GHIO, Virgilio, CAMPERO, Mario y ALARCÓN, Luis. Prefabricación, Preensamblaje, y Modularización (PPM): Un enfoque integral de constructabilidad. Pontificia Universidad Católica de Chile, Revista Ingeniería de Construcción, (15): 28-35, 1997.

GOODIER, Chris y PAN, Wei. The future of UK housebuilding. RICS Research 2010 Edition, Londres, 2010.

GRAY, Colin y DAVIES, Richard. Perspectives on experiences of innovation: the development of an assessment methodology appropriate to construction project organizations. Construction Management and Economics, 25(12):1251-1268. 2007.

HAN, Seung, CHAE, Myung, IM, Keon y RYU, Ho. Six Sigma-Based Approach to Improve Performance in Construction Operations. Journal of management in Engineering (ASCE), 24(1): 21-31, enero 2008.

HILTI Corporation. Manual Original: Medidor Láser PD-E. Schaan, Alemania, Hilti Corporation AG, 2013a.

HILTI Corporation. PMC 46 Operating Instructions. [en línea] Hilti Corporation AG, julio 2013b. <https://www.hilti.cl/medias/sys_master/documents/hec/9077169455134/PMC_46_PUB_5071432_000.pdf> [consulta: agosto 2015].

HILTI Corporation. PRI 36 Operating Instructions [en línea] Hilti Corporation AG, 2014. <https://www.us.hilti.com/medias/sys_master/documents/h2b/9117696884766/PRI_36_PUB_5162040_000.pdf> [consulta: agosto 2015].

HORMAN, Michael y THOMAS, Randolph. Role of inventory buffers in construction labor performance. Journal of Construction Engineering and Management (ASCE), 131(7): 834-843, julio 2015.

HOWELL, Gregory. What is lean construction? En: 7th Annual Conf. of the Int. Group for Lean Construction IGLC-7 (7ª, 26-28 julio 1999, Estados Unidos), Berkeley, University of California, 1999.

HOWELL, Gregory y BALLARD, Glenn. Lean production theory: Moving beyond can-do. En: 2nd Annual Conf. of the Int. Group for Lean Construction IGLC-2 (2ª, septiembre 1994, Chile), Santiago, Universidad Católica de Chile, 1994.

HUANG, Chuen-Huei. Using the Internet and Query Approach of Customizing Prefabricated Houses. Tesis (Doctor of Philosophy in Architecture). Chicago. Illinois Institute of Technology, Graduate College, 2008. 213 p.

INSTITUTO Nacional de Normalización (INN). Catálogo de Normas. 2015 [en línea] <http://www.inn.cl/busqueda-de-normas> [consulta: agosto 2015].

JIMÉNEZ Sepúlveda, Benito Esteban. Gerente Técnico en DOKA Chile Encofrados LTDA, en correspondencia con el autor, 2016.

JIMÉNEZ Sepúlveda, Benito Esteban. Gerente Técnico en DOKA Chile Encofrados LTDA, en entrevista con el autor, 2015.

JOHNSSON, Helena y MEILING, John. Defects in offsite construction: timber module prefabrication. Construction Management and Economics, 27(7): 667-681. 2009.

KAUFMANN, Michelle y REMICK, Catherine. Prefab Green. California, Gibbs Smith, 2009.

KOONES, Sheri. Prefabulous World: Energy-Efficient and Sustainable Homes Around the Globe. Estados Unidos, Abrams, Edición 2010. 2010.

KOSKELA, Lauri. Application of the new production philosophy to construction. Center for integrated facility engineering. Technical Report (72): 1-71, septiembre, 1992.

KOSKELA, Laury, y HOUVILLA, P. On Foundations of Concurrent Engineering. En: 1st Int. Conf. Concurrent Engineering in Construction (1997, Inglaterra), The Institution of Structural Engineers, Londres, 1997.

LEGMPELOS, Nikolaos. On-site construction versus prefabrication. Tesis (Master of Engineering in Civil and Environmental Engineering). Massachusetts. MIT, Department of Civil and Environmental Engineering, 2013. 117 p.

LEICA Geosystems AG. Product Specification: Leica ScanStation P30/P40. [en línea] Leica Geosystems AG, 2015. <http://www.leica-geosystems.com/downloads123/hds/hds/general/brochures-datasheet/Leica_ScanStation_P30-P40_Civil_DS_en.pdf> [consulta: agosto 2015].

LEICA Geosystems AG. User manual: Leica Lino L360, L2P5, L2+, L2G+, L2, P5, P3. [en línea] Version 757665i, Leica Geosystems AG, 2014a. <http://w3.leica-geosystems.com/downloads123/zz/lasers/LineandDotLasers/manuals/Leica%20Lino%20MAN%201009%20757665b_en.pdf> [consulta: agosto 2015].

LEICA Geosystems AG. User Manual: Leica Rugby 870/880. [en línea] Version 1.0, Leica Geosystems AG, 2014b. <http://www.leica-geosystems.com/downloads123/zz/lasers/general/manuals/Leica_Rugby_870_880_UM_v1.0.0_en.pdf> [consulta: agosto 2015].

LESSING, Jerker. Industrialized house-building: Concept and Processes. Lund, Lund Institute of Technology, Suecia, 2006.

LIRA Teuber, Octavio. Gerente Sucursal Viña del Mar Soinsa S.A., en entrevista con el autor, 2015.

LOYOLA Andrade, René Francisco. Diseño por desempeño de un edificio de paneles insulated concrete form (ICF). Tesis (Magíster en Ciencias de la Ingeniería Civil). Valparaíso, Universidad Técnica Federico Santa María, Departamento de Obras Civiles, 2015.

LU, Na. Investigation of the Designers and General Contractors Perception of Offsite Construction Techniques in the United States Construction Industry. Clemson SC. Clemson University, Department of Career and Technology Education (81), 2007.

MAGEE, David. 30-Story Building Built in 15 Days: China's Unique Construction. [en línea] International Business Times. 7 de enero, 2012. <http://www.ibtimes.com/30-story-building-built-15-days-chinas-unique-construction-video-392516> [consulta: agosto 2015].

McGRAW-HILL Construction. Prefabrication and Modularization: Increasing Productivity in the Construction Industry. SmartMarket Report, Massachusetts, Estados Unidos. 2011.

MINISTERIO de Obras Públicas (MOP). Manual de Autorizaciones Para Transportes Especiales. Santiago, Dirección de Vialidad del Ministerio de Transportes de Chile, septiembre 2014. 70 p.

MODULAR Building Institute (MBI). LEED Platinum SoMa Studios On the Cutting Edge of Urban Prefab. [en línea] <http://www.modular.org/HtmlPage.aspx?name=LEED_Urban_Prefab_SoMa> [consulta: agosto 2015].

MODULAR Building Institute (MBI). Permanent Modular Construction 2011: Annual Report. [en línea] The Modular Building Institute. Charlottesville (Estados Unidos) 2011. <http://www.modular.org/documents/document_publication/2011permanent.pdf> [consulta: julio 2015].

MODULAR Prefabricated Residential Construction: Constrains and Opportunities por Rahman Azari [et al.]. PNCCRE Technical Report #TR002 (2), University of Washington, Seattle, 2013. 85 p.

MOMENTA. Proyectos. [en línea] <http://www.momenta.cl/#!proyectos-ing-y-construccion/c229p> [consulta: julio 2015].

MOON, Sungkon, ZEKAVAT, Payam, y BERNOLD, Leonhard. Dynamic Control of Construction Supply Chain to Improve Labor Performance. Journal of Construction Engineering and Management (ASCE), 141(6), enero 2015.

MORALES, Cristian. Jefe de Producción e Instalaciones de Aluvima Estructuras LTDA, en entrevista con el autor, 2015.

MURPHY, Andrea. 2015 Global 2000: The World's Biggest Auto Companies. [en línea] Revista Forbes, 6 de mayo del 2015. <http://www.forbes.com/sites/andreamurphy/2015/05/06/2015-global-2000-the-worlds-biggest-auto-companies/#589567cd6e48> [consulta: julio 2015].

OVERCOMING client and market resistance to prefabrication and standardization in housing por Anthony Craig [et al.], Aberdeen. Robert Gordon University, Escocia, 2002.

PANORAMIC Interests. Citytspaces 38. [en línea] < http://www.panoramic.com/cityspaces-location/soma-san-francisco/> [consultada: agosto 2015].

PÁVEZ, Alejando. Necesidad Constructiva: Industrialización en la Construcción. [en línea] Revista BIT noviembre 2012. (87): 18-26. <http://www.sirve.cl/wp-content/uploads/Prefabricados-BiT-Noviembre.pdf> [consulta: agosto del 2015].

PERI Chile LTDA. Encofrado modular DOMINO. [en línea] <http://www.peri.cl/productos.cfm/fuseaction/showproduct/product_ID/28/app_id/2.cfm> [consulta: mayo 2016a].

