


**UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**DEPARTAMENTO INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL**

**Profesor Patrocinante:** Alexander Opazo Vega

**Profesores Comisión:** Bernardo Gutiérrez Saldías

Franco Benedetti Leonelli



**“ANÁLISIS NO LINEAL  
DE ANDAMIOS PREFABRICADOS  
MULTIDIRECCIONALES AT-PAC SOMETIDOS A  
CARGAS EN SOFTWARE SAP2000”**

Proyecto de Título presentado en conformidad a los requisitos para obtener el  
Título de Ingeniero Civil

**JAVIER ALEJANDRO ALVAREZ AGUAYO**

**Concepción, Octubre 2018**

## **DEDICATORIA**

*A mi madre Cristina Aguayo y hermana Constanza Alvarez, familia y amigos...*

## **AGRADECIMIENTOS**

A cada integrante de mi familia por su amor y apoyo incondicional en este largo proceso y a lo largo de toda mi vida, sin lugar a duda gracias a ellos, hoy puedo cumplir el sueño de ser ingeniero civil.

Agradecer a todos los profesores de la universidad por su gran amabilidad, paciencia y buena disposición durante todos estos años de estudio, muchas gracias.

También, agradezco a mis amigos, a cada uno de ellos que me acompañaron en este proceso, para ellos infinitas gracias por su amistad incondicional.

Finalmente, quiero agradecer a mi madre, por su inmenso amor y apoyo, no hay palabras suficientes para agradecer todo lo que ha hecho por mí, para ti madre mía, muchas gracias.

## INDICE GENERAL

RESUMEN .....	1
ABSTRACT .....	3
1. INTRODUCCION .....	5
1.1 Justificación .....	6
1.2 Objetivos .....	6
1.2.1 <i>Objetivo general</i> .....	6
1.2.2 <i>Objetivos específicos</i> .....	6
1.3 Metodología .....	7
2. MARCO TEORICO