Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

Firmado electrónicamente por: José Francisco Gómez Rivera
Motivo: Autorización electrónica de trabajo de graduación
Fecha: 25/04/2025 05:48:45
Lugar: Facultad de Ingeniería, USAC.

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO SISMORESISTENTE DE MUROS TILT-UP PREFABRICADOS EN NAVES INDUSTRIALES

Sergio Alejandro Rodríguez de León
Asesorado por la Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jol

Guatemala, abril de 2025

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO SISMORESISTENTE DE MUROS TILT-UP PREFABRICADOS EN NAVES INDUSTRIALES

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

SERGIO ALEJANDRO RODRÍGUEZ DE LEÓN
ASESORADO POR LA INGA. DILMA YANET MEJICANOS JOL

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, ABRIL DE 2025

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. José Francisco Gómez Rivera (a.i.)
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. Juan Carlos Molina Jiménez
VOCAL IV	Ing. Kevin Vladimir Armando Cruz Lorente
VOCAL V	Ing. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Dr. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. José Francisco Gómez Rivera (a. i.)
EXAMINADOR	Ing. Luis Mariano Alvarez Muralles
EXAMINADOR	Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza
EXAMINADOR	Ing. Bryan Alejandro Castañón Martínez
SECRETARIO	Dr. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO SISMORESISTENTE DE MUROS TILT-UP PREFABRICADOS EN NAVES INDUSTRIALES

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Posgrado de la Escuela de Ingeniería civil, con fecha de julio de 2024.



Sergio Alejandro Rodríguez de León

ESCUELA DE ESTUDIOS DE
POSTGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA

EEPFI-PP-5441-2024
Guatemala, 2 de octubre de 2024

Director
Armando Fuentes Roca
Escuela De Ingenieria Civil
Presente.

Estimado Armando Fuentes Roca

Reciba un cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería.

El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado y aprobado el Diseño de Investigación titulado: **EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO SISMORRESISTENTE DE MUROS TILT UP PREFABRICADOS EN NAVES INDUSTRIALES.**, el cual se enmarca en la línea de investigación: **Análisis y Diseño Estructural y Estructuras Complejas - Respuesta estructural**, presentado por el estudiante **Sergio Alejandro Rodríguez De León** carné número **201806984**, quien optó por la modalidad del "PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO". Previo a culminar sus estudios en la Maestría en Ciencias en Estructuras.

Y habiendo cumplido y aprobado con los requisitos establecidos en el normativo de este Proceso de Graduación en el Punto 6.2, aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Décimo, Inciso 10.2 del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011, firmo y sello la presente para el trámite correspondiente de graduación de Pregrado.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"

Mtra. Dilma Yanet Mejicanos Jol
Asesor(a)

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
ESCUELA DE POSTGRADO
FACULTAD DE INGENIERIA
DE GUATEMALA

Mtro. Armando Fuentes Roca
Coordinador(a) de Maestría

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
DIRECTORA
ESCUELA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA

Mtra. Aurelia Anabela Cordova Estrada
Directora
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería

EEP.EIC.5283.2024

El Director de la Escuela De Ingenieria Civil de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador y Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, del Diseño de Investigación en la modalidad Estudios de Pregrado y Postgrado titulado: **EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO SISMORRESISTENTE DE MUROS TILT UP PREFABRICADOS EN NAVES INDUSTRIALES.**, presentado por el estudiante universitario **Sergio Alejandro Rodríguez De León**, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingeniería en esta modalidad.

ID Y ENSEÑAD A TODOS



Mtro. Armando Fuentes Roca
Director
Escuela De Ingenieria Civil

Guatemala, octubre de 2024

Decanato
Facultad e Ingeniería

24189101- 24189102

LNG.DECANATO.OIE.385.2025

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte de la Dirección de Escuela de Ingeniería Civil, al Trabajo de Graduación titulado: **EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO SISMORRESISTENTE DE MUROS TILT-UP PREFABRICADOS EN NAVES INDUSTRIALES.**, presentado por: **Sergio Alejandro Rodriguez De Leon** después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Firmado electrónicamente por: José Francisco Gómez Rivera
Motivo: Informe final PREGRADOPOSTGRADO
Fecha: 24/04/2025 17:58:43
Lugar: Facultad de Ingeniería, USAC.

Ing. José Francisco Gómez Rivera
Decano a.i.

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
DECANO a.i.
Facultad de Ingeniería

Guatemala, abril de 2025

Para verificar validez de documento ingrese a https://www.ingenieria.usac.edu.gt/firma-electronica/consultar-documento

Tipo de documento: Correlativo para orden de impresión Año: 2025 Correlativo: 385 CUI: 3252145731401

Escuelas: Ingeniería Civil, Ingeniería Mecánica Industrial, Ingeniería Química, Ingeniería Mecánica Eléctrica, - Escuela de Ciencias, Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS). Postgrado Maestría en Sistemas Mención Ingeniería Vial. Carreras: Ingeniería Mecánica, Ingeniería Electrónica, Ingeniería en Ciencias y Sistemas. Licenciatura en Matemática. Licenciatura en Física. Centro de Estudios Superiores de Energía y Minas (CESEM). Guatemala, Ciudad

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por darme sabiduría e inteligencia y acompañarme en todo momento.
Mi abuelita	Por su apoyo incondicional y ser mi motivación principal en todo este proceso.
Mis hermanos	Por ser inspiración, motivación y apoyo para alcanzar mis metas.
Mis padres	Por sus enseñanzas y consejos brindados a lo largo de mi vida.
Mis amigos	Por todos los momentos compartidos y las palabras de aliento en los momentos más difíciles.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por tener el privilegio de estudiar en esta prestigiosa universidad y formarme profesionalmente.
Escuela de Estudios de Postgrado Facultad de ingeniería.	Por la oportunidad de estudiar y actualizarme en mi rama preferida de la Licenciatura de Ingeniera Civil.
Mis compañeros de estudio de maestría	Por brindarme su apoyo y compartir sus conocimientos a lo largo de la maestría.
Mi asesora	Por el apoyo brindado en la elaboración de mi trabajo de graduación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES V
LISTA DE SÍMBOLOS VII
GLOSARIO IX

1. INTRODUCCIÓN 1

2. ANTECEDENTES 3

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 9
   3.1 Descripción del problema a solucionar 9
   3.2 Causas del problema 9
   3.3 Preguntas de investigación 10
      3.3.1 Pregunta central 10
      3.3.2 Preguntas auxiliares 10

4. JUSTIFICACIÓN 11

5. OBJETIVOS 13
   5.1 General 13
   5.2 Específicos 13

6. NECESIDADES A CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN 15

7. MARCO TEÓRICO 17
   7.1 Construcciones prefabricadas 17

7.2 Introducción al sistema constructivo Tilt-Up 19
7.2.1 Definición de los muros Tilt-Up 20
7.2.2 Proceso constructivo de los muros Tilt-Up 23
7.2.3 Diseño de paneles de concreto Tilt-Up por método ACI 551 y ACI 318 29
7.2.4 Conceptos de análisis para muros de concreto esbeltos 29
7.2.5 Condiciones de carga 33
7.2.6 Refuerzo mínimo 34
7.2.7 Control de deflexiones 36
7.2.8 Procedimientos de diseño de paneles 37
7.2.9 Corte en el plano 41
7.2.10 Conexiones para paneles Tilt-Up 45
7.2.11 Requisitos de construcción 49
7.2.12 Diseño para levantar tensiones 53

8. HIPÓTESIS 57

9. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS 59

10. METODOLOGÍA 63
10.1 Características del estudio 63
10.2 Unidades de análisis 63
10.1 Variables 64
10.2 Fases del estudio 65

11. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN 67

12. CRONOGRAMA 69

13. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO 71
13.1 Factibilidad técnica 71
13.2 Factibilidad económica 71

REFERENCIAS .....**¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

Figura 1. Paneles prefabricados y su montaje en edificaciones**¡Error! Marcador no defini**

Figura 2. Sistema constructivo Tilt-Up ..... **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 3. Cimentación de un muro Tilt-Up y habilitado de cimbras antes del colado…….. 24

Figura 4. Proceso de vibrado y terminado de un muro Tilt-Up..... 26

Figura 5. Proceso de izaje y apuntalamiento de un muro Tilt-Up 28

Figura 6. Modelo de diseño de panel-fuerza de succión con carga axial excéntrica…... 30

Figura 7. Tiras de diseño en las aberturas..... 39

Figura 8. Panel de relleno, pilastra y relleno de losa de piso**¡Error! Marcador no definido**

Figura 9. Conector de tachuelas, conector con barra de refuerzo y conexión soldada..... **¡Error! Marcador no definido.**

TABLAS

Tabla 1. Tolerancias recomendadas para su uso en la industria Tilt-Up ... 50

Tabla 2. Distancias mínimas de recubrimiento recomendadas 51

Tabla 3. Especificaciones recomendadas para el concreto..... 52

Tabla 4. Variables de estudio 64

Tabla 5. Cronograma del proceso investigativo..... 69

Tabla 6. Costos para la realización de la investigación 72

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
%	Porcentaje
Q	Quetzal (moneda de Guatemala)

GLOSARIO

Concreto Material para construcción de edificios y otras obras arquitectónicas que se caracteriza por su versatilidad, resistencia y durabilidad.

Sismo Movimiento de considerable fuerza en la corteza terrestre.

1. INTRODUCCIÓN

Las construcciones sismoresistentes en Guatemala son fundamentales, debido a la ubicación geográfica del país, situado en una zona altamente sísmica donde convergen tres placas tectónicas. Esto genera una alta actividad sísmica, lo que requiere que las edificaciones cumplan con estrictos estándares de diseño y construcción. Su objetivo principal es garantizar la segurisad de los habitantes, minimizar los daños durante un sismo y mantener la funcionalidad de las edificaciones. Las normativas locales establecen los requisitos para el diseño y construcción de edificios, para que estos sean capaces de soportar los movimientos sísmicos.

Las construcciones prefabricadas en Guatemala han ganado popularidad, debido a su eficiencia en tiempo y costos, asi como su versatilidad en diversos proyectos. Estas construcciones son valoradas por su rápido montaje, mayor control de calidad en los materiales y menor impacto ambiental, al reducir desperdicios y optimizar recursos.

En el primer capitulo se abarcará el marco teórico, en el cual se detallarán todos los términos relacionados a los muros Tilt-Up prefabricados de concreto, tocando temas como definiciones, diseño a base de códigos extranjeros y sus parámetros, montaje y referenciara otras normativas aplicadas al país.

En el segundo capítulo se abarcarán las metodologías de evaluación sísmicas mas utilizadas en el país, recolectado información y verificando su aplicación en naves industriales para evaluar el comportamiento sismorresistente de la estructura, eligiendo cuál de todas es la más viable.

En el tercer capitulo se realizará el diseño de los muros Tilt-Up prefabricados, siguiendo los lineamientos y espeficicaciones de los Códigos ACI 551 y ACI 318, tanto como geometría, refuerzo estructural, conexiones y elementos necesarios para el montaje.

En el cuarto capítulo se realizará la evaluación sismoresistente de la estructura, en conjunto de una nave industrial que contenga el sistema de muros Tilt-Up por medio del modelado en un software especializado en estructuras, verificando su comportamiento estructural.

Por último, se realizará la presentación y discusión de resultados, verificando la aceptación de la normativa extranjera aplicada al diseño de este sistema para su utilización en Guatemala.

2. ANTECEDENTES

Guatemala, debido a que todo el territorio se encuentra entre la unión de tres placas tectónicas, la placa del Caribe, norteamericana y Cocos, respectivamente, es considerado un país altamente sísmico. En consecuencia, el INSIVUMEH (2016) basó su investigación en la importancia del estudio de los terremotos en el país, para así bajar el índice de daños que estos producen, recomendando ciertas medidas preventivas como los códigos de construcción para diseñar elementos estructurales, los cuales sean resistentes ante un evento sísmico.