PERI Francia. TRIO: Le coffrage cadre le plus coté au monde. [en línea] <http://www.peri.fr/produits.cfm/fuseaction/showproduct/product_ID/43/app_id/0.cfm> [consulta: julio 2016b].

PICKERELL, Boyd. Modular apartment building on the rise. [en línea] Seattle Daily Journal of Commerce. 28 de junio, 2012 <http://www.djc.com/news/re/12042419.html?query=boyd+pickrell&searchtype=all> [consulta: agosto 2015].

PLUBINS Canessa, Daniel Alejandro. Conexiones Sismoresistentes Viga-Columna en Elementos Prefabricados de Hormigón. Tesis (Ingeniero Civil). Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2008. 128 p.

PONTIFICIA Universidad Católica de Valparaíso (PUCV). Conjuntos habitacionales KPD, V Región. [en línea] Escuela de Arquitectura y Diseño de la Universidad Católica de Valparaíso. Abril, 2014. <http://wiki.ead.pucv.cl/index.php/Conjuntos_Habitacionales_KPD,_V_Región> [consulta: julio 2015].

PREFABRICATION and preassembly trends and effects on the construction workforce por Carl Hass [et al.]. Reporte (14), 2000.

PRODUCTIVITY Commission NZ. Housing Affordability Enquiry – Final Report. Wellington, The Productivity Commission of the Nez Zealand Government, 2012. [en línea] <http://www.productivity.govt.nz/sites/default/files/Final%20Housing%20Affordability%20Report_0.pdf> [consulta: agosto 2015].

REAL Academia Española. Diccionario de la lengua española. [en línea] <http://dle.rae.es> [consulta: mayo 2016]

RIQUELME, Victor. Gerente de Administración y Operaciones de Aluvima Estructuras LTDA, en entrevista con el autor, 2016.

ROBICHAUD, François, LAVOIE, Patrick y GASTON, Christopher. Wood Opportunities for Manuactures Housing and Structural Components. Canadá, Forintek Canada Corporation, 2005. 24 p.

ROGOFF, Marc J., y WILLIAMS, John F. Approaches to implementing solid waste recycling facilities. Park Ridge NJ, William Andrew, 1994.

ROSENBAUM, Sergio. Aplicación de mapeo de cadenas de valor para la detección de pérdidas productivas y medioambientales en la construcción: estudio de caso en obra "Clínica Universidad de los Andes". Tesis (Ingeniero Civil). Santiago. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2012. 128 p.

SARTORIUS intec. PR 6251 PanCake® Level Sensor. [en línea] <http://www.sartorius-intec.com/fileadmin/fm-dam/sartorius_mediathek/Industrial-Weighing/DataSheets/English/PR/DS_PR6251_Pancake_e.pdf> [consulta: diciembre 2015].

SCHAEVITZ Sensors. HR Series: General Purpose LVDT. [en línea] <https://www.cdiweb.com/datasheets/schaevitz/HR-Series.pdf> [consulta: diciembre 2015].

SCHOENBORN, Joseph. A case study approach to identifying the constraints and barriers to design innovation for modular construction. Tesis (Master of Science in Architecture). Blacksburg VA. Virginia Polytechnic Institute and State University, 2012. 155 p.

SCOFIELD, Rosemary, WILKINSON, Suzanne, POTANGAROA, Regan y ROTIMI, Funmi. Driving innovative offsite construction techniques in New Zealand. En: Construction Conference in Loughborough University (2009, Reino Unido). Loughborough, Global Innovation, UK. 2009. 12 p.

SERVICIO de Impuestos Internos (SII). Valor U.F. 2016. [en línea] <http://www.sii.cl/pagina/valores/uf/uf2016.htm> [consulta: septiembre 2016].

SHAHZAD, Wajiha M. Offsite manufacturing as a means of improving productivity in New Zealand construction industry: key barriers to adoption and improvement measures. Tesis (Masters of Construction Management). Albany. Massey University, College of Sciences, Nueva Zelanda, 2011. 114 p.

SIX SIGMA: A goal-theoretic perspective por Kevin Linderman [et al.]. Journal of Operations management, 21(2): 193-203, marzo 2003.

SMITH, Ryan. Prefab architecture: A guide to modular design and construction. Estados Unidos, John Wiley & Sons, 2011. 400 p.

SOINSA S.A. Metriform sistema de paneles. [en línea] <http://www.soinsa.cl/content/muro-metriform-24072015084510.pdf> [consulta: mayo 2016].

SUPERINTENDENCIA de Seguridad Social (SUSESO). Estadísticas de accidentabilidad 2013. Santiago, Superintendencia de Seguridad Social, 2014.

TAM, V.W., TAM, C.M., ZENG, S.X. y NG, W.C. Towards adoption of prefabrication in construction. Building and environment, 42(10): 3642-3654, 2007.

TECNO Fast. Campamento 2.000 - Doña Inés de Collahuasi. [en línea] <http://www.tecnofast.net/productos/campamento-2000-antofagasta-chile/> [consulta: julio 2015b].

TECNO Fast, Campamento 5.400 – Minera ESCONDIDA Chile. [en línea] <http://www.tecnofast.net/productos/campamento-5-400-minera-escondida-chile/> [consulta: julio 2015a].

VALENZUELA G., Juan. Profesor del Departamento de Obras Civiles, UTFSM, en correspondencia con el autor, 2016.

WING, Robert, y ATKIN, Brian. FutureHome: A Prototype for Factory Housing. NIST special publication SP: 173-178, 2003.

WOMACK, James y JONES, Daniel. Lean Thinking: Banish waste and create wealth in your organization. Estados Unidos, Rawson & Associates, 1996. 350p.

WOMACK, James, JONES, Daniel y ROOS, Daniel. The machine that changed the world. Estados Unidos, Scribner, 1990. 336 p.

WONG, R., HAO, J.L. y HO, C.M. Prefabricated building construction systems adopted in Hong Kong. En: Word Congress of Housing: Process and Product (2013, Canadá), International Association for Housing Science, Montreal, 2013.

YUN, Jong-Yong y CHUA, Richard. Samsung uses Six Sigma to change its image. Six Sigma Forum Magazine, 2(1): 13-16, noviembre 2002.

ZHANG, Jing, EASTHAM, Danelle y BERNOLD, Leonhard. Waste-Based Management in Residential Construction. Journal of Construction Engineering and Management (ASCE), 131(4): 423-430, abril 2015.

ANEXO A – LÁSERES PARA LA CONSTRUCCIÓN

En el presente anexo se presentan diversos dispositivos laser diseñados para ser empleados en la construcción, los cuales pueden permitir generar feed-forward al ser usados, por ejemplo, durante la instalación del encofrado, donde a través de mediciones es posible detectar errores antes del vertido del hormigón, con la gran ventaja de permitir tomar acciones correctivas simples, como ajustar paneles de moldaje o el largo de los puntales, en vez de picar, rellenar con mortero e incluso demoler los elementos de hormigón una vez el error ya se cometió.

Por otra parte, y tal como el mecanismo de control de James Watt para las máquinas a vapor, los láseres permiten controlar deformaciones, rotaciones y desplazamientos del encofrado en tiempo real durante el vertido del hormigón, generando la información necesaria para tomar acciones correctivas, como un tipo de feed-back.

Distanciómetro láser

Es una herramienta electrónica para medir distancias en línea recta desde el aparto, hasta el punto de intersección del rayo láser con un objeto reflectante. El principio de funcionamiento más común es en base al tiempo de vuelo, donde se emite un pulso láser en un rayo estrecho hacia el objeto midiendo el tiempo que le toma al pulso rebotar y retornar al emisor.

Algunos distanciómetros incluyen funciones para medir áreas y volúmenes de una habitación, como el de la Figura 47a, así como algunos más modernos permiten además realizar mediciones indirectas al incluir un sensor de ángulo y una microcomputadora con funciones trigonométricas, como el de la Figura 47b.

(a) (b)

Figura 47: Distanciómetros laser: (a) Bosch PLR 25; (b) Hilti PD-E

La precisión típica de las versiones modernas de las herramientas en cuestión es de ±1 [mm], con una distancia de medición máxima de 200 metros (Hilti Corp., 2013a: p. 79).

Láseres para nivelación

Son herramientas mediante las cuales una sola persona puede aplomar, nivelar en horizontal y realizar trabajos de alineación, entre otros. Existen principalmente de dos tipos; los láseres combinados y los rotativos.

Los láseres combinados son aquellos que poseen un haz en un plano horizontal y otro en el vertical, proyectando rectas al intersectar con un objeto. Típicamente son para ser empleados en interiores, debido a que, a mayor luminosidad ambiental, se hace más difícil la detección de las rectas proyectadas.

Adicionalmente, los modernos son autonivelantes (Hilti Corp., 2013b: p. 12; Leica Geosystems AG, 2014a: p. 5) y tienen un rango de hasta 30 metros, dependiendo de la luminosidad. Ejemplos de éstas herramientas son mostrados en la Figura 48.

(a) (b)

Figura 48: (a) Hilti PMC 46; (b) Leica Lino L2P5.

Los láseres rotativos son aquellos que proyectan un plano en 360º, a diferencia los láseres combinados que proyectan los planos hacia delante de donde se orienta la herramienta. Su principio de funcionamiento se basa en un láser que es reflejado por un espejo que rota, trazando rectas con los objetos que se intersectan con el plano del haz láser. Algunos permiten orientarlos en planos inclinados, e incluso, de costado para proyectar un plano vertical.

Algunos láseres rotativos modernos cuentan con nivelación automática electrónica, y poseen un alcance que va de los 300 metros en el caso del Hilti PRI 36, Figura 49a (Hilti Corp., 2014: p. 5), hasta 1.100 metros en el caso del Leica Rugby 880 (Leica Geosystems AG, 2014b: p.66), Figura 49b.

(a) (b)

Figura 49: (a) Hilti PRI 36; (b) Leica Rugby 880

LIDAR

El nombre LIDAR es un acrónimo del inglés *Laser Imaging, Detection And Ranging* o *Light Detection And Ranging*, el cual es un sistema para medir la posición de una nube de puntos, a lo que se denomina escaneo espacial en alta definición (HDS del inglés *High Definition Scanning*). En general, tiene aplicaciones en geología, geomática, sismología, construcción, entre otros.

Hay diferentes tipos de escáner, pero todos los de interés en la presente memoria se basan en el principio de funcionamiento de un pulso láser que mide la distancia, de la misma manera que los presentados al comienzo de este Anexo, pero a la vez el emisor rota en los ejes vertical y horizontal registrando los ángulos con alta precisión. De esta manera, a cada punto al cual se le mide la distancia, se le asocia un ángulo horizontal y uno vertical, con lo que se calcula su posición espacial en ejes cartesianos, dando origen a una nube de puntos.

Al realizar el post-procesamiento con un software, se permite la visualización en 3D de la nube de puntos. Adicionalmente, algunos HDS permiten agregar las texturas automáticamente a la representación, al incluir una cámara fotográfica. De esta manera se pueden generar imágenes computacionales similares a las de *Google Street View*, en las cuales se pueden medir las distancias reales entre lo que representa cada pixel.

Para efectos de la construcción, pueden ser altamente útiles ya que permiten conocer con precisión la estructura as-built, la inspección técnica sin la necesidad de las constantes visitas a terreno, realizar una topografía de alta precisión, así como también ahorraría campañas de medición y sus inherentes errores a los productores de elementos prefabricados hechos a la medida.

A su vez, con el software de post-procesamiento se pueden obtener planos de planta y elevaciones, imágenes panorámicas que permiten medir las distancias reales entre cada pixel, distancias punto a punto y punto a superficie, secciones y perfiles al hacer cortes, se pueden realizar cálculos de volúmenes, planos topográficos avanzados, y además es posible su asociación con el BIM, entre otras aplicaciones.

La precisión de estas herramientas es altamente variable con el modelo y la marca, ya que viene dado por dos componentes; la precisión del láser para medir la distancia, así como la del instrumento para medir los ángulos horizontales y verticales. Por lo tanto, según señala Walsh (2015), la incertidumbre de una medición viene dada por la diagonal de un paralelepípedo determinado por la incerteza en la vertical, la incerteza en la horizontal, y la incerteza en la distancia.

Un ejemplo de LIDAR moderno indicado para ser empleado en la construcción, es el Leica ScanStation P40, mostrado en la Figura 50. Sus principales características técnicas son las se resumen en la Tabla 19:

Tabla 19: Principales características LIDAR Leica ScanStation P40 (Leica Geosystems AG, 2015)

Precisión en la distancia	1.2 [mm] + 10 [ppm] de la distancia
Precisión angular:	8 arco-segundos en la horizontal y vertical
Precisión en la posición 3D:	3 [mm] a 50 [m]; 6 [mm] a 100 [m]
Distancia máxima:	Variable con la reflectividad; 270 [m] con una reflectividad del 34%.
Tasa de escaneo:	1.000.000 de puntos por segundo

Figura 50: LIDAR moderno; Leica P40 (Leica Geosystems AG, 2015)

ANEXO B – ENCOFRADOS

El presente anexo trata acerca de aspectos relevantes del encofrado para efectos de esta memoria, el cual también es denominado moldaje, a pesar de que dicha palabra no se encuentra en el diccionario de la lengua española (Real Academia Española, 2016). De acuerdo a la *Guide to formwork for concrete* del ACI 347 (2004), se define como el sistema de soporte completo para el hormigón recién colocado, incluidos los moldes o revestimientos que hacen contacto con el hormigón y todos los miembros de apoyo, accesorios, y soportes necesarios.

Según Bernold (2013: p. 443), el éxito del hormigón como uno de los materiales preferidos en la construcción del siglo veinte, está directamente relacionado con el encofrado económico y de alta calidad. Inclusive, de acuerdo al informe de productividad del CDT (2013), su importancia es tal que el moldaje es la partida que marca el ritmo de la obra gruesa, y en una obra bien administrada, del proyecto en general. Por otra parte, como indica el ACI 347 (2004), el costo del encofrado en los Estados Unidos puede ser tanto como el 60% del costo total de la estructura de hormigón terminada, e incluso más. Por las tres razones recién mencionadas, el uso correcto del encofrado es fundamental para las obras de hormigón, lo cual guarda relación con una de las causas del problema que aborda esta memoria.

En esta subsección, en primer lugar, se presentan brevemente los tipos de encofrados en general, para posteriormente enfocarse en aspectos de gran relevancia para los efectos de esta memoria; las fórmulas empleadas para el diseño de moldaje de muros, y la modulación de sus moldes o paneles disponibles localmente en Chile.

Tipos de encofrados

La literatura ofrece una gran cantidad de formas de agrupar los encofrados, por ejemplo, según el material del cual están hechos, su lugar de fabricación, el tamaño de los elementos, entre otros. En la presente memoria se presentan dos clasificaciones. La primera, es la que utiliza Bernold (2013), y que es en base a la tecnología predominante del encofrado. Esta clasificación es presentada en la Tabla 20, donde cabe resaltar que, cada una de las cinco tecnologías predominantes puede ser usada en más de un área de aplicación, como muros, columnas, etc.

Tabla 20: Clasificación del encofrado según su tecnología (Bernold, 2013: p. 443)

Tecnología del encofrado	Características principales
1. Tradicional cortado a la medida	Predominante hasta la década de 1970 y muy flexible. Los moldes son conformados por cortes y uniones de madera. Aún son empleados actualmente donde otros sistemas no se acomodan al diseño.
2. Modular	Módulos prefabricados de pequeños y grandes paneles reutilizables, que incluyen la estructura de soporte necesaria. Proporcionados en varios tamaños, los paneles son unidos para formar mesas o muros, mediante una serie de accesorios.
3. Mecanizado o trepante	Encofrado prefabricado que cuenta con un sistema mecánico, el cual le permite moverse de forma propia desde una posición de vertido, a la siguiente.
4. Permanente	Consiste en paneles prefabricados hechos de diferentes materiales desechables, capaces de soportar el hormigón fresco. Posterior al fraguado del hormigón, los paneles no son removidos, quedando en el lugar de forma permanente.
5. De acero prefabricado	Sistema de moldes fijos pero flexibles, que son reutilizables y hechos de acero.

La segunda clasificación presentada, es la más comúnmente utilizada por parte de los fabricantes de encofrados, la cual es en base al peso de los elementos, puesto que determina la necesidad de ocupar grúa para la colocación y el descimbre (CDT, 2013). En función de ello, se distinguen tres tipologías:

- Manual: Elementos de pequeñas dimensiones que pueden ser transportados y montados manualmente por los trabajadores.
- Semitransportable: Elementos de dimensiones pequeña y mediana, con pesos variables, que pueden ser transportados por los trabajadores, o bien ser apoyados con equipos auxiliares de levante.
- Pesados: Elementos de grandes dimensiones, que sólo pueden ser instalados con el apoyo permanente de la grúa.

Diseño del encofrado de muros

Las normas que regulan estos encofrados son el ACI 347-04 para los Estados Unidos, mientras que para Europa es la DIN 18202. En la presente subsección se consideran las directrices de acuerdo a la norma del país americano, empleando las ecuaciones en el sistema internacional de unidades.

Cargas – Presión lateral del hormigón

El encofrado debe ser diseñado para la presión lateral del hormigón fresco, de acuerdo a la siguiente fórmula (ACI 347, 2004):

$$p = \rho g h \ \ [Pa]$$

Donde:

$p =$ Presión lateral, [Pa]
$\rho =$ Densidad de la mezcla, [kg/m^3]
$g =$ Constante gravitacional, 9,81 [m/s^2]
$h =$ Profundidad del hormigón en estado líquido, [m]

Esta fórmula corresponde a la presión hidrostática considerando la columna de hormigón fresco completamente líquida. No obstante, producto del endurecimiento del hormigón que ocurre durante el tiempo de vertido, bajo ciertas condiciones se pueden utilizar fórmulas que resultan en una presión reducida. Para más información, refiérase a la página 7 del ACI 347 (2004).