Las naves industriales son construcciones diseñadas para albergar en ellas cualquier tipo de maquinaria industrial, productos, entre otro tipo de elementos. Díaz (2018) abordó específicamente los resultados obtenidos mediante un análisis, el comportamiento global de una nave industrial sometida a carga de sismo.

Este análisis se efectúa mediante un modelo matemático, utilizando un software especializado para edificaciones industriales (SAP2000), en el cual se realiza la respuesta modal global de la estructura, utilizando el espectro de respuesta del lugar a construir. Mediante este análisis, se obtienen las deformaciones y/o desplazamientos que obtiene cada uno de sus componentes. Dicho estudio es vinculante con esta investigación, debido a que presenta los resultados obtenidos de manera global de la estructura, envolviendo muros, columnas, vigas, entre otros elementos estructurales.

El análisis estructural bajo cargas dinámicas y/o fuerzas sísmicas en construcciones, las cuales puedan sufrir un evento de esta magnitud, se puede realizar por medio de dos métodos, análisis estático y análisis dinámico. Salazar (2023), en su trabajo de graduación, utiliza un análisis sísmico estático para verificar el comportamiento sismoresistente de una nave industrial, afirmando que este análisis es el más recomendable para este tipo de estructuras, analizando las fuerzas por nivel las cuales se modifican linealmente dependiendo la altura y el cortante basal.

Así mismo, compara los resultados arrojados por medio del programa ETABS para el cortante basal de la estructura, colocando el coeficiente sísmico dependiendo el lugar a analizar, arrojando un resultado con una desviación del 1 % con respecto al calculado manualmente, por lo que asegura la fiabilidad del uso de programas especializados para analizar este tipo de estructuras bajo la acción de cargas dinámicas.

Reyes (2022), en su artículo de graduación, destaca la importancia de los elementos prefabricados en la construcción moderna, ya que estos arrojan resultados eficientes bajo los diferentes tipos de carga a los que son sometidos. Cabe recalcar que su investigación se enfoca en muros prefabricados de altura considerable, para ser aplicado en un edificio de marcos estructurales, en el cual modela muros de diferentes espesores, diferente tipo de hormigón y acero para realizar el análisis numérico, con base en el análisis por elementos finitos y el uso de software de análisis estructural.

Para el análisis no lineal utilizó diferentes modelos, evaluando la respuesta de estos bajo demandas cíclicas y cargas sísmicas. Los resultados obtenidos destacan que los muros pueden soportar las cargas sísmicas sin llegar a tener fallos significativos, por otra parte, la respuesta a la demanda

cíclica depende del espesor de estos, y la disipación de energía y ductilidad dependen del tipo de armado con que se evalúa el muro (Reyes, 2022).

La necesidad de implementar estos sistemas y técnicas constructivas, las cuales presenten un desempeño adecuado bajo las solicitaciones y amenazas que se puedan sufrir durante el periodo de vida de una estructura, se ha convertido en un punto de estudio fundamental para los diferentes profesionales que se dedican a la construcción. En Guatemala, la Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica, en su normativa NSE 7.3, establece los requisitos que deberán cumplir los elementos prefabricados de concreto, tanto para elementos que resisten flexión, las conexiones entre ellos y los elementos que deben resistir carga sísmica para obtener un diseño sismo resistente adecuado (AGIES, 2018).

Sin embargo, esta normativa no se rige según lineamientos propiamente guatemaltecos, basa sus diseños en los parámetros y requisitos descritos en el código ACI 318-14, para muros TILT-UP prefabricados presenta la guía detallada de las disposiciones para el diseño estructural (AGIES, 2018).

López (2008) en su artículo realiza la comparación entre dos sistemas estructurales, utilizando muros precolados y muros TILT-UP prefabricados, para dos naves industriales de diferente configuración. Se enfoca en verificar el comportamiento estructural realizando los modelos en el programa STAAD PRO y sometiéndolos a un análisis dinámico espectral. Los resultados obtenidos se enfocan en los desplazamientos de ambos tipos de muro, los cuales presentan valores dentro del rango permitido del reglamento utilizado. Se obtiene una respuesta muy similar, pero la principal diferencia es la rigidez, ya que los muros precolados presentan una rigidez uniforme en todos los marcos, al contrario de los muros TIL-UP, los cuales presentan una rigidez

variada, lo que ocasiona que algunos marcos no cuentan con su influencia en el desplazamiento lateral de la estructura.

Junior (2020) presenta de manera clara los puntos más frágiles o los lugares más susceptibles que pueden llegar a fallar en un muro prefabricado de concreto, al momento de someterlo a cargas de incremento progresivo, dependiendo el tipo de apertura que posea, ya sea con apertura para puertas o ventanas. El autor enfoca su investigación en el análisis y modelado computacional de muros o paneles prefabricados de concreto con aperturas, los cuales cuentan con 3 diferentes configuraciones y dimensiones. El primer muro fue completo, el segundo con apertura para puerta y el último con apertura para ventana.

El autor basa su análisis en los resultados de desplazamientos, principales tensiones y panoramas de agrietamientos sufridos por cada modelo, utilizando sistemas de ecuaciones no lineales, mediante el análisis de elementos finitos y el método de Newton-Raphson, analizando los modelos al momento de ser sometidos a un incremento iterativo de cargas.

Rubiano (2024), en su trabajo de graduación de maestría, realizó el ensayo de 3 elementos prefabricados, aplicando carga horizontal fuera del plano, y mediante los resultados arrojados identificó que la causa principal que redujo el incremento de fisuras fue el tipo de conexión que poseían los muros. Cabe recalcar que el autor menciona diferentes tipos de unión, afirmando que las juntas estructurales presentan varios mecanismos de resistencia y evitan la aparición de puntos de falla, ya que estos elementos son los que transmiten el corte generado.

Para la revisión de los esfuerzos flexionantes, momentos y cortes, los cuales va a presentar un elemento estructural al momento de ser sometido a un evento sísmico, Mendizábal (2019) en su investigación realiza la comparación de resultados de armado, cortantes y momentos obtenidos mediante el diseño de muros de corte con aberturas, utilizando el método ACI 318-2014, por medio de una hoja de cálculo desarrollada en el programa Mathcad, con los resultados obtenidos en el programa ETABS, al momento de someter el elemento a una carga de igual magnitud, obteniendo resultados similares en ambos casos, afirmando la viabilidad de uso de softwares especializados en el cálculo estructural, dando resultados acorde a la realidad.

Ramírez (2013) enfoca su tema de investigación en el uso y manejo correcto del programa especializado para estructuras ETABS, enfocándose en estructuras de varios niveles y configuración convencional de concreto armado, basándose en los parámetros que rigen los códigos aplicables para Guatemala, colocándole las cargas, tanto gravitacionales como de sismo, siguiendo los lineamientos requeridos, dependiendo del tipo de ocupación que tendrá la estructura. Esta investigación es de gran aporte, dado que, aunque no se enfoque en el análisis de naves industriales, afirma el uso correcto del programa, basándose en códigos y lineamientos aplicables en Guatemala.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

3.1 Descripción del problema a solucionar

Básicamente el problema ocurre debido al desconocimiento del desempeño sismoresistente en muros Tilt-Up prefabricados para naves industriales en Guatemala.

3.2 Causas del problema

En Guatemala, existe poca demanda de esta tipología constructiva en el ámbito industrial, por lo que no se genera un interés significativo por conocer lineamientos y normas que analicen su comportamiento estructural, lo cual requiere en muchos casos adaptarse a normas internacionales para su diseño y construcción.

Debido a la poca demanda constructiva, así como a la ausencia de recursos financieros, tecnológicos y expertiz en mano de obra, no se ha impulsado la investigación para la creación de lineamientos y reglamentos que propongan parámetros de diseño sísmico dentro de la normativa vigente guatemalteca.

Además, se desconoce la reacción, tipos de falla y los puntos más críticos que son afectados en esta tipología ante un evento sísmico de gran magnitud.

3.3 Preguntas de investigación

Para llevar a cabo un buen proceso de estudio, es necesario plantear la indagación con base en una pregunta central y algunas preguntas auxiliares que se relacionan directamente con los objetivos del trabajo.

3.3.1 Pregunta central

¿Se pueden desarrollar proyectos sismoresistentes con esta tipología, evaluando y analizando su comportamiento estructural ante un evento sísmico en Guatemala?

3.3.2 Preguntas auxiliares

- ¿Se están ejecutando los procesos de diseño, construcción y montaje adecuados para muros Tilt-Up prefabricados con respuesta estructural aceptable?

- Sometiendo esta tipología a un evento sísmico de gran magnitud, ¿pueden detectarse los puntos más críticos de falla?

- ¿Cuáles parámetros de diseños sismorresistente establecidos en normas internacionales pueden integrarse a las normativas en Guatemala?

- ¿Definidos los parámetros aplicables al país pueden establecerse lineamientos de diseño en las diferentes zonas sísmicas dadas por AGIES?

4. JUSTIFICACIÓN

La necesidad de aplicar nuevas tipologías en Guatemala se ha vuelto un tema de bastante interés para los diferentes profesionales, los cuales buscan una manera más eficiente para agilizar los procesos constructivos, en los que se demanda el cumplimiento de los distintos parámetros de aceptación entre las normas vigentes.

Al momento de implementar una nueva tipología, en este caso, muros prefabricados de concreto Tilt-Up, no se cuenta con el conocimiento necesario para el proceso constructivo de los diferentes elementos que lo conforman, esto conduce a que los elementos no estén unidos o montados de una manera adecuada, causando un problema en el desempeño mecánico de los mismos, al momento de ser sometidos a fuerzas internas o externas, ya sean sismos, cargas de viento, peso propio, entre otras.

Así también, se desconoce el tipo de reacción y los tipos de falla que van a presentar los muros al momento de ser sometidos a un evento sísmico, los cuales son muy recurrentes en Guatemala, por ser catalogado como un país altamente sísmico, lo que conduce a tener un alto grado de amenaza para la seguridad de las personas que frecuenten la estructura que los contenga.

Por otra parte, el diseño de los elementos estructurales se ve sometido a cumplir los parámetros especificados en códigos internacionales, los cuales se tienen que adaptar al país de estudio por la ausencia de normas y lineamientos nacionales.

La presente investigación forma parte de la línea de investigación Análisis y Diseño Estructural de Estructuras Complejas, que pertenece al pensum de estudios de la Maestría en Ingeniería en Estructuras, de la Escuela de Estudios de Postgrado, de la Facultad de Ingeniería, USAC, específicamente en la sublínea de respuesta estructural.

5. OBJETIVOS

5.1 General

Evaluar el desempeño sismoresistente en muros Tilt-Up prefabricados para naves industriales en Guatemala.

5.2 Específicos

1. Evaluar los procesos de diseño, construcción y montaje de muros prefabricados Tilt-Up.

2. Analizar la respuesta estructural y los puntos más críticos de falla que presenta esta tipología ante un evento sísmico.

3. Analizar las distintas normas internacionales vigentes, que puedan integrar criterios y parámetros sísmicos, para ser utilizadas dentro de los estándares que definen las normas técnicas guatemaltecas.

4. Proponer criterios normativos que puedan aplicarse de manera zonificada para Guatemala.

6. NECESIDADES A CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN

Integrar los criterios internacionales a los normativos aplicables para Guatemala va a permitir que los parámetros de diseño cumplan las solicitaciones estructurales y que disminuyan las fallas estructurales en los puntos más críticos. Esto permitirá a su vez implementar esta tipología con otros fines industriales.

Los lineamientos vigentes pueden facilitar la implementación de este sistema estructural, contando con procesos constructivos efectivos y eficientes, para que presente un alto desempeño estructural. Estos procesos constructivos pueden estandarizarse utilizando los criterios de diseño normados por AGIES.

Los ensayos asistidos por software, simulando un evento sísmico de gran magnitud, facilitarán la ubicación de los puntos más críticos y los lugares más vulnerables, en los cuales se hará énfasis al momento del diseño estructural. Además, esto facilitará la ubicación de posibles fallas o defectos, que puedan encontrarse en estructuras existentes, para así proponer actividades preventivas eficientes de mantenimiento.