Accesorios

Para efectos de la presente memoria, se consideran el punto 2.4 del ACI 347-04, el cual explicita los factores de seguridad para los accesorios, los cuales se listan en la Tabla 21:

Tabla 21: Factores de seguridad mínimos para accesorios de encofrados (De la Tabla 2.3 ACI 347 (ACI, 2004))

Accesorio	FS	Tipo de construcción
Barras de anclaje	2,0	Todas las aplicaciones
Anclaje de panel	2,0 3,0	Encofrado que solamente soporta el peso de los paneles y la presión del hormigón Encofrado que soporta el peso de los paneles, hormigón, cargas vivas de construcción, e impactos
Puntos de izaje de paneles	2,0	Todas las aplicaciones
Anclajes embebidos empleados como barras de anclaje	2,0	Para paneles de hormigón prefabricados, cuando son usados como encofrado

*Los factores de seguridad se basan en la resistencia última del accesorio nuevo

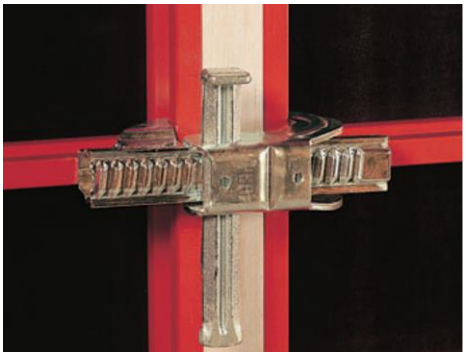
Modulación de los paneles de muro

La modulación de los paneles del encofrado, se refiere a las distintas combinaciones de ancho y alto ofrecidas por sus proveedores. Como en esta memoria es de interés la geometría de los vanos en edificios habitacionales, la cual es típicamente determinada por las longitudes de las secciones de muros, en esta subsección se presentan los distintos anchos de paneles disponibles para su construcción, con dos consideraciones. La primera, es que se considera un alto único de panel, el cual se selecciona como el más similar a la altura típica de entre pisos utilizada en Chile, la cual corresponde a aproximadamente 2,40 metros. La segunda, es que solamente se consideraron las líneas de paneles modulares livianos para edificación en altura, de tres grandes proveedores de encofrados establecidos en Chile. En base a ambas consideraciones, los detalles y los anchos se presentan en la Tabla 22 a continuación:

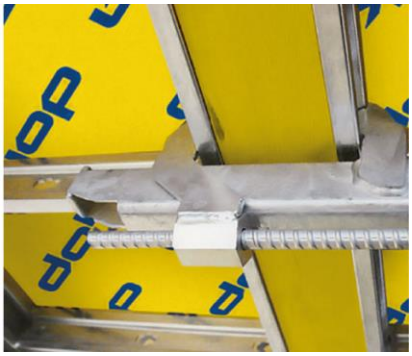
Tabla 22: Algunos de los diferentes tamaños de los paneles para muros ofrecidos actualmente en Chile

Empresa proveedora	**Peri (2016a)**	**Doka (2016a)**	**Soinsa (2016)**
Línea del encofrado	Domino	Frami X-life	Metriform
Alto [m]	2,50	2,70	2,40
Anchos [m]	0,25; 0,50; 0,75; 1,00	0,30; 0,45; 0,60; 0,75; 0,90	0,30; 0,60

En base a los anchos presentados en la Tabla 22, si se considera construir una sección de muro con una longitud de, por ejemplo, 1,10 metros, con ninguna combinación de los tres proveedores es posible de lograr. Para solucionar esta situación, dependiendo del tipo de cerrojo empleado para la unión de los paneles, es posible colocar un perfil de madera entre dos paneles, el cual funciona como un espaciador según se muestra en la Figura 51:



(a)



(b)

Figura 51: Sistemas de compensación basados en perfil de madera entre dos paneles: (a) Peri; (b) Doka

ANEXO C – MEDICIONES VANOS EN CONSTRUCCIÓN

En este Anexo se presentan las medidas directas de vanos en construcción, para dos pisos completos (21 y 22) y para un mismo ventanal en 7 pisos consecutivos (16 al 22).

Proyecto	Edificio V región	Fecha	30 de julio, 2015
Día		Tiempo	
Actividad	Dimensiones vanos	Temperatura	

Id. vano			Medición dimensiones (arriba hacia abajo, izquierda a derecha) [m]							
Piso	Depto	Tipo de rasgo	U→	M→	L→	L↑	C↑	R↑	↗	↖
22	1	Ventanal 1	4,488	4,481	4,470	2,175	2,188	2,196	4,956	4,937
22	1	Ventana 1	4,369	4,395	4,379	1,705	1,639	1,703	4,686	4,667
22	1	Ventana 2	2,493	2,488	2,484	1,698	1,703	1,661	2,985	2,953
22	1	Ventana 3		2,998	2,993	1,682	1,706	1,669	3,393	3,403
22	1	Ventanal 2	6,443	6,494	6,484	2,176	2,198	2,182	6,812	6,785
22	2	Ventanal 1	7,720	7,758	7,740	2,178	2,188	2,185	8,030	8,003
22	3	Ventanal 1	4,960	5,002	4,989	2,174	2,175	2,185	5,400	5,411
22	4	Ventanal 1	6,003	6,042	6,034	2,175	2,180	2,164	6,372	6,381
22	4	Baño 1	0,729	0,729	0,729	0,705	0,709	0,708	0,990	0,983
22	4	Ventana 1	3,813	3,812	3,798	1,690	1,702	1,710	4,153	4,127
22	4	Ventanal 2	6,338	6,319	6,386	2,173	2,814	2,179	6,718	6,690
21	1	Ventanal 1	4,493	4,493	4,495	2,194	2,216	2,205	4,982	4,977
21	1	Ventana 1	4,401	4,397	4,385	1,712	1,708	1,705	4,688	4,692
21	1	Ventana 2	2,510	2,510	2,499	1,697	1,709	1,692	2,986	2,973
21	1	Ventana 3	3,021	3,017	3,013	1,704	1,693	1,709	3,149	3,429
21	1	Ventanal 2	6,489	6,495	6,486	2,196	2,205	2,197	6,785	6,821
21	2	Ventanal 1	7,710	7,773	7,769	2,180	2,174	2,173	8,038	8,011
21	3	Ventanal 1	4,970	4,994	4,996	2,177	2,183	2,160	5,401	5,421
21	4	Ventanal 1	5,982	6,028	6,030	2,179	2,185	2,179	6,386	6,357
21	4	Baño 1	0,732	0,740	0,738	0,726	0,722	0,723	1,003	1,010
21	4	Ventana 1	3,825	3,824	3,819	1,732	1,673	1,712	4,169	4,163
21	4	Ventanal 2	6,341	6,361	6,366	2,177	2,197	2,181	6,694	6,705
20	3	Ventanal 1	5,006	5,004	4,991	2,203	2,208	2,196	5,431	5,347
19	3	Ventanal 1	4,976	4,978	4,974	2,104	2,108	2,108	5,380	5,381
18	3	Ventanal 1	4,990	4,990	4,982	2,106	2,107	2,099	5,377	5,389
17	3	Ventanal 1	4,987	4,986	4,983	2,100	2,102	2,097	5,387	5,384
16	3	Ventanal 1	4,980	4,985	4,981	2,101	2,100	2,101	5,380	5,388

Leyenda

- Placa de panel fenólico incrustado, de espesor 2 cm
- Placa de panel desplazada, o montículo de hormigón
- Incluye terminaciones gruesas

ANEXO D – COTIZACIÓN CERROJO DOMINO DRS

PERI

PERI CHILE ENCOFRADOS Y ANDAMIOS LIMITADA

Giro : Arriendo y Ventas de Moldajes para la Construcción
Dirección : General Jose de San Martin104, Parque Industrial Los Libertadores - Colina -
Teléfono : [56-02] 444-6000 Fax [56-02] 444-6001
Sucursales : Av. Pedro Aguirre Cerda 14200, La Chimba - Antofagasta
Avenida General Bonilla 2750 Sector Palomares - Concepción

R.U.T.: 78.874.090-5

FACTURA ELECTRONICA

Nº 603.770

S.I.I. SANTIAGO ORIENTE

SEÑOR(ES)	: UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA	FECHA EMISIÓN	: 13/10/2015
R.U.T	: [redacted]	FECHA VENC.	: 13/10/2015
DIRECCIÓN	: AV. ESPAÑA 1680	CLIENTE	: 103573
GIRO	: UNIVERSIDADES	PROJECT Nº	: 32084/001 MUESTRA
COMUNA	: VALPARAISO	VENDEDOR	FABIOLA FUENTES
CIUDAD	: VALPARAISO	NUMERO INTERNO	20047157

Documento	Folio	Fecha	Razón de Referencia
Guia de Despacho	203127	13-10-2015	

CANTIDAD	CODIGO	DETALLE	PRECIO UNIT.	TOTAL
3 UD	066080	CERROJO DOMINO DRS	26.877	80.631
		DESPACHO CON NO. INTERNO : 428150 NO.BODEGA 1100 DEL 2015-10-13		

SON : NOVENTA CINCO MIL NOVECIENTOS CINCUENTA UN PESOS

CONDICIONES :
CANCELADO

_____ de _____ de _____

MONTO NETO	80.631
MONTO EXENTO	
MONTO I.V.A19%	15.320
MONTO TOTAL	95.951

Pagos via transferencias electronicas:
Banco Santander: Cta. Cte.Nº 02-84297-1
Banco Chile: Cta. Cte. Nº 187-02417-00

Timbre Electrónico SII
Res. 8 del 2012-01-17
Verifique este documento en www.sii.cl

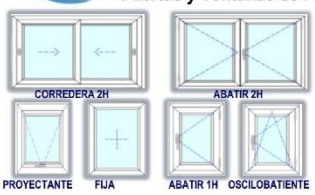
ANEXO E – DETERMINACIÓN PRECIO UNITARIO VENTANA EN LA V REGIÓN

En primer lugar, se presentan las tres cotizaciones utilizadas. En cada una se destaca con rojo las que se seleccionan para el precio por m^2 de puerta-ventana instalada. El criterio de selección es que sean correderas deslizantes horizontales.

Cotización 1:

Windows Total
Puertas y Ventanas de PVC

COTIZACION N° 2341C
30 de octubre de 2015



Empresa	[redacted]	E-Mail	[redacted]
Contacto		Celular	
Dirección		Fijo	

De acuerdo a su requerimiento, detallamos cotización solicitada:

PVC LINEA EUROPEA											COLOR BLANCO	
Item	Código	Ubicación	Cantidad	Descripción	Medidas Ancho	Medidas Alto	Tipo	Cristal Espesor	m2	Precio Unitario	Total
1	V1	Sala Juegos	1	2 Proyectantes + 1 Fijo Inferior ***	1965	1770	TP	Inc4+12+Inc5 mm	3,48	543.000	543.000
2	V2	Comedor	1	Proyectante+Pilar+Fijo+Pilar+Proyectante	3880	1770	TP	Inc4+12+Inc5 mm	6,87	530.000	530.000
3	V3	Comedor	1	Proyectante	410	1770	TP	Inc4+12+Inc5 mm	0,73	110.000	110.000
4	V4	Cocna Frente	1	Corredera 2HM ***	1950	1360	TP	Inc4+12+Inc5 mm	2,65	412.000	412.000
5	V5	Cocina	1	Proyectante ***	1045	1360	TP	Inc4+12+Inc5 mm	1,42	218.000	218.000
6	V6	Living	1	Corredera 2HM ***	1940	2290	TP	Inc4+12+Inc5 mm	4,44	624.000	624.000
7	V7	Living	1	Corredera 2HM ***	2005	2300	TP	Inc4+12+Inc5 mm	4,61	637.000	637.000
8	V8	Living	1	Fijo ***	1940	2170	TP	Inc4+12+Inc5 mm	4,21	431.000	431.000
9	V9	Living	1	Fijo ***	2005	2170	TP	Inc4+12+Inc5 mm	4,35	442.000	442.000
10	V10	Living	1	Proyectante ***	1500	1370	TP	Inc4+12+Inc5 mm	2,06	288.000	288.000
11	V11	Oficina	1	Proyectante ***	1040	1390	TP	Inc4+12+Inc5 mm	1,45	221.000	221.000
12	V12	Baño Visita	1	Proyectante	590	770	TP	Emp4+12+Inc5 mm	0,45	98.000	98.000
13	V13	Baño Dorm Visita	1	Proyectante	610	770	TP	Emp4+12+Inc5 mm	0,47	99.000	99.000
14	V14	Dorm Visita	1	Proyectante ***	1530	1380	TP	Inc4+12+Inc5 mm	2,11	284.000	284.000
15	V15	Dorm Ppal	1	Fijo+Pilar+Proyectante+Pilar+Fijo	4740	1480	TP	Inc4+12+Inc5 mm	7,02	515.000	515.000
15	V16	Baño Ppal	1	Corredera 2HM	1800	760	TP	Inc4+12+Inc5 mm	1,37	222.000	222.000
15	V17	Baño Piso 2	1	Proyectante	880	770	TP	Emp4+12+Inc5 mm	0,68	118.000	118.000
15	V18	Baño Piso 2	1	Proyectante	880	870	TP	Emp4+12+Inc5 mm	0,77	125.000	125.000
15	V19	Dorm 1	1	Proyectante	1520	1540	TP	Inc4+12+Inc5 mm	2,34	202.000	202.000
15	V20	Dorm 2	1	Proyectante	1530	1540	TP	Inc4+12+Inc5 mm	2,36	203.000	203.000
15	V21	Dorm 3	1	Proyectante	1540	1540	TP	Inc4+12+Inc5 mm	2,37	204.000	204.000
15	V22	Estudio	1	Proyectante	600	900	TP	Inc4+12+Inc5 mm	0,54	100.000	100.000
16	V23	Bodega	2	Proyectante	400	400	TP	Emp4+12+Inc5 mm	0,32	68.000	136.000
17	V24	Estacionamiento	1	Fijo	400	400	TP	Inc4+12+Inc5 mm	0,16	38.000	38.000
18	V25	Pasillo	1	Proyectante ***	890	1390	TP	Inc4+12+Inc5 mm	1,24	196.000	196.000
			26	ELEMENTOS					58,45	NETO	6.996.000
										I.V.A.	1.329.240
										TOTAL	8.325.240

OBSERVACIONES
Sin Desintalación
Códigos V1-V4-V5-V6-V7-V8-V9-V10-V11-V14-V25 *** Con Palillaje Horizontal y Vertical por confirmar

CON	NETO	8.398.738
LAMINA	I.V.A.	1.595.760
DE SEGURIDAD	TOTAL	9.994.498

Se considera rectificación de medidas, instalación y traslado de elementos en V Región - Peñablanca

VALIDEZ DE LA COTIZACION 15 días hábiles - FABRICACION 20 días hábiles - INSTALACION 05 días hábiles

CONDICIONES DE PAGO 50% Anticipo para Ingreso a Fabricación - 50% Saldo Contra Entrega Conforme

TRANSFERENCIA Bci **CUENTA VISTA N° 69465924** **LUIS MARCELO ESQUIVEL VASQUEZ C.I. 9.974.744-7**

GARANTIAS

La poliza de garantia cubrirá por 5 años las siguientes partes y/ó piezas de las Ventanas y Puertas de PVC

PERFILES DE PVC
Se incluye en la garantia condiciones normales de temperatura, desformación, desoldaduras y descoloracion del PVC.
No se incluye en la garantia daños por golpes, rallas y perforaciones posterior a la instalación.
DVH - VIDRIOS
Incluye en en la garantia en caso de aparición de húmedad y/ó manchas por dentro viéndose comprometida la pérdida de Hermeticidad. **Todos llevan Gas Argón.
No se incluye en la garantia daños por golpes , rallas, manchas y quiebres posterior a la instalación.
QUINCALLERIA
Incluye en la garantia un adecuado funcionamiento en conjunto con la totalidad de sistemas de cierre, carros, manillas, bisagras y en condiciones normales de salinidad.
No se incluye en la garantia mal uso originado por rupturas o forzamiento de los accesorios. **Marca Alemana Sigenia.
TRANSPORTE
Garantiza trayecto, carga , descarga asegurando que las ventanas lleguen a su destino sin quiebres, ralladuras y golpes.

Quedando a su disposición ante cualquier consulta adicional, le saluda atentamente,

L. Marcelo Esquivel V.
mesquivel@windowstotal.cl
(569) 89071542

Coronel 7655 Local 3 La Granja Santiago - (562) 226092756 - contacto@windowstotal.cl
www.windowstotal.cl

Cotización 2:

TERRAMAR LTDA.®

3 NORTE 1230 VIÑA DEL MAR F/Fax: (32) 297 0526 - 317 0796 / Fábrica: 2819612

E-mail : terramar@terramar.cl - feliperodriguezg@tie.cl Sitio Web : www.terramar.cl

Puertas y Ventanas de PVC
Tecnología Alemana

[redacted]

22.10.15

COTIZACION [S] 26867 página 1

Estimado Cliente:

Agradecemos su interés por nuestras Puertas y Ventanas fabricadas con perfiles de PVC marca DIMEX, y ALUPLAST, ambas línea EUROPEA.
Los herrajes y mecanismos de cierre son de origen Alemán marca G-U, Ferco, Roto y otros. Todos de gran duración, confortables y eficientes en sus funciones.

Nuestra Empresa cuenta con una Planta de 1200 m2. de superficie, maquinaria con tecnología Alemana, ubicada en la comuna de Concón, donde confeccionamos sus Puertas y Ventanas de PVC.