Esta investigación beneficiará a diseñadores, constructores y supervisores de naves industriales, pues brindará herramientas para conocer y mejorar el desempeño estructural de elementos sometidos a cargas y sismos. Ayudará, además, a la identificación de posibles fallas o defectos que puedan encontrarse en estructuras existentes, a fin de proponer actividades preventivas o correctivas de mantenimiento.

Será útil también para estudiantes de la carrera de Ingeniería Civil y de Maestría en Estructuras, ya que servirá de fuente de consulta técnica para el desarrollo de nuevas investigaciones relacionadas a la evaluación sismoresistente de estructuras prefabricadas por medio de ensayos no destructivos, en este caso por simulaciones asistidas por software.

Será imortanye además para los fabricantes y/o proveedores de elementos estructurales prefabricados y para la industria en general, pues es posible mejorar los procesos de fabricación y brindar mejores opciones al mercado de productos con condiciones de operatividad comprobada.

7. MARCO TEÓRICO

7.1 Construcciones prefabricadas

En la actualidad, debido a la crisis económica, la demanda de edificios de gran altura, naves industriales masivas, entre otros, ha disminuido considerablemente. Este descenso ha impactado principalmente a las empresas dedicadas a la construcción, en especial a las que emplean métodos constructivos tradicionales.

Por otro lado, le ha brindado un gran número de oportunidades a las empresas que producen prefabricados de concreto. Esto ha dejado de lado a los sistemas de diseño cerrados, que se han centrado en la producción en serie de componentes y partes de edificaciones. Los fabricantes y la ingeniería han permitido una mayor flexibilidad en el diseño de los prefabricados, los cuales cumplen con las exigencias mínimas de calidad del sector.

Las construcciones prefabricadas son los sistemas constructivos, en los cuales se realiza el diseño y producción de sus elementos en una fábrica, la cual no se encuentra ubicada en el lugar de la posición final de la edificación. El objetivo principal de este tipo de construcciones es reducir tiempos en obra, ya que cuanta con elementos que son de fácil montaje y colocación no tan laboriosa.

Dependiendo de la cantidad de elementos prefabricados que conforman una construcción, se puede medir el grado de prefabricación de la obra (Pérez, 2012), por ejemplo, según García (2015), existen estructuras que se construyen

completamente con elementos prefabricados, ya sean plantas especializadas o instalaciones montadas en el lugar de la obra. También existen estructuras mixtas, las cuales combinan elementos prefabricados con elementos vertidos *in situ,* como las losas planas que se vierten en el suelo y luego se levantan a su posición final. Así mismo, se utilizan elementos prefabricados en la construcción de puentes, los cuales se colocan en la posición final posteriormente de haberse construido los estribos o apoyos.

Los elementos prefabricados pueden ser de concreto reforzado ordinario o de concreto preesforzado, dependiendo de las características técnicas y económicas requeridas para cada elemento. Según Salas (2008), en la industria se pueden diferenciar sistemas de producción de este tipo de elementos:

- Sistemas cerrados: en estos se crean los elementos siguiendo las especificaciones internas del sistema, ajustándose únicamente a las normas de compatibilidad. Por lo tanto, el diseño arquitectónico debe adaptarse a las limitaciones del sistema.
- Empleo parcial de componentes: la variedad de productos es en gran medida estable, en la cual se permiten solo algunas variaciones menores en dimensiones o detalles. Su uso no demanda un nivel específico de industrialización en su producción, y son aptos para proyectos de carácter tradicional.
- Sistemas abiertos: está conformado por elementos de origen diverso, adecuados para ser instalados en diferentes tipos de obras, ya sean industrializadas o no. Generalmente, utilizan juntas que pretenden ser universales, rangos modulares limitados y ofrecen una flexibilidad en la mayoría del diseño.

- Sistemas tipo mecano: son el resultado de la evolución de los sistemas cerrados, diseñados para ser combinados en diversas soluciones ofrecidas por diferentes fabricantes.

7.2 Introducción al sistema constructivo Tilt-Up

Los paneles o muros de concreto, que pueden ser de carga o no, tienen la opción de incorporar un aislamiento interno. Estos componentes se utilizan tanto para fines arquitectónicos como estructurales, lo que permite diversas aplicaciones en la construcción. Los paneles de concreto prefabricado se pueden conectar a estructuras tanto vertidas *in situ* como a estructuras prefabricadas o metálicas, lo que da lugar a lo que se conoce como estructuras mixtas.

Desde el punto de vista estructural, estos paneles están diseñados para soportar cargas laterales causadas por sismos o vientos. También se les conoce como muros de corte y constituyen el sistema principal de resistencia sísmica más común en la industria.

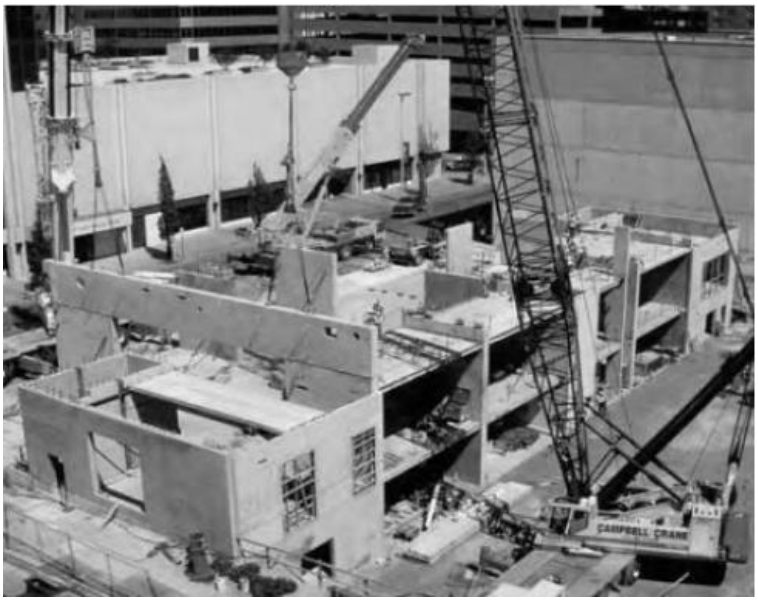
En estos sistemas, los muros de corte funcionan como vigas verticales en voladizo, las cuales se encargan de transferir las cargas laterales del piso hacia la fundación. Debido a las exigencias en cuanto a conexiones, dimensiones, tolerancias y detalles del refuerzo, es necesario fabricar sus componentes de manera horizontal en las plantas de fabricación, para asegurar la resistencia ante las cargas laterales.

La colocación de estos elementos constructivos en la obra se realiza por medio de maquinaria pesada, principalmente grúas, las cuales aseguran el correcto manejo y unión de las conexiones. Debido a esto, al momento de

diseñarlos se tienen que tomar en cuenta los puntos de izaje en cada muro y reforzarlos para que no sufran daños significativos (Carreño, 2015).

Figura 1.

Paneles prefabricados y su montaje en edificaciones



Nota. La figura presenta una estructura conformada por panales o muros de concreto prefabricado. Obtenido de A. Carreño (2015). *Estudio de la prefabricación en concreto reforzado y su influencia en la construcción de estructuras en Colombia.* (p. 23) Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

7.2.1 Definición de los muros Tilt-Up

Es una técnica constructiva que consiste en moldear los elementos de concreto en posición horizontal en el lugar de construcción y luego levantar cada uno de estos elementos, desde un extremo hasta colocarlos en su posición final dentro de la estructura.

Como indica Silva (2024), el sistema Tilt-Up permite la construcción de muros de concreto *in situ,* utilizando paneles delgados que se funden directamente sobre la losa de piso de una estructura o en una plataforma abajo. Cuando cada panel alcanza la resistencia requerida, se levanta con una grúa y se coloca sobre la cimentación, formando la fachada del edificio.

Según Dayton Superior (2016), este es un método de construcción rápido, sencillo y económico, que se ha empleado extensamente para edificaciones de uno o varios niveles. Hoy en día se están construyendo y colocando muros de hasta 4 pisos de altura utilizando esta técnica. Además, se han registrado casos en los que se han utilizado estos muros para levantar estructuras de hasta 6 pisos mediante el método Tilt-Up.

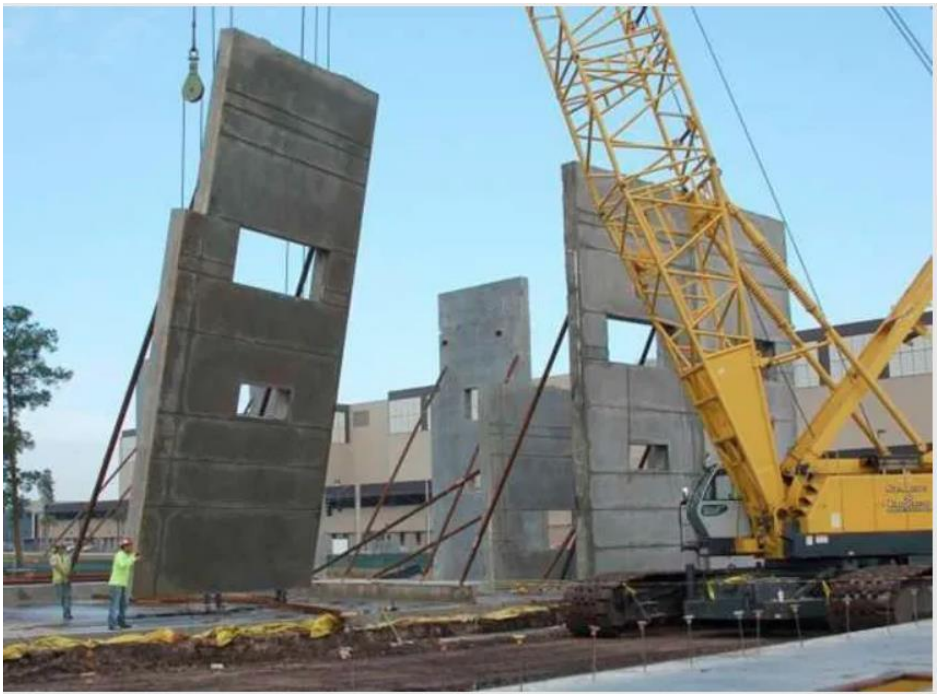
La principal ventaja económica del sistema Tilt-Up radica en su facilidad de construcción. Los aspectos cruciales de este método ocurren durante la fase de planificación previa a la construcción. La capacidad para diseñar secuencias seguras de montaje de estos elementos, las cuales optimicen el tiempo de uso de la grúa, es esencial para asegurar una finalización eficiente y segura del proyecto.

El proceso de construcción de los muros Tilt-Up es relativamente simple, pero exige personal experimentado y bien capacitado para llevar a cabo las diversas etapas. Primero se deben recibir y revisar cuidadosamente los planos de construcción aprobados, prestando especial atención a los sistemas de conexión entre la cimentación y los muros, entre los muros mismos, y entre los muros y la estructura cubierta.

Para realizar el izaje de los muros es necesario instalar insertos para facilitar el proceso. La posición y cantidad de estos insertos dependerán del método de montaje y de las fuerzas a las que el muro estará sometido durante la etapa de apuntalamiento. Durante esta fase, también se deben verificar las ubicaciones y características de los vanos para las puertas, ventanas, accesorios, instalaciones domiciliarias y cualquier otra abertura solicitada, las cuales se indican y se funden sin refuerzo estructural adicional.

Figura 2.

Sistema constructivo Tilt-Up



Nota. La figura muestra el izaje de un muro realizado por el sistema constructivo Tilt-Up. Obtenido de O. Silva (2024). *El Tilt-Up y las edificaciones industriales*. (p. 10) 360 En Concreto.