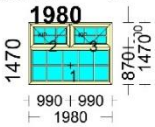
Los esquemas de las ventanas y puertas, son vistos DESDE ADENTRO DEL INMUEBLE (INTERIOR). Las ventanas se abaten hacia EL INTERIOR, con excepción de las ventanas proyectantes y las expresamente indicadas en este documento.

No se contempla la limpieza de ventanas y cristales, ni el retiro de la cinta protectora. Esta última no debe permanecer más de 20 días después de la instalación. Se incluye sello de silicona neutra solo por el exterior.

A continuación le detallamos la cotización por fabricación e instalación de Ventanas de PVC color Blanco, cristal Termopanel, para su obra ubicada en [redacted] fono:

COTIZACION [S] 26867 / **- página 2** 22.10.15

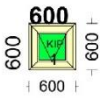
Item 1 **V1** **Medida: 1980 x 1470** **Cant. 1** **P.Unit. :** **395'694,00** **= $ 395'694,00**



Superior Izquierdo Proyectante, Superior Derecho fijo, inferior Fijo.
(V1) SALA DE JUEGOS

Vidrio	: Termop. 4+ 12+4 mm Incoloro
PVC Color	: Blanco
barrotillos int	: Palillaje interior blanco27 mm

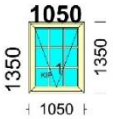
Item 2 **V2** **Medida: 600 x 600** **Cant. 2** **P.Unit. :** **83'269,00** **= $ 166'538,00**



Proyectante.
(V2) BAÑO 1º PISO

Vidrio	: Termop. 4+ 12+4 mm Esmerilado / Esmeri
PVC Color	: Blanco

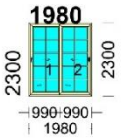
Item 3 **V3** **Medida: 1050 x 1350** **Cant. 1** **P.Unit. :** **188'678,00** **= $ 188'678,00**



Proyectante.
(V3) OFICINA

Vidrio	: Termop. 4+ 12+4 mm Incoloro
PVC Color	: Blanco
barrotillos int	: Palillaje interior blanco27 mm

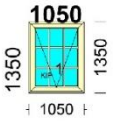
Item 4 **V4** **Medida: 1980 x 2300** **Cant. 2** **P.Unit. :** **662'038,99** **= $1'324'077,99**



Corredera,ambas hojas corren.
(V4) LIVING

Vidrio	: Termop. 4+ 12+4 mm Incoloro
PVC Color	: Blanco
barrotillos int	: Palillaje interior blanco27 mm

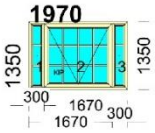
Item 5 **V5** **Medida: 1050 x 1350** **Cant. 1** **P.Unit. :** **188'678,00** **= $ 188'678,00**



Proyectante.
(V5) COCINA

Vidrio	: Termop. 4+ 12+4 mm Incoloro
PVC Color	: Blanco
barrotillos int	: Palillaje interior blanco27 mm

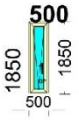
Item 6 **V6** **Medida: 1970 x 1350** **Cant. 1** **P.Unit. :** **344'481,00** **= $ 344'481,00**



Fijos laterales, proyectante al centro.
(V6) FRENTE COCINA

Vidrio	: Termop. 4+ 12+4 mm Incoloro
PVC Color	: Blanco
barrotillos int	: Palillaje interior blanco27 mm

Item 7 **V7** **Medida: 500 x 1850** **Cant. 2** **P.Unit. :** **132'576,00** **= $ 265'152,00**

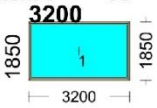


Proyectante.
(V7) LATERAL BO-WINDOW

Vidrio	: Termop. 4+ 12+4 mm Incoloro
PVC Color	: Blanco

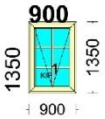
COTIZACION [S] 26867 / **- página 3** 22.10.15

Item 8 **V8** **Medida: 3200 x 1850** **Cant. 1** **P.Unit. :** **428'768,00** **= $ 428'768,00**



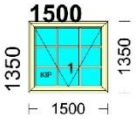
Fijo.
(V8) CENTRAL BO-WINDOW
Vidrio : Termop. 6+ 10+6 mm Incoloro
PVC Color : Blanco

Item 9 **V9** **Medida: 900 x 1350** **Cant. 1** **P.Unit. :** **183'024,00** **= $ 183'024,00**



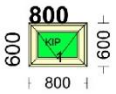
Proyectante.
(V9) PASILLO
Vidrio : Termop. 6+ 10+6 mm Incoloro
PVC Color : Blanco
barrotillos int : Palillaje interior blanco27 mm

Item 10 **V10** **Medida: 1500 x 1350** **Cant. 1** **P.Unit. :** **266'507,00** **= $ 266'507,00**



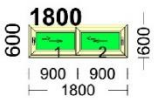
Proyectante.
(V10) PIEZA VISITA
Vidrio : Termop. 6+ 10+6 mm Incoloro
PVC Color : Blanco
barrotillos int : Palillaje interior blanco27 mm

Item 11 **V11** **Medida: 800 x 600** **Cant. 2** **P.Unit. :** **98'899,00** **= $ 197'798,00**



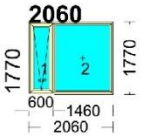
Proyectante.
(V11) BAÑO 2º PISO
Vidrio : Termop. 4+ 12+4 mm Esmerilado / Esmeri
PVC Color : Blanco

Item 12 **V12** **Medida: 1800 x 600** **Cant. 1** **P.Unit. :** **222'645,00** **= $ 222'645,00**



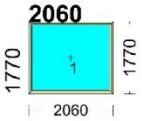
Corredera,ambas hojas corren.
(V12) BAÑO SUITE
Vidrio : Termop. 4+ 12+4 mm Esmerilado / Esmeri
PVC Color : Blanco

Item 13 **V13** **Medida: 2060 x 1770** **Cant. 1** **P.Unit. :** **305'087,00** **= $ 305'087,00**



Ventana proyectante izquierda más fijo derecho.
(V13) BO WINDOW SUITE
ES MUY ANCHA PARA HACER DE UNA SOLA HOJA PROYECTANTE (TRABAJARÁ MAL)
Vidrio : Termop. 4+ 12+4 mm Incoloro
PVC Color : Blanco

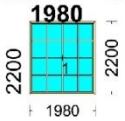
Item 14 **V14** **Medida: 2060 x 1770** **Cant. 1** **P.Unit. :** **233'535,00** **= $ 233'535,00**



Fijo.
(V14) BO-WINDOW SUITE
Vidrio : Termop. 5+ 10 +5 mm Incoloro
PVC Color : Blanco

COTIZACION [S] 26867 / **- página 4** 22.10.15

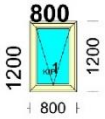
Item 15 **V15** **Medida: 1980 x 2200** **Cant. 2** **P.Unit. :** **337'437,00** **= $ 674'874,00**



Fijo.
(V15) LIVING 2º PISO

Vidrio	: Termop. 5+ 10 +5 mm Incoloro
PVC Color	: Blanco
barrotillos int	: Pailllaje interior blanco27 mm

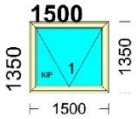
Item 16 **V16** **Medida: 800 x 1200** **Cant. 1** **P.Unit. :** **128'200,00** **= $ 128'200,00**



Proyectante.
(V16) ESTUDIO

Vidrio	: Termop. 4+ 12+4 mm Incoloro
PVC Color	: Blanco

Item 17 **V17** **Medida: 1500 x 1350** **Cant. 3** **P.Unit. :** **201'971,00** **= $ 605'913,00**



Proyectante.
(V17) DORMITORIOS

Vidrio	: Termop. 4+ 12+4 mm Incoloro
PVC Color	: Blanco

Item 18 **V18** **Medida: 400 x 330** **Cant. 4** **P.Unit. :** **15'604,00** **= $ 62'416,00**

Fijo.
(V18) ESTACIONAMIENTO

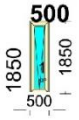
Vidrio	: Termop. 4+ 12+4 mm Incoloro
PVC Color	: Blanco

Item 19 **V19** **Medida: 400 x 330** **Cant. 2** **P.Unit. :** **44'037,00** **= $ 88'074,00**

Proyectante.
(V19) BODEGA

Vidrio	: Termop. 4+ 12+4 mm Incoloro
PVC Color	: Blanco

Item 20 **V20** **Medida: 500 x 1850** **Cant. 1** **P.Unit. :** **132'576,00** **= $ 132'576,00**



Proyectante.
(V20) COMEDOR

Vidrio	: Termop. 4+ 12+4 mm Incoloro
PVC Color	: Blanco

Adicional_1	Instalacion-Flete	$ 350'000,01
Total neto		**$ 6'752'716,00**
+ IVA 19 %		$ 1'283'016,28
Monto total		**$ 8'035'733,53**

CONDICIONES GENERALES

Los valores están expresados en Pesos.

Los valores rigen para las MEDIDAS y CANTIDADES indicadas en la oferta.

Cualquier variaciòn se expresará en una nueva cotización.

Para el análisis de recepción de los cristales se regirá según norma chilena.

Los rasgos deben estar a plomo, nivelados y libres de suciedad. En la eventualidad de haber desperfectos en los rasgos NO se podrá instalar las ventanas hasta que sean corregidos por la Constructora o Mandante.
Se recomienda, en general , impermeabilizar los rasgos antes de que las ventanas sean instaladas.

NO SE INCLUYE la desinstalación de ventanas existentes.
No se considera desinstalar rejas interiores o exteriores existentes.

Las ventanas de PVC nuevas, se instalaràn SOBRE el rasgo existente.

La instalación es realizada por nuestros Técnicos e incluye sellado perimetral EXTERIOR con silicona neutra.
NO se incluyen reparaciones de pinturas, cables de telèfonos, alarmas, en general corrientes dèbiles.

La garantía a nuestros productos, las puede ver en http://www.terramar.cl/index.php/ventanas-de-pvc/garantia-y-mantencion

Forma de Pago: 50% Anticipo, saldo contra entrega.
Plazo de ejecución y entrega: 15 días hábiles para fabricación e instalación.

No se podrá conmenzar la fabricación de puertas y ventanas sin la cancelación del anticipo correspondiente.

Validez de la oferta: 90 días.

Al momento de contratar las ventanas se comprobará la disponibilidad del color escogido por el cliente.
Sin otro particular y esperando tener buena acogida a la presente, le saluda atte.

Sebastián Molina G.
Departamento Administración.
Fono Fábrica: (56) 32 281 96 12
E-mail: sebastianmolina@terramar.cl

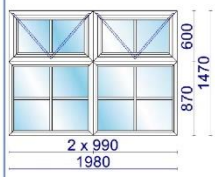
Cotización 3:

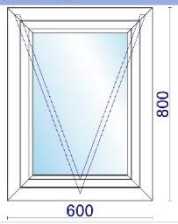
PRESUPUESTO 290/2	2.015 - VINYL V REGION
Referencia :	Av. Con Con Reñaca 550
Responsable : Sandra Reyes	Con Con
Comercial: Pamela Altamirano Celular 7-377 7349	Viña del Mar
Fecha solicitud : 2.11.2015	Tel. 56-32 276 8461
Obra: [redacted]	

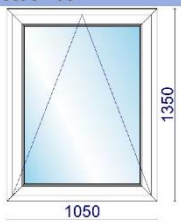
Estimado Cliente:

A continuación, podrá revisar detalle de cada ventana, según lo solicitado para este proyecto

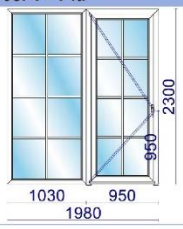
Vinyl, empresa certificada ISO 9001, recomienda que sus ventanas, sean fabricadas, cumpliendo normas de fabricación, que garanticen un buen funcionamiento a largo plazo.

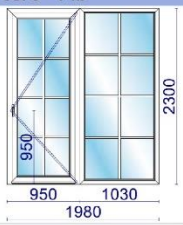
Pos. 1 - V1		Importe ($)	Total ($)
	Ventana Proyeccion, 1 Hoja + 1 Fijo Inferior **Color:** Blanco **Ancho:** 1.980 **- Alto:** 1.470 SALA DE JUEGOS Serie Softline 50 DJ DVH 4+8+6 Laminado		
			388.792

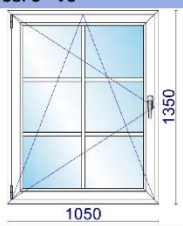
Pos. 2 - V2		Importe ($)	Total ($)
	Ventana Proyeccion, 1 Hoja **Color:** Blanco **Ancho:** 600 **- Alto:** 800 BAÑO 1 PISO : VIDRIO EMPAVONADO + LAMINADO DE SEGURIDAD Serie Softline 50 DJ DVH 5+8+5 Empavonado		
	UDS: 2	88.003	176.006

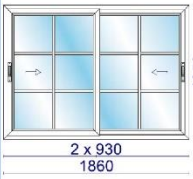
Pos. 3 - V3		Importe ($)	Total ($)
	VENTANA OSCILANTE 1H (AB. INTERIOR SUPERIOR) **Color:** Blanco **Ancho:** 1.050 **- Alto:** 1.350 OFICINA Serie Softline 58 DJ Limitador de Apertura DVH 5+8+5		
	UDS: 1	175.908	175.908

Suma y sigue ($) : 351.914

Pos. 4 - V4a		Importe ($)	Total ($)
	PUERTA ABATIR EXTERIOR 1H C/BARREDOR FELPA **Color:** Blanco **Ancho:** 1.980 **- Alto:** 2.300 LIVING Serie Softline 58 DJ DVH 4+10+6 Laminado		
	UDS: 1	557.878	557.878

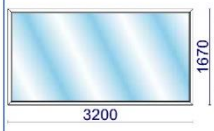
Pos. 5 - V4b		Importe ($)	Total ($)
	PUERTA ABATIR EXTERIOR 1H SIN ALFEIZAR **Color:** Blanco **Ancho:** 1.980 **- Alto:** 2.300 LIVING Serie Softline 58 DJ DVH 4+10+6 Laminado		
	UDS: 1	573.231	573.231

Pos. 6 - V5		Importe ($)	Total ($)
	Ventana Oscilobatiente, 1 Hoja **Color:** Blanco **Ancho:** 1.050 **- Alto:** 1.350 COCINA Serie Softline 50 DJ DVH 4+8+6 Laminado		
	UDS: 1	214.087	214.087

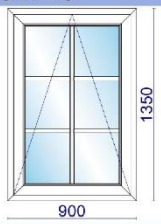
Pos. 7 - V6		Importe ($)	Total ($)
	Ventana Corredera, 2 hojas moviles **Color:** Blanco **Ancho:** 1.860 **- Alto:** 1.350 COCINA Serie Softline 58 CD DVH 4+8+6 Laminado		
	UDS: 1	373.911	373.911

Suma y sigue ($) : 2.071.021

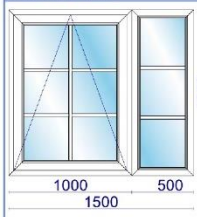
Pos. 8 - V7		Importe ($)	Total ($)
	VENTANA OSCILOBATIENTE 1H (AB. INTERIOR) **Color:** Blanco **Ancho:** 400 **- Alto:** 1.850 BW LATERAL UNIADA CON V8 Serie Softline 58 DJ DVH 4+8+6 Laminado		
	UDS: 3	157.269	471.807

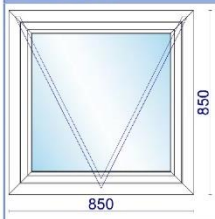
Pos. 9 - V8		Importe ($)	Total ($)
	FIJO 1 CUERPO **Color:** Blanco **Ancho:** 3.200 **- Alto:** 1.670 BW FRONTAL Serie Softline 58 DJ DVH 4+10+6 Laminado		
	UDS: 1	387.079	387.079

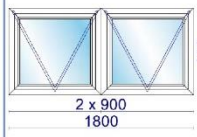
Pos. 10		Nº	Importe ($)	Des. (%)	Total ($)
ZGL-1.85	PILAR DE ENCUENTRO PARA BW	2,00	36.222		72.444

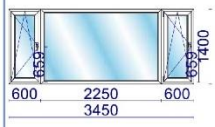
Pos. 11 - V9		Importe ($)	Total ($)
	VENTANA OSCILANTE 1H (AB. INTERIOR SUPERIOR) **Color:** Blanco **Ancho:** 900 **- Alto:** 1.350 PASILLO Serie Softline 58 DJ Limitador de Apertura DVH 4+8+6 Laminado		
	UDS: 1	195.967	195.967

Suma y sigue ($) : 3.198.318

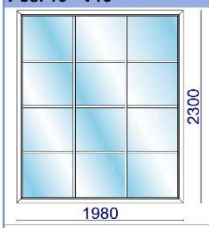
Pos. 12 - V10		**Importe ($)**	**Total ($)**
	VENTANA OSCILANTE 1H (AB. INTERIOR SUPERIOR) **Color:** Blanco **Ancho:** 1.500 **- Alto:** 1.350 PIEZA VISITA Serie Softline 58 DJ Limitador de Apertura DVH 5+8+5		
	UDS: 1	278.175	278.175

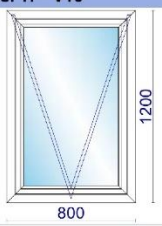
Pos. 13 - V11		**Importe ($)**	**Total ($)**
	Ventana Proyeccion, 1 Hoja **Color:** Blanco **Ancho:** 850 **- Alto:** 850 BAÑO 2 PISO Serie Softline 50 DJ DVH 5+8+5 Empavonado		
	UDS: 2	108.847	217.694