7.2.2 Proceso constructivo de los muros Tilt-Up

Como se indicó anteriormente, el procedimiento para implementar muros Tilt-Up en una construcción es prácticamente sencillo, pero requiere de personal capacitado y con un alto nivel de experiencia para la realización de las diferentes etapas, para asegurar el correcto posicionamiento del muro y los elementos que lo componen. El proceso constructivo de estos muros consta de varias etapas, las cuales se detallan a continuación.

- Preparación de placas, chaflanes y molduras

En esta fase, se reciben los planos aprobados para la construcción y es necesario revisar las placas de conexión entre el muro y la cimentación, así como las placas de conexión entre muros y las placas que sostendrán la estructura del techo. Sin importar sus dimensiones, existen dos tipos de placas: las que se conectan con el refuerzo del muro y las que quedan embebidas en el concreto. Para elevar los muros Tilt-Up, es fundamental contar con elementos que permitan su levantamiento, conocidos como insertos (Perrilliat y Huerta, 2014).

Cabe recalcar que la posición y la cantidad de insertos va de la mano con el tipo de montaje y de los procesos a que estará sometido el muro al momento de apuntalarlos. Finalmente, también se deben verificar los chaflanes y molduras. Es importante mencionar que se dejarán vanos para instalar puertas, ventanas, entre otros sistemas de tuberías (Perrilliat y Huerta, 2014).

- Preparación del área de trabajo, cimbrado y armado

Esta preparación implica acondicionar una zona completamente limpia y nivelada. Sobre esta se colará el muro, cuya cara inferior será luego la fachada, generalmente en el interior de la nave. Debido a esto, es crucial que la superficie esté libre de imperfecciones, ya que esta área es el firme de la nave y cualquier defecto será reflejado (Perrilliat y Huerta, 2014).

Esta área se coloca sobre una subbase preparada y al mismo tiempo se realiza la colocación de concreto en la cimentación perimetral, la cual servirá de apoyo de los muros. Esta consiste en una serie de zapatas corridas que deben contener las placas de conexión necesarias. Después se construye la plataforma de colado, quedando expuesta a la intemperie. Este proceso se retomará en la etapa final (Perrilliat y Huerta, 2014).

Figura 3.

Cimentación de un muro Tilt-Up y habilitado de cimbras antes del colado



Nota. La figura muestra una cimentación típica en la cual se colocarán los muros y la cimbra en que se realizará el colado del concreto para los muros Tilt-Up. Obtenido de R. Perrilliat y C. Huerta (2024). *Muros estructurales prefabricados Tilt-Up para naves industriales.* (p. 33) Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto.

En el proceso de habilitación del molde o cimbra para el colado es necesario colocar bordes en las áreas donde se dejarán los vanos para puertas y ventanas. Así mismo, la superficie debe ser preparada con aditivo antiadherente para reducir los esfuerzos de succión durante el izaje (Perrilliat y Huerta, 2014).

Luego, sobre la cimbra instalada, se procede al habilitado y colocación del armado de acero de refuerzo, la cual se distribuirá en una o dos caras, esto depende del espesor y altura del muro. Además, se debe añadir refuerzo en las áreas que requieran de mayor resistencia. Posteriormente, se procede a colocar las placas, las cuales serán de apoyo al momento de que la grúa realice el izaje. Se debe verificar la posición de cada una especificada en los planos de construcción (Perrilliat y Huerta, 2014).

- Colado de muros

Antes de realizar esta etapa, se recomienda llevar un proceso de trabajos previos de limpieza, debido a que durante la colocación del armado y las molduras suelen quedar residuos que pueden afectar la calidad del concreto (Perrilliat y Huerta, 2014).

Una vez realizados los trabajos anteriores, se procede al vaciado del concreto. Es de vital importancia verificar que el concreto cumpla con los requicitos de resistencia y revenimiento, ya que son factores cruciales para el fraguado y pulido del concreto. El vibrado del concreto debe ejecutarse correctamente para reducir las contracciones durante el proceso de fraguado de los muros (Perrilliat y Huerta, 2014).

Figura 4.

Proceso de vibrado y terminado de un muro Tilt-Up



Nota. En esta imagen se muestran los trabajos finales después del colado del muro. Obtenido de R. Perrilliat y C. Huerta (2024). *Muros estructurales prefabricados Tilt-Up para naves industriales.* (p. 34) Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto.

- Preparación para el izaje de muros Tult-Up

En esta etapa se colocan las placas de cimentación, verificando que estén correctamente posicionadas en la corona de esta. Posteriormente se prepara el terreno donde se desplazará la grúa, debiéndose ubicar el lugar donde se colocará para realizar el izaje (Perrilliat y Huerta, 2014).

Finalmente se procede a la instalación de las ménsulas para soportar las armaduras principales de la cubierta, este proceso requiere de un topógrafo que determine los niveles correctos, evitando problemas no deseados posteriormente. Es importante mencionar que se debe dejar una franja del muro sin colar, la cual pertenecerá al piso, esto se logra colocando un armado en el

piso y uniéndolo con las preparaciones de varilla que se dejaron colocadas en el muro (Perrilliat y Huerta, 2014).

- Colocación de apuntalamientos, cables e izaje de muros

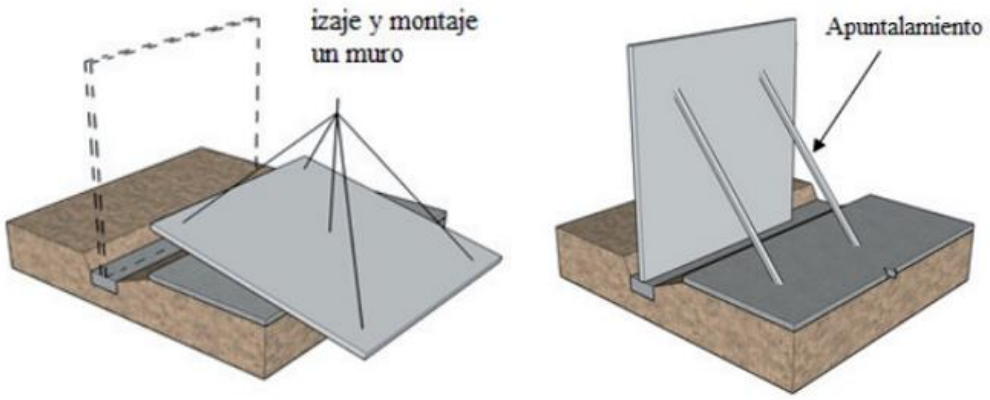
Una vez que los insertos estén ubicados en la pieza, se procede a instalar el apuntalamiento, este generalmente se coloca con un ángulo entre 45 y 60 grados, dependiendo los requisitos de diseño. Es de destacar que este proceso debe estar diseñado para resistir acciones, a las cuales puede estar expuesta la estructura en el proceso de construcción, ya sean cargas de viento y en algunos casos cargas de sismo (Perrilliat y Huerta, 2014).

Una vez el concreto alcanza la resistencia necesaria para soportar los trabajos que se realizan durante el izaje del muro con la grúa, se procede a realizar el montaje, prestando atención al manejo de todos los elementos para evitar la aparición de grietas o fallo del panel (Perrilliat y Huerta, 2014).

Finalmente, una vez que los muros se encuentren colocados en la posición final, se colocan las conexiones, las cuales darán estabilidad en el muro, manteniendo el apuntalamiento hasta que se complete la estructura interna de la nave (Perrilliat y Huerta, 2014).

Figura 5.

Proceso de izaje y apuntalamiento de un muro Tilt-Up



Nota. En esta imagen se muestra el proceso de izaje y apuntalamiento de los muros Tilt-Up. Obtenido de R. Perrilliat y C. Huerta (2024). *Muros estructurales prefabricados Tilt-Up para naves industriales.* (p. 35) Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto.

- Retiro de puntales, resanes y pintura

Esta última etapa comienza con el retiro de puntales, una vez la estructura del techo esté definitivamente unida a los muros y la franja perimetral está colada. Se realiza el redane de las conexiones de apuntalamiento, y se corrige cualquier porosidad o errores en el colado y se arreglan las molduras. Finalmente se aplica puntura sobre los muros, realizándoles una limpieza previa para que no afecten su adherencia (Perrilliat y Huerta, 2014).

7.2.3 Diseño de paneles de concreto Tilt-Up por método ACI 551 y ACI 318

En Norteamérica hay registro de construcciones de concreto Tilt-Up, durante un periodo mayor de 100 años, pero hace en 1990 el ACI 318 abordó requisitos específicos para diseño de muros de concreto esbeltos. La guía de diseño para paneles de concreto Tilt-Up ACI 551 proporciona un procedimiento específico para diseñar este tipo de elementos, tomando criterios del ACI 318, abarcando la sección 14.8, y de la Asociación Española de Científicos SEI7.

Todos los criterios de diseño especificados en el ACI 551 se detallan a continuación.

7.2.4 Conceptos de análisis para muros de concreto esbeltos

Para realizar el diseño adecuado de los muros de concreto Tilt-Up es necesario conocer diferentes conceptos y parámetros, los cuales están especificados en el *Código ACI 551,* tomando como fundamento otros códigos de construcción como el ACI 318.

- Modelo de diseño de paneles

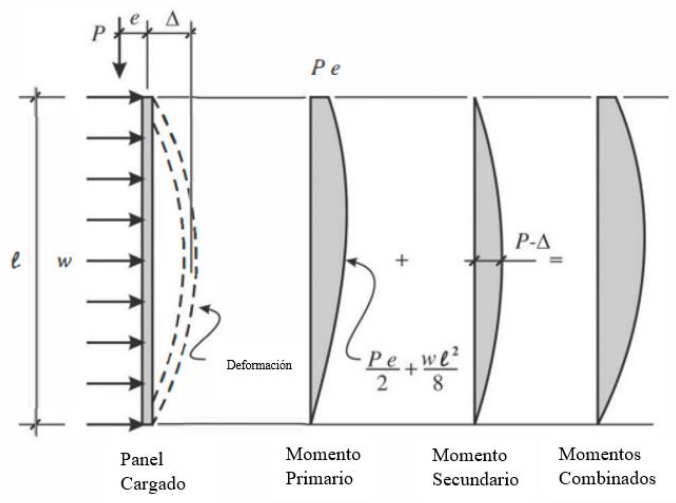
Los paneles Tilt-Up de concreto generalmente actúan como elementos estructurales, los cuales soportan cargas y se extienden verticalmente desde la cimentación o la losa de piso, hasta los pisos intermedios. Se generan momentos de flexión debido a varios tipos de carga, ya sean axiales excéntricas, fuera del plano o una combinación de estas. Los efectos de flexión de segundo orden, que resultan de una carga axial aplicada sobre un panel desviado, aumentan estos momentos, se les conoce también como efectos P-Δ.

Cuando se produce el momento de flexión máximo factorizado, se produce una falla por resistencia última, aproximadamente a media altura del panel, y supera la resistencia nominal de la sección de concreto, la cual fue afectada por un factor de reducción. Este momento flector máximo se puede dividir en dos componentes:

- Momento primario, el cual se debe al sometimiento del muro ante cargas.
- Momento secundario, el cual se debe a los efectos P-Δ.

Figura 6.

Modelo de diseño de panel-fuerza de succión con carga axial excéntrica



Nota. En esta imagen se muestra el momento primario y momento secundario de un muro esbelto de concreto. Obtenido de American Concrete Institute (2015). *ACI 551.2R, A. C. Design guide for Tilt-Up concrete panels.* (p. 55) ACI Committee.