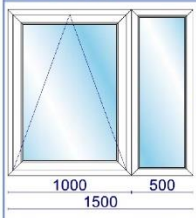
Pos. 14 - V12		**Importe ($)**	**Total ($)**
	Ventana Proyeccion, 1 Hoja **Color:** Blanco **Ancho:** 1.800 **- Alto:** 850 BAÑO Serie Softline 50 DJ DVH 5+8+5 Empavonado		
	UDS: 1	226.954	226.954

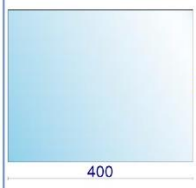
Pos. 15 - V13-V14		**Importe ($)**	**Total ($)**
	FIJO 1 CUERPO **Color:** Blanco **Ancho:** 3.450 **- Alto:** 1.400 DORMITORIO SUITE. BW UNIÓN VIDRI VIDRIO EN 90° EN 1250 Y 1000 BW, UNIÓN VIDRIO/VIDRIO 1250+1000 Serie Softline 58 DJ DVH 5+10+5		
	UDS: 1	475.761	475.761

Suma y sigue ($) : 4.396.902

Pos. 16 - V15		**Importe ($)**	**Total ($)**
	FIJO 1 CUERPO **Color:** Blanco **Ancho:** 1.980 **- Alto:** 2.300 LIVING 2 PISO Serie Softline 58 DJ DVH 5+10+5		
	UDS: 2	272.996	545.992

Pos. 17 - V16		**Importe ($)**	**Total ($)**
	Ventana Proyeccion, 1 Hoja **Color:** Blanco **Ancho:** 800 **- Alto:** 1.200 ESTUDIO Serie Softline 50 DJ DVH 5+8+5		
	UDS: 1	123.385	123.385

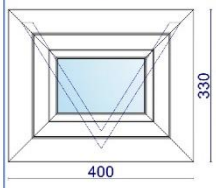
Pos. 18 - V17		**Importe ($)**	**Total ($)**
	VENTANA OSCILANTE 1H (AB. INTERIOR SUPERIOR) **Color:** Blanco **Ancho:** 1.500 **- Alto:** 1.350 DORMITORIOS Serie Softline 58 DJ Limitador de Apertura DVH 5+8+5		
	UDS: 3	262.039	786.117

Pos. 19 - V18		**Importe ($)**	**Total ($)**
	TP 4+8+4 [16 mm] (E) **Color:** Blanco **Ancho:** 400 **- Alto:** 330 ESTACIONAMIENTO DVH 4+8+4		
	UDS: 4	8.483	33.932

Suma y sigue ($) : 5.886.328

Pos. 20		Nº	Importe ($)	Des. (%)	Total ($)
ZGL-5.84	JUNQUILLO EXTERIOR PARA TERMOPANELES EN V18	6.00	12.964		77.784

Pos. 21 - V19 | Importe ($) | Total ($)



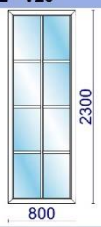
Ventana Proyeccion, 1 Hoja

Color: Blanco
Ancho: 400 **- Alto:** 330

BODEGA VENTANA CON MANILLA PARCHE
Serie Softline 50 DJ
DVH 5+8+5

UDS: 2	40.608	81.216

Pos. 22 - V20 | Importe ($) | Total ($)



FIJO 1 CUERPO

Color: Blanco
Ancho: 800 **- Alto:** 2.300

PASILLO ESCALERA ESTACIONAMIENTO VIDRIO
EMPAVONADO+LAMINADO DE SEGURIDAD
Serie Softline 58 DJ
DVH 5+8+5 Empavonado

UDS: 1	168.497	168.497

Pos. 23 - V21 | Importe ($) | Total ($)

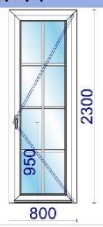
VENTANA OSCILANTE 1H (AB. INTERIOR SUPERIOR)

Color: Blanco
Ancho: 1.250 **- Alto:** 1.350

LIVING COMEDOR
Serie Softline 58 DJ
Limitador de Apertura
DVH 4+8+6 Laminado

UDS: 1	280.237	280.237

Suma y sigue ($) : 6.494.062

Pos. 24 - P1		Importe ($)	Total ($)
	PUERTA ABATIR EXTERIOR 1H SIN ALFEIZAR **Color:** Blanco **Ancho:** 800 **- Alto:** 2.300 PUERTA COCINA Serie Softline 58 DJ DVH 4+8+6 Laminado		
	UDS: 1	330.572	330.572

Pos. 25		Nº	Importe ($)	Des. (%)	Total ($)
ZGL-5.08	LAMINADO DE SEGURIDAD PARA CRISTALES EMPAVONADOS LAMINADO V2 Y V20	1,00	61.480		61.480

Pos. 26		Nº	Importe ($)	Des. (%)	Total ($)
ZGL-57.33	FLETE E INSTALACIÓN	1,00	1.001.570		1.001.570

Pos. 27		Nº	Importe ($)	Des. (%)	Total ($)
	5% DE DESCUENTO ESPECIAL	1,00	-394.382		-394.382
	UDS Totales: 43				

Forma de Pago:	**Base Imponible en $**	**7.493.302**
ANTICIPO, SALDO DOC.	**I.V.A. (19,00%)**	**1.423.727**
	TOTAL en $	**8.917.029**

Observaciones:

Favor tener en cuenta, el siguiente detalle según tipo de cliente:

PARTICULARES:

*Presupuesto valido por 60 días, a contar de la fecha de este presupuesto.
*Plazo de entrega, 20 días hábiles a contar de la fecha de rectificación y confirmación del cliente de la revisión hoja de rectificación.
*Forma de pago: anticipo 50%, saldo a 30 días documento a nombre de SAVENERGY CHILE S.A. (Razón Social) ó Tarjeta de Crédito (www.webpay.cl)
*Presupuesto NO contempla: arreglos de muros, cerámicos, pintura, extracción de rejas ni alarmas. Estos trabajos, debe verlos el cliente, directamente con un maestro especializado.
*No incluye desinstalación de elementos existentes, a no ser, que este expresamente incluido (el costo de la desinstalación, esta sujeta a evaluación, en visita técnica del instalador)
*La utilización de andamios, gulas o izaje en altura, tienen un cargo adicional a este presupuesto.
*Los vidrios en general (incl. termo paneles) no tienen garantía posterior a la recepción del cliente (rallados, quebrados)
*Para visita a rectificar, rasgos deben estar limpios y aplomados. (visita se realiza previo pago del anticipo)
*En visita de rectificación, es importante que cliente valide: Aperturas (vistas desde el interior), tipos de vidrio, color perfiles
*Se aplican los criterios del manual de tolerancias de la Cámara Chilena de la Construcción www.cchc.cl

CONSTRUCTORAS:

*MANDANTE DEBE PROVEER LUGAR DE ACOPIO Y MEDIOS DE LEVANTE
*Medida única por tipo de ventana
*Presupuesto, solo incluye lo que esta especificado

Suma y sigue ($) : 8.917.029

*Presupuesto, valido por 60 días, a contar de la fecha de esta cotización
*Todos los valores solo en U.F.
*Incluye sello perimetral exterior
*No incluye protección en los vidrios y/o DVH (termo panel).
*Se aplican los criterios del manual de tolerancias de la Cámara Chilena de la Construcción www.cchc.cl

Nuestras ventanas son fabricadas con:

*Perfileria marca VEKA
*Herrajes G-U, Gut-Haus, Roto
*Vidrios Lirquen
*La entrega de las ventanas, se realizara bajo las tolerancias estipuladas en el Manual de Tolerancias para Edificaciones, tanto para perfiles, como para vidrios.
*Garantía 5 años

Contacto empresa Vinyl:
Sandra Reyes
Teléfono: +568 829 88 49
email: sreyes@vinyl.cl

Sucursal V Región: Av. Con Con Reñaca 550 Teléfono: (32) 276 8461

Dirección Fabrica: Cerro Portezuelo 9860, Quilicura

Showroom Veka: Avenida Nueva Costanera 4229, Local 1-A, Vitacura

Detalle del cálculo:

Cálculo del precio unitario por ventana inst.

Tipo de ventana: Puerta-ventana corredera, en PVC y termopanel

		Cotización			
		1	2	3	4
Medida	X	1980	2005	1940	1980
	Y	2300	2300	2290	2300
Área	[m2]	4,554	4,6115	4,4426	4,554
Precio	[$]	662039	637000	624000	557878
Precio unit	[$/m2]	145375,3	138132,9	140458,3	122502,9
Lámina	+20%		27626,59	28091,66	
Instalación+flete	+5.2%	7559,514			
Instalación+flete	+8.1%				9922,731
Total	[$/m2]	152934,8	165759,5	168549,9	132425,6
Promedio	**[$/m2]**	**154917,5**			

Presupuestos

1. Terramar ltda: Corredera living
2. Windows total: Corredera 2HM
3. Windows total: Corredera 2HM
4. Veka - Vinyl V región: Puerta abatir exterior