Como se ilustra en la imagen, los momentos primarios son generados al momento de aplicar cargas laterales, ya sean sísmicas o de viento, y cargas axiales excéntricas. El momento generado a mediana altura es el que se toma en cuenta al momento del análisis, por lo general, es en ese punto donde se obtiene el valor máximo. El momento primario se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$Momento\ primario = \frac{Pe}{2} + \frac{wl^2}{8} \quad (1)$$

La deflexión de estos elementos estructurales básicamente depende de la rigidez que desempeñen al ser sometidos a flexión, puede ser complicada de determinar, ya que es afectada por diferentes factores:

- Resistencia a la compresión del concreto
- Resistencia a la tracción del concreto
- Área de refuerzo de acero
- Carga axial aplicada
- Curvatura de flexión
- Espesor de pared
- Ubicación del refuerzo de acero en el muro

Las propiedades que presenta una sección de concreto al ser sometida a flexión tienen una tendencia no lineal, con respecto al aumento del momento. A medida que se presentan cambios de compresión axial y cambios en el grado de curvatura en flexión, se producen variaciones en la resistencia y la rigidez de los paneles. Al momento que aumenta la curvatura, sucede lo mismo con el momento flexionante, hasta que se produce el fallo por aplastamiento en el concreto o en la fluencia del acero.

Sin embargo, en la mayoría de ocasiones, la rigidez de los paneles al ser sometidos a flexión permanece constante en curvaturas pequeñas, ocurre lo contrario cuando se agrieta por medio de la tensión, ya que la rigidez recae en gran medida.

- Evaluación de la rigidez en flexión

La relación entre el momento de flexión máximo y la deflexión lateral máxima se puede representar utilizando la siguiente ecuación:

$$K_b = \frac{M_{max}}{\Delta_{max}} \tag{2}$$

Se puede utilizar un valor constante para la rigidez de flexión, esto simplifica considerablemente el cálculo de la deflexión y el momento final de flexión, esta acción ofrece resultados razonables y conservadores para el rango de cargas esperadas.

Cuando estos muros están sometidos a una carga lateral uniforme y se encuentran simplemente apoyados, el momento máximo ocurrirá en el punto medio de la altura y la deflexión máxima se determinará mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta_{max} = \frac{5wl^4}{384E_cI_e} = \frac{5M_{max}l^2}{48E_cI_e} \tag{3}$$

Donde:

$$M_{max} = \frac{wl^2}{8} \tag{4}$$

7.2.5 Condiciones de carga

El *Código ACI 551* hace referencia a las diferentes condiciones que pueden ser soportadas por los paneles Tilt-Up, las cuales se detallan a continuación.

- Cargas laterales

Las cargas laterales, como las de viento, suelo y sismos, suelen ser las que más influyen en el momento de flexión de los paneles Tilt-Up, aplicándose de forma distribuida sobre ellos:

  - Cargas sísmicas: las aceleraciones sísmicas producen fuerzas inerciales que se representan como presiones para el diseño de paneles. Los paneles Tilt-Up necesitan una fuerza de diseño sísmico mayor que la del edifico en general, y esta fuerza puede ser superior a la de presión del viento, especialmente en paneles más gruesos.
  - Cargas de viento: la presión de viento en edificios bajos se calcula como la diferencia entre presiones externas e internas.
  - Presiones laterales del suelo: los paneles Til-Up pueden soportar presiones laterales del suelo, que pueden ser significativas cuando se consideran los efectos de sobrecarga. Esto implica que los paneles deben ser más gruesos y reforzados, y que las conexiones y cimientos deben resistir estas cargas.

- Cargas axiales

Las cargas verticales de los techos o pisos pueden tratarse como cargas lineales uniformemente distribuidas en el diseño de los paneles. La excentricidad de estas cargas debe calcularse según las condiciones de apoyo y medirse desde el centroide de la sección de concreto. Es recomendable que la excentricidad mínima de la carga axial sea la mitad del grosor del panel. Esta excentricidad de la carga no se utiliza para reducir los efectos causados por las cargas laterales.

- Peso propio del muro

El peso propio del panel debe ser considerado, debido a su notable influencia en los momentos P-Δ en paneles delgados. Este peso puede ser tratado como una carga axial concentrada, sin excentricidad, situada en el centroide del panel a la altura media.

7.2.6 Refuerzo mínimo

Los paneles de concreto Tilt-Up enfrentan menos problemática asociada con los cambios de temperatura y contracción, en comparación con las estructuras monolíticas de concreto colado en sitio, gracias a su estructura segmentada. Como estos paneles generalmente se moldean y colocan en un periodo de 1 a 2 semanas, conectar los paneles demasiado pronto puede generar tensiones y grietas, por lo que es recomendable retrasar estas conexiones y reforzar más en la dirección de la restricción.

En los edificios con paneles prefabricados, cada junta puede funcionar como una junta de expansión, permitiendo que se instalen paneles continuos sin necesidad de ajustes específicos para la expansión o contracción térmica. Sin embargo, conectar todas las juntas verticales de manera innecesaria puede provocar una restricción excesiva y causar grietas. Las diferencias de humedad y temperatura entre las caras interna y externa del panel pueden generar deformaciones, las cuales se pueden manejar agregando una deflexión inicial en el diseño uniendo las esquinas con conectores metálicos soldados.

- Disposiciones ACI 318

El refuerzo horizontal en los muros Tilt-Up suele basarse en los requisitos mínimos para contracción y temperatura, que se determinan mediante un análisis estructural exhaustivo. Estos requisitos pueden no ser necesarios si el análisis confirma que los muros cumplen con las especificaciones de ACI 318-11. Si una pared resiste fuerzas de corte en su plano y el corte factorizado supera la mitad de la capacidad de corte de concreto, es necesario incluir refuerzo tanto horizontal como vertical.

Los muros Tilt-Up, según American Concrete Institute (2011), deben cumplir con las disposiciones de refuerzo mínimo establecidas en el capítulo 14.3, que también regula la cantidad de capas de refuerzo y el refuerzo necesario alrededor de las aberturas. Es fundamental controlar las grietas, especialmente en entornos expuestos o corrosivos, asegurándose cumplir con los límites de deflexión especificados en ACI 318-11, 14.8.4.

En cuanto a diseño sísmico, los muros se dividen en varios sistemas de resistencia a fuerzas sísmicas, como muros estructurales ordinarios, muros prefabricados intermedios, muros estructurales especiales y muros especiales

de concreto prefabricado, cada uno con sus propios requisitos de refuerzo y diseño. Es importante revisar a fondo las especificaciones de refuerzo en el *Código ACI 318-11* para cada tipo de muro.

7.2.7 Control de deflexiones

Las deflexiones laterales en muros esbeltos han sido motivo de preocupación, debido a los efectos P-Δ y al riesgo de deformación a largo plazo. Sin embargo, en la práctica, estas deflexiones prolongadas no han generado problemas importantes, ya que las fuerzas laterales que generan flexión son generalmente temporales, y la carga axial junto con el peso propio del concreto permite que se comporte como una sección intacta bajo cargas de viento. Además, las pruebas realizadas en muros esbeltos con cargas axiales bajas y fuerzas sísmicas cilcicas no evidencian inestabilidades considerables.

- Fluencia y deflexiones iniciales

Las deflexiones iniciales de los paneles pueden ser causadas por diversos factores, como superficies de colado desigual, flexión excesiva durante el proceso de levantamiento, variaciones térmicas o contracción desigual. Estas deflexiones pueden producir efectos P-Δ, que disminuyen la capacidad axial del muro de forma no lineal. El ACI 117 establece tolerancias para estas deformaciones iniciales, limitando la deflexión máxima a 1 pulgada (25 mm). Otras causantes de agravar la curvatura inicial de panel son las cargas no equilibradas, ubicaciones desiguales de refuerzo, variaciones en el grosor del panel y diferencias de temperatura.

- Fluencia y deflexiones iniciales

Los límites de deflexión fuera del plano para muros inclinados son esencialmente para prevenir deformaciones elásticas excesivas, debido a cargas permanentes y deformaciones residuales por respuestas inelásticas. Las pruebas muestran que los paneles expuestos a cargas axiales pequeñas y fuerzas laterales grandes, como vientos o sismos, pueden experimentar un aumento rápido en la deflexión, cuando el momento inducido supera 2/3 del momento crítico. Esto puede resultar en una deflexión permanente, que causa excentricidad y genera un momento P-Δ. Superar los límites elásticos puede llevar a deformaciones permanentes, y las cargas repetidas de magnitud similar pueden acumular deformaciones, lo que podría llevar al colapso.

Los límites de deflexión también protegen a los componentes no estructurales, como revestimiento de ladrillo, muros cortina, paneles de yeso y paredes interiores no portantes. La deflexión excesiva puede causar grietas, infiltración de agua y deformaciones en estos componentes, especialmente si ocurre después de su instalación.

Se recomiendan limites específicos de deflexión para evitar daños estructurales y no estructurales: L/100, L/200 cuando se trata de viento y L/150 cuando se trata de cargas sísmicas.

7.2.8 Procedimientos de diseño de paneles

Esta sección aborda las condiciones de diseño típicas para cargas verticales y transversales en paneles Til-Up.

- Paneles sólidos sin aberturas

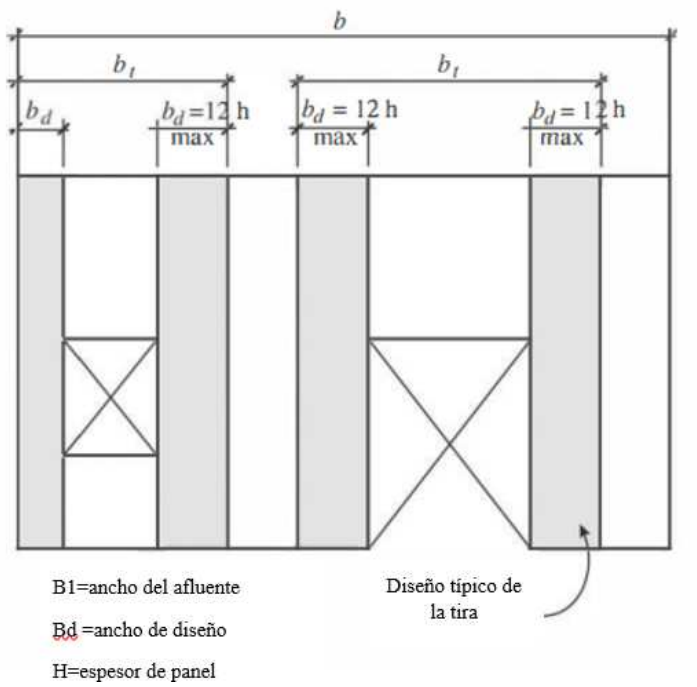
El diseño de paneles Tilt-Up sin aberturas se basa en un proceso de prueba y error, juntamente con experiencia. Los pasos principales incluyen: establecer la geometría del panel (altura, ancho y huecos), definir las cargas aplicadas (axiales y laterales), elegir un espesor inicial del panel (mínimo de l/50 para una capa de refuerzo o l/65 para dos capas), determinar el área de refuerzo y analizar las combinaciones de carga. Finalmente, se ajusta el espesor o el refuerzo para optimizar el diseño y cumplir con las deflexiones aceptables.

- Paneles con aberturas

El impacto de las aberturas en la flexión fuera del plano en los paneles Tilt-Up puede gestionarse mediante un análisis unidimensional de tiras, lo que garantiza un diseño preciso y eficiente. Las cargas laterales axiales, junto con el peso propio, se distribuyen entre los soportes o tiras de diseño a ambos lados de la abertura. Se sugiere que el ancho efectivo de la tira no exceda 12 veces el espesor del panel para evitar concentración de esfuerzos. Las propiedades de la tira deben mantenerse constantes en toda su altura, y el refuerzo no debe interrumpirse cerca de la abertura. En el caso de aberturas grandes es posible emplear secciones engrosadas.

Figura 7.

Tiras de diseño en las aberturas



Nota. En esta imagen se muestra los elementos primarios en las tiras de diseño de las aberturas en paneles Tilt-Up. Obtenido de American Concrete Institute (2015). *ACI 551.2R, A. C. Design guide for Tilt-Up concrete panels.* (p. 57) ACI Committee.

- Cargas axiales concentradas

El diseño de paneles con cargas axiales concentradas, como las provenientes de vigas de techo o piso, requiere asegurar una adecuada distribución de fuerzas en el área de conexión y considerar la capacidad de la franja de diseño vertical del panel. En caso de cargas muy grandes, es recomendable usar pilastras para aumentar el área de apoyo y rigidez. Los amarres alrededor del refuerzo vertical pueden ser necesarios cerca del punto de apoyo, aunque no siempre a lo largo de toda la altura.

- Cargas laterales concentradas

Las cargas laterales concentradas pueden originarse por elementos suspendidos, vigas superiores en aperturas grandes o fuerzas de viento y sismo. Se suelen analizar sumando los momentos generados on otros momentos de flexión, pero un análisis más detallado puede ser necesario para obtener una combinación adecuada de momentos para el refuerzo.

- Cargas laterales concentradas

Los paneles Tilt-Up generalmente se diseñan como elementos verticales simplemente apoyados. No obstante, cuando están conectados tanto a la losa del piso como a la zapata, se debe considerar cierta continuidad, lo que añade complejidad al análisis. Factores como deflexión en los soportes, la presión del suelo y las fuerzas laterales, complican el proceso de análisis. Por lo tanto, se sugiere adoptar un enfoque conservador en el diseño, utilizando un coeficiente de altura efectiva reducido para tener en cuenta las incertidumbres estructurales.

- Fundaciones aisladas o pilares

En algunas áreas geográficas, donde se tienen condiciones especiales de suelo o requisitos de profundidad por helada, se emplean fundaciones tipo pilar, normalmente situadas en las juntas de los paneles, lo que concentra las tensiones verticales en los bordes del panel. Estas fundaciones no eliminan la necesidad de proteger la base del panel contra el levantamiento, debido a la helada.

Las cargas verticales deben concentrarse en los pilares o zapatas, y el efecto de las zapatas aisladas puede ser despreciado si la altura del panel es significativamente mayor que la distancia entre zapatas. Puede ser necesario añadir refuerzos para prevenir fallos localizados. Los paneles deben diseñarse como vigas profundas entre pilares, con refuerzos horizontales adecuados, y los paneles con multiples aberturas deben ser diseñados para resistir tanto cargas axiales como laterales.

7.2.9 Corte en el plano

El diseño para corte en el plano sigue procedimientos distintos a los de flexión fuera del plano. Las fuerzas que actúan paralelas al plano de la pared, provenientes de los diafragmas del techo o del piso, generan tensiones de corte y momento de vuelco en los paneles. En áreas con alta actividad sísmica o vientos fuertes, los requisitos de corte en el plano pueden influir en el espesor del panel y el diseño del refuerzo.

A continuación se detallan las consideraciones para el diseño de muros Tilt-Up cuando se someten a fuerzas en el plano:

- Resistencia al vuelco del panel

Cuando las fuerzas paralelas al plano de los paneles Tilt-Up se aplican desde los diafragmas del techo y del piso, se producen momentos de vuelco y corte en el plano. Estos momentos de vuelco tienden a concentrarse cerca de una esquina exterior del panel. La resistencia al vuelco se logra mediante el peso del panel, las cargas de los diafragmas, los conectores en los bordes y los anclajes a las fundaciones.

El punto de rotación se encuentra cerca de la esquina exterior del panel, en el centro del área de apoyo de la zapata. Normalmente, se considera que el ancho de apoyo es nulo, por lo que es necesario verificar tanto presiones en la zapata como su capacidad para manejar estas concentraciones de fuerza.

Las fuerzas y pesos que contrarrestan el vuelco deben ajustarse según los factores de combinación de carga especificados en el *Código ACI 318*, sin requerir un factor de seguridad adicional. Si la capacidad para resistir el vuelco no es suficiente, se pueden incorporar conexiones o anclajes. También es necesario que las conexiones a la fundación cumplan con los requisitos de ductilidad especificados en el ACI 318.

- Resistencia al deslizamiento

La resistencia al deslizamiento en los paneles se obtiene mediante la fricción entre la base del panel y la zapata, junto con conexiones adicionales como refuerzos empotrados o soldaduras. Usualmente, se considera un coeficiente de fricción de 0.6. En el caso de las fuerzas sísmicas, ciertos códigos de construcción pueden no aceptar la fricción como método de resistencia y requieren conexiones obligadas entre el panel y la losa o zapata. También es importante verificar la fricción con el suelo y consultar a un ingeniero geotécnico.

- Resistencia al corte del concreto

En los capítulos 11 y 12 del *Código ACI 318,* se establece la resistencia al corte que deberán presentar las secciones de concreto. En el capítulo 11 también se indica que en las secciones de concreto se requiere un refuerzo mínimo para el corte, este deberá ser menor al refuerzo requerido contra

temperatura y retracción en muros. Además, indica que, para muros estructurales especiales sometidos a fuerzas de sismo, no deberá ser menor que 0.0025 Ag.

- Ductilidad sísmica

Las fuerzas laterales de diseño en zonas sísmicas solo representan una fracción de la energía total que se aplica a una estructura. Los elementos principales deben soportar la deformación sin llegar al fallo y deben tener capacidad de absorber la energía sísmica, lo que se conoce como ductilidad sísmica. Los edificios Tilt-Up a menudo cuentan con muros de corte perimetrales y diafragmas horizontales en el techo y en el piso.

Los paneles rectangulares sin aberturas tienden a ser más rígidos y pueden resistir fuerzas mayores a las especificadas, aunque se pueden añadir anclajes y conectores para mejorar su ductilidad. Si no se puede proporcionar ductilidad sísmica, el concreto debe ser lo suficientemente resistente para soportar toda la fuerza sísmica.

En áreas de alta sismicidad, los muros Tilt-Up se clasifican como intermedios o especiales y están sujetos a mayores requisitos de diseño. El ACI 318 ofrece directrices sobre el uso de muros de concreto estructurales y cómo los diafragmas y muros influyen en el diseño de la cizalladura en el plano.

- Diseño de marco en el plano

La tendencia en los edificios Tilt-Up es aumentar el número de aberturas en los paneles, especialmente en los comerciales. Debido a que estos paneles son menos rígidos que los sólidos, deben ser diseñados como marcos en lugar

de muros de corte. ACI 318 ofrece pautas para clasificar estos segmentos de muro como marcos o muros de corte. Los pilares estrechos pueden funcionar como elementos de transición entre muros de corte y columnas de marco.

Cuando los segmentos de muro se vuelven más cuadrados o delgados, actúan más como marcos que como muros de corte rígidos, lo que hace que la ductilidad flexural sea más crucial. Los pilares de muro en muros estructurales especiales deben ser diseñados para que fallen por flexión antes que por cizalladura. El refuerzo debe ser suficiente para alcanzar el momento máximo probable y asegurar un fallo más dúctil.

En algunos casos, los segmentos que se consideran columnas de marco pueden no ser esenciales para la resistencia sísmica global y su contribución puede ser omitida si no son necesarios para el soporte de gravedad del muro.

- Análisis lateral de paneles unidos en el plano

Los mecanismos de transferencia entre paneles afectan el diseño de conexiones y la deformación requerida. El diseño debe asegurar el equilibrio y la ductilidad para evitar fallos frágiles, como la ruptura del concreto o el acero. Los cuatro modelos principales para transferir las cargas son:

  - Teoría de elasticidad tradicional
  - Estribo y viga
  - Inelástica general
  - Solo cizalladura

7.2.10 Conexiones para paneles Tilt-Up

Las conexiones deben diseñarse para resistir fuerzas de igual o mayor magnitud que recibe el panel, estos diseños deben cumplir con lo especificado en los códigos ACI 318 y AISC 360. Para paneles resistentes a fuerzas sísmicas, pueden ser necesarios requisitos de ductilidad según los códigos de construcción.

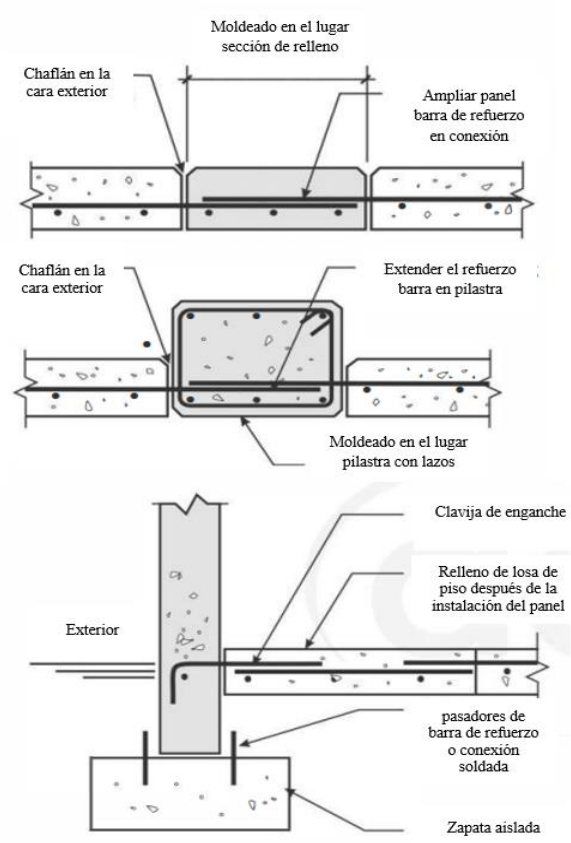
- Tipos de conexión

Existen 3 tipos de conexión, considerados como principales, que pueden ser utilizados en paneles Tilt-Up:

  - Concreto colado *in situ:* estas conexiones son fuertes y permiten distribuir cargas, pero pueden ser costosas y provocar problemas como grietas, debido al retraimiento del concreto. La ductilidad es buena si las barras están bien confinadas.

Figura 8.

Panel de relleno, pilastra y relleno de losa de piso



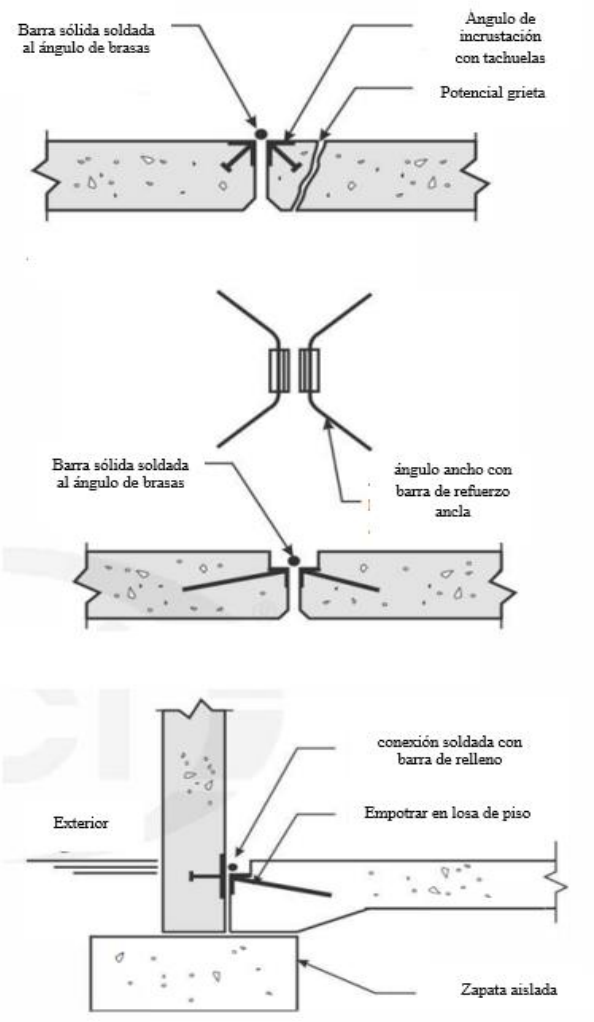
Nota. En esta imagen se muestra las uniones coladas *in situ* más comunes que se utilizan en paneles Tilt-Up. Obtenido de American Concrete Institute (2015). *ACI 551.2R, A. C. Design guide for Tilt-Up concrete panels.* (p. 59) ACI Committee.

- Metal embebido soldado: este tipo de unión es una opción común por su bajo costo y versatilidad. Su resistencia y ductilidad varían según la profundidad del embebido y disposición del anclaje. Las placas de acero con pernos funcionan bien, siempre que estén suficientemente alejadas de los bordes del panel para prevenir fallos frágiles. Además, tensiones provocadas por el retraimiento

del concreto pueden generar fallos en conexiones frágiles, como las placas de cizalladura con pernos cortos.

Figura 9.

Conector de tachuelas, conector con barra de refuerzo y conexión soldada



Nota. En esta imagen se muestra las uniones de metal embebido soldado más comunes que se utilizan en paneles Tilt-Up. Obtenido de American Concrete Institute (2015). *ACI 551.2R, A. C. Design guide for Tilt-Up concrete panels.* (p. 60) ACI Committee.

- Anclajes postinstalados: los anclajes postinstalados son frecuentemente usados en construcciones Tilt-Up, sobre todo cuando los anclajes embebidos no están bien posicionados. No obstante, pueden fallar en paneles delgados si se colocan cerca de los bordes. Los sujetadores deben cumplir con lo especificado en el *Código ACI 318.*

- Consideraciones de diseño

En el sistema Tilt-Up, el diseño explícito de juntas de concreto vaciado *in situ* generalmente no se considera, salvo en regiones sísmicas o donde se requieran detalles específicos de conexión muro y cimentación, muro y losa, o muro y muro. En áreas con baja o moderada sismicidad, es esencial aplicar buenas prácticas en el detallado del concreto. Esto implica tener en cuenta la geometría del refuerzo, asegurar un recubrimiento y espaciado, apropiados para prevenir problemas de corrosión y consolidación, garantizar el correcto desarrollo del refuerzo conforme a ACI 318, y confinar adecuadamente el concreto en zonas con alta deformación esperada del refuerzo.

El anclaje de acero al concreto puede presentar desafíos en términos de construcción y rendimiento, dado que cualquier deficiencia en el detallado puede afectar su capacidad. Los fallos no dúctiles no permiten la redistribución de cargas inesperadas, lo que puede llevar a fallos repentinos. Es esencial enfocarse en conexiones críticas, especialmente cuando hay poca redundancia.

Según American Concreta Institute (2015), en el ACI 551.2R, en las construcciones Tilt-Up hay 3 factores principales a considerar para el diseño de anclajes:

- Bordes libres de concreto
- Grosor reducido del concreto
- Conexiones en campo

Los anclajes pueden fallar a cargas imprevistas, algunas veces estas cargas pueden ser menores a las que se habían previsto. Según American Concrete Institute (2015), entre las acciones de carga no deseadas se encuentran:

- Fuerzas acumuladas durante el soporte del panel que se liberan al momento de quitarlos.
- Cargas axiales que se generan por la restricción de los cambios de temperatura y contracción.
- Momentos que se generan por la rigidez flexional en conexiones.
- Conexiones de cizalladura con excentricidades.

7.2.11 Requisitos de construcción

El *Código ACI 551* proporciona pautas donde se establecen los requisitos de construcción y aspectos generales sobre los materiales, los cuales se encuentran detallados a continuación.

- Tolerancias de encofrado y construcción

Las tolerancias de construcción, según ACI 318, suelen ser superiores a las de los paneles de concreto colado en sitio. Esto es porque los paneles se moldean horizontalmente sobre una losa o superficie de colado, lo que disminuye los problemas de alineación y deformación. Las tolerancias están

entre las del concreo colado en sitio y el prefabricado en fábrica. Se recomiendan las siguientes tolerancias para utilizarlas en sistemas Tilt-Up:

Tabla 1.

Tolerancias recomendadas para su uso en la industria Tilt-Up

Longitud y altura	**Rectitud o asimetría**
Hasta 10 ft (3 m) + 0 a -1/2 in (13 mm)	Hasta 10 ft (3 m) ± 1/2 in (13 mm)
10 a 20 ft (3 a 6 m) + 0 hasta -1/2 in (13 mm)	10 a 20 ft (3 a 6 m) ± 5/8 in (16mm)
Arriba de 20 ft (6m) + 0 hasta -5/8 in (16mm)	20 a 40 ft (6 a 12 m) ± 3/4 in (20 mm)
Espesor: Total ± ¼ in (6 mm)	

Nota. Esta tabla muestra las tolerancias recomendadas para longitud, altura y rectitud en paneles Tilt-Up. Obtenido de American Concrete Institute (2015). *ACI 551.2R, A. C. Design guide for Tilt-Up concrete panels.* (p. 62) ACI Committee.

El recubrimiento de concreto sobre el refuerzo proporciona protección al acero frente a la corrosión y al fuego, además de mejorar su adherencia. La posición del refuerzo, determinada por el recubrimiento, influye en la rigidez del elemento, especialmente en estructuras delgadas. El ACI 318 contempla las variaciones en la colocación del refuerzo. En la construcción Tilt-Up, las tolerancias pueden igualar o superar las del concreto colado en sitio y acercarse a las del prefabricado en planta. El capítulo 7 del *Código ACI 318* especifica los requisitos mínimos de recubrimiento para concreto colado en sitio y prefabricado, con distancias mínimas aplicables en Tilt-Up cuando los bordes están expuestos a la intemperie.

Tabla 2.

Distancias mínimas de recubrimiento recomendadas

Exposición	Recubrimiento de concreto, in.
Concreto expuesto a tierra o a la intemperie	
Barra No. 9 (29 M) y mayor	1 – ½ (40 mm)
Barra No. 8 (25 M) y menor	1 (25 mm)
Concreto no expuesto a tierra o a la intemperie	
Barra No. 14 (43 M) y No. 18 (57 M)	1 – ½ (40 mm)
Barra No. 11 (36 M) y menor	3/4 (20 mm)

Nota. Esta tabla muestra las tolerancias recomendadas de recubrimiento de concreto y números de barras para paneles Tilt-Up. Obtenido de American Concrete Institute (2015). *ACI 551.2R, A. C. Design guide for Tilt-Up concrete panels.* (p. 63) ACI Committee.

- Concreto para paneles Tilt-Up

El concreto utilizado en paneles Tilt-Up debe tener la resistencia adecuada, tanto para su instalación como para su levantamiento. Se recomienda una resistencia mínima de 3000 psi (21 MPa), a los 28 días, y los insertos de elevación requieren al menos 2500 psi (17 Mpa), dentro de los primeros 3 a 5 días. Para evitar grietas durante el levantamiento, las mezclas deben estar formuladas para resistir flexión.

El uso de materiales cementantes adicionales puede retrasar el aumento de resistencia, afectando el levantamiento y el acabado. Aunque el aire incluido suele no ser necesario, puede reducir la resistencia si no se controla adecuadamente, aumentando el riesgo de grietas, aunque es útil en áreas propensas a la humedad.

Tabla 3.

Especificaciones recomendadas para el concreto

Propiedad del concreto	Valores
Resistencia a la compresión a los 28 días	3000 psi (21 MPa) mínimo
Resistencia a la flexión a los 28 días	500 psi (3.5 MPa) mínimo
Tamaño máximo del agregado	De 1 a ½ in (25 a 38 mm) Distancia mínima libre entre barras 3 in (76 mm) o mas ¾ a 1 in (19 a 25 mm) Distancia mínima libre entre barras menor a 3 in (76 mm)

Nota. En la tabla se muestra la resistencia del concreto a compresión y flexión a los 28 días, y el tamaño de los agregados p paneles Tilt-Up. Obtenido de American Concrete Institute (2015). *ACI 551.2R, A. C. Design guide for Tilt-Up concrete panels.* (p. 64) ACI Committee.

- Refuerzo de panel

Para los paneles Tilt-Up, se recomienda utilizar acero de refuerzo grado 60 (Grado 420), mientras que el grado 40 (grado 280), debe evitarse, ya que es difícil de obtener y puede causar confusión en la obra. Las barras verticales suelen ser Nro. 5 o Nro. 6, las barras Nro. 4 o Nro. 5 se emplean para refuerzo horizontal, y las barras Nro. 3 o Nro. 4 se utilizan para amarres y estribos. No se sugieren barras mayores a Nro. 6 en paneles de menos de 8 pulgadas de espesor. El ACI 551 recomienda tomar en cuenta estos puntos clave a la hora de realizar el diseño del refuerzo de los paneles.

  - Resistencia nominal vs. diseño: el uso de acero de alta resistencia puede incrementar la resistencia nominal, pero no siempre mejora la resistencia de diseño, e incluso podría reducirla.
  - Punto de fluencia: para aceros de alta resistencia, el punto de fluencia debe medirse a un 0.35 % de deformación en lugar del 0.2 % habitual.

- Comportamiento no lineal: reducir el área de acero con materiales de alta resistencia puede aumentar los momentos P-Δ, lo que podría requerir más acero, minimizando los ahorros esperados.
- Consideraciones de servicio: la resistencia de fluencia influye menos en la capacidad de servicio que el área y el módulo de elasticidad. Es fundamental controlar el agrietamiento en paneles expuestos, por lo que puede ser necesario aumentar el refuerzo para cumplir los requisitos de deflexión.

7.2.12 Diseño para levantar tensiones

El análisis de la elevación de paneles Tilt-Up y el diseño de los insertos de elevación son llevados a cabo por ingenieros especializados, quienes utilizan software especializado para calcular las tensiones y fuerzas durante el levantamiento. Como estas tareas no son parte del trabajo del ingeniero de obra, se recurre a expertos contratados directamente o a través de proveedores para que la realicen.

- Conceptos generales de elevación

La correcta colocación de los insertos de elevación es fundamental para manejar los paneles de concreto Tilt-Up de forma segura y eficaz. El principal objetivo al elevar un panel es evitar que se agriete. Dado que el acero de refuerzo se encuentra comúnmente en el centro del panel, las tensiones de tracción en el concreto pueden provocar agrietamiento si superan los límites de diseño.

Durante el proceso de elevación de un panel, desde una posición horizontal a una vertical, el panel enfrenta tensiones más altas que las que experimenta en su posición final. Las tensiones laterales de flexión son más críticas al inicio del levantamiento, y las tensiones verticales más altas se producen generalmente entre 30 y 50 grados desde la horizontal.

La carga en los insertos de elevación es particularmente importante cuando el panel está casi vertical y la grúa sostiene todo el peso, y también puede ser un problema al retirar el panel del techo colado debido a adherencias, succión o fuerzas dinámicas. Se recomienda un factor de 1.25 en el diseño de elevación para estas condiciones.

Los insertos deben ser ubicados de manera que reduzcan las tensiones durante el levantamiento, equilibrando los momentos de flexión positivos y negativos.

- Pasos para realizar el diseño de elevación

El diseño de elevación de paneles Tilt-Up, aunque ahora se realiza con apoyo de análisis computarizados, sigue un enfoque básico que incluye:

  - Determinar el peso del panel, haciendo ajustes por aberturas o recesos.
  - Identificar el centro de gravedad.
  - Establecer el mínimo de puntos de elevación necesarios, aplicando un factor de seguridad de 2.0 para compensar tensiones adicionales.
  - Posicionar los insertos de manera que coincidan con el centro de gravedad, facilitando la rotación.

- Evaluar y modificar las tensiones de flexión y la ubicación de los insertos.
- Comprobar la capacidad de tensión de los insertos, añadiendo un factor extra para prever fuerzas imprevistas.

8. HIPÓTESIS

Es posible evaluar el comportamiento sismoresistente en muros Tilt-Up prefabricados en naves industriales, siguiendo las especificaciones de diseño del *Código ACI 551.2R,* presentando un comportamiento estructural adecuado y encontrando los puntos más críticos de falla.

9. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES
LISTA DE SÍMBOLOS
GLOSARIO
RESUMEN
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA
OBJETIVOS
HIPÓTESIS
RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO
INTRODUCCIÓN

1. MARCO TEÓRICO
    1.1 Construcciones prefabricadas
    1.2 Introduccion al sistema constructivo Tilt-Up
        1.2.1 Definición de los muros Tilt-Up
        1.2.2 Proceso constructivo de los muros Tilt-Up
    1.3 Diseño de paneles de concreto Tilt-Up por método ACI 551 Y ACI 318
        1.3.1 Conceptos de análisis para muros de concreto esbeltos
        1.3.2 Condiciones de carga
        1.3.3 Refuerzo minimo
        1.3.4 Control de deflexiones
        1.3.5 Procedimiento de diseño de paneles
        1.3.6 Corte en el plano
        1.3.7 Conexiones para paneles Tilt-Up
        1.3.8 Requisitos de construcción

1.3.9 Diseño para levantar tensiones

2. METODOLOGÍAS DE EVALUACIÓN

2.1 Análisis estático en estructuras

2.2 Análisis dinámico en estructuras

2.2.1 Análisis modal espectral

2.2.2 Análisis tiempo-historia

2.3 Método a utilizar

3. DISEÑO DE MUROS PREFABRICADOS TILT-UP

3.1. Materiales por utilizar

3.2. Fuerzas actuantes

3.3. Diseño geométrico del muro

3.4. Diseño de acero de refuerzo

3.5. Diseño de conexiones

3.6. Diseño de insertos para levantado del muro

4. MODELADO DE NAVE INDUSTRIAL CON MUROS TILT-UP EN EL PROGRAMA ETABS

4.1. Dimensionamiento de elementos

4.2. Combinaciones de cargas (Norma NSE 2, capítulo 8)

4.3. Modelado de geometría e implementación de cargas

4.4. Integración de cargas de sismo (estático – dinámico)

4.5. Verificación y aceptación final de la estructura

5. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

CONCLUSIONES
RECOMENDACIONES
REFERENCIAS
ANEXOS

10. METODOLOGÍA

10.1 Características del estudio

La investigación es cuantitativa, realizando un análisis de datos por medio de un software especializado, estableciendo los lugares mas críticos en muros prefabricados Tilt-Up diseñados por medio de las especificaciones de un código de construcción extranjero que sea aplicable en el país.

El alcance de la investigación es descriptivo y explicativo, dado que se requiere llegar a la interpretación del comportamiento y diseño estructural de estos muros, adaptando las especificaciones de un código internacional a las normas nacionales, encontrando los puntos más críticos de falla.

El diseño de la investigación fue no experimental, debido a que no se usaron ensayos, ni prácticas de laboratorio para recolectar la información.

10.2 Unidades de análisis

La unidad de la presente investigación análisis se reduce al sistema constructivo prefabricado Tilt-Up, que se desea implementar en edificaciones con diferentes fines.

10.3 Variables

Las variables en estudio se describen a continuación.

Tabla 4.

Variables de estudio

Variable	Definición teórica	Definición operativa
Concreto	Material de construcción de gran resistencia compuesto por cemento, agregado grueso, agregado fino y agua.	Sera el encargado de soportar la mayoría de los esfuerzos a comopresión en la estructura.
Refuerzo estructural	Grupo de materiales de construcción, especialmente acero, que fortalecen las estructuras.	Encargado de soportar cargas y le dara flexibilidad y rigidez a la estructura.
Combinaciones de carga	Conjunto de cargas que actúan sobre las estructuras, afectadas por factores de seguridad.	Se definirán mediante el uso y ocupación de la estructura.
Sismos	Movimiento en el suelo causado por la liberación de energía por movimiento de las placas tectonicas	Causara daño a la estructura dependiendo su intensidad

Nota. Esta tabla muestra las variables de la metodología de investigación. Elaboracion propia, realizado con Microsoft Word.

10.4 Fases del estudio

Acontinuacion se describen las fases mediante las cuales se realizará el estudio:

- Fase 1: recopilacion de información en fuentes bibliográficas, consultando artículos y trabajos de investigación en los cuales se han empleado metodologías para evaluar el comportamiento sismoresistente en muros Tilt-Up prefabricados de concreto.

- Fase 2: determinar la metodología más adecuada que se apegue a la normativa nacional, enfocada en el comportamiento estructural sismoresistente de edificaciones.

- Fase 3: contando con la metodología adecuada, se procederá a la evaluación sismoresistente en una nave industrial que contendrá el diseño de los muros prefabricados de concreto Tilt-Up, con y sin aberturas, por medio de un modelo elaborado en el software especializado llamado ETABS.

- Fase 4: se interpretarán los resultados arrojados por medio del programa ubicando los puntos críticos y más propensos a fallar en los muros.

- Fase 5: se presentarán los resultados finales y lineamientos de diseño adaptados a la normativa guatemalteca.

11. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

Las técnicas de análisis de la información para la evaluación sismorresistente de muros prefabricados Tilt-Up en naves industriales son las siguientes:

Se recopilará información sobre los parámetros y especificaciones relacionadas al diseño sismoresistente de edificaciones utilizadas en Guatemala. Se consultarán los parámetros de diseño especificados en el *Código ACI 551* y se evaluará su aplicabilidad en Guatemala.

Posteriormente se realizará el diseño de un sistema de muros prefabricados Tilt-Up, siguiendo las especificaciones del *Código ACI 551,* para colocarlos en una nave industrial, con todos los parámetros necesarios que cumplan con la normativa guatemalteca.

Finalmente se realizará la evaluación del comportamiento estructural de este sistema, integrándolo y modelándolo en el software de diseño ETABS, analizando los puntos más críticos que son afectados al momento de un sismo.

12. CRONOGRAMA

En la siguiente tabla se presenta la organización cronológica de la investigación, la cual tendrá una duración de 5 meses.

Tabla 5.

Cronograma del proceso investigativo

	Actividades a realizar	Mes No.1				Mes No.2				Mes No.3				Mes No.4				Mes No.5			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	Recopilación de información	■																			
2	Recopilación de información sobre el proyecto al que se le aplicara el sistema.	■	■																		
3	Desarrollo de marco teórico	■	■	■	■																
5	Diseño de los muros Tilt-Up					■	■	■	■												
6	Modelado de la estructura en el software ETABS									■	■	■	■								
7	Análisis y discusión de resultados													■	■	■	■	■	■	■	■

Nota. La tabla muestra las actividades a realizar para llevar a cabo el desarrollo investigativo. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

13. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

13.1 Factibilidad técnica

Por medio de la recopilación de información de varias fuentes y códigos de construcción, es viable técnicamente establecer parámetros de diseño para muros prefabricados Tilt-Up aplicables dentro de la normativa guatemalteca. Se realizará el diseño de este sistema en una nave industrial existente para evaluar el comportamiento estructural, esto es posible porque se cuenta con los permisos para acceder a la información necesaria de la estructura.

Para llevar a cabo esta metodología se cuenta con el software especializado ETABS, en el cual se realizará la evaluación del comportamiento estructural del sistema. Debido a que este programa es muy pesado digitalmente, se necesita una computadora capaz de correr el modelo de manera eficiente, esto será posible porque se cuenta con el equipo requerido. Así mismo, para realizar una integración de cargas en la nave industrial se cuenta con los planos para verificar la ocupación de esta, para así obtener resultados más apegados a la realidad.

13.2 Factibilidad económica

En la tabla de la siguiente página se presentan los gastos necesarios para llevar a cabo la investigación:

Tabla 6.

Costos para la realización de la investigación

	Descripción	Cantidad	Unidad	Precio Unitario	Subtotal
1	Recursos tecnológicos (computadora, licencias de software)	0.5	Global	Q10,200.00	Q5,100.00
2	Gastos operativos (Internet y energía eléctrica)	1	Global	Q1,500.00	Q1,500.00
	Costo total de la investigación				Q6,600.00

Nota. La tabla presenta los gastos necesarios para el desarrollo de la investigación. Elaboración propia, realizado con Microsoft Word.

La tabla presentada anteriormente indica el costo total de la investigación, estableciendo que es viable el desarrollo de esta económicamente. La financiación de cada uno de los gastos será cubierta por el investigador.

REFERENCIAS

AGIES. (2018). *Diseño de concreto prefabricado y preesforzado en edificaciones. Normas de seguridad estructural para Guatemala.* AGIES.

American Concrete Institute. (2011). *Building code requirements for structural concrete 318-11.* ACI Committee.

American Concrete Institute. (2015). *551.2R, A. C. Design guide for Tilt-Up concrete panels.* ACI Committee.

Carreño, A. (2015). *Estudio de la prefabricacion en concreto reforzado y su influencia en la construcción de estructuras en Colombia.* Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

Dayton Superior. (2016). *Tilt-Up handbook.* Dayton Superior.

Díaz, L. (2018). *Comportamiento estructural ante acciones sísmicas de una nave industrial de acero en Santiago de Cuba.* Redalyc. https://www.redalyc.org/journal/1813/181358509001/html/

García, D. (2015). *Prefabricados de concreto preesforzado: Spancrete y doble T y su uso en losas y muros aplicados a la arquitectura.* [Tesis de licenciatura, Universidad de San Carlos de Guatemala]. Repositorio institucional.

INSIVUMEH. (2016). *Sismología en Guatemala.* Insivumeh. https://www.insivumeh.gob.gt/folletos/folleto_sismo-1.pdf

Junior, G. (2020). *Influencia de las aberturas en paneles de hormigón basculante: modelación computacional del MEF.* PUC Goias. https://repositorio.pucgoias.edu.br/jspui/bitstream/123456789/1008/1/TCC_2020%20-%20MENDON%c3%87A%20e%20GRAVE.pdf

López, M. (2008). Muros TILT-UP vs muros precolados. Cloud Front. https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/56282851/Muros_Tilt-Up-libre.pdf?1523348916=&response-contentdisposition=inline%3B+filename%3DSociedad_Mexicana_de_Ingenieria_Estructu.pdf&Expires=1725943515&Signature=hQPtWyJAFellZ8GxWnRoEvJUaN6qdVUJgRjkMn0HtXJaa-4

Mendizábal, A. (2019). Comprobación de resultados de método ACI 318-2014 para el diseño estructural de muros de corte de concreto reforzado con aberturas, utilizando el programa Mathcad. [Tesis de licenciatura, Universidad de San Carlos de Guatemala]. Repositorio institucional.

Pérez, C. (2012). Evolución de los sistemas de construccion industrializados a base de elementos prefabricados de hormigón. UPC Commons. https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/8398/Evoluci%c3%b3n%20de%20los%20sistemas%20de%20construcci%c3%b3n%20industrializados%20a%20base%20de%20elementos%20prefabricados%20de%20hormig%c3%b3n.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Perrilliat, R. y Huerta, C. (2014). *Muros estructurales prefabricados Tilt-Up para naves indsutriales.* Instituto Mexicano del Cemento y Concreto.

Ramírez., L. (2013). *Análisis y diseño con ETABS, su aplicación adecuada y comprobación de resultados, aplicado a edificios de concreto armado.* [Tesis de licenciatura, Universidad de San Carlos de Guatemala]. Repositorio institucional.

Reyes, R. (2022). Modelación numérica de muros de hormigón armado prefabricado bajo la acción de cargas horizontales ciclicas. [Tesis de licenciatura, Universidad Politécnica Salesiana]. Repositorio institucional.

Rubiano, J. (2024). *Capacidad a corte en el plano y fuera del plano en muros de concreto reforzado (fundidos in situ y prefabricados). Una revisión del estado del arte.* Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

Salas, J. (2008). *De los sistemas de prefabricación cerrada a la industrialización sutil de la edificación: algunas claves del cambio tecnológico. Informes de la construcción.* [Tesis de licenciatura, Universidad de San Carlos de Guatemala]. Repositorio institucional.

Salazar, J. (2023). *Analisis estructural y modelación de naves insdustriales.* Universidad Nacional Autónoma de México.

Silva, O. (2024). *El Tilt-Up y las edificaciones industriales.* 360 En Concreto. https://360enconcreto.com/blog/detalle/tilt-up-y-las-edificaciones-industriales/#:~:text=El%20tilt%2Dup%20es%20un,sobre%20una%20plataforma%20de%20trabajo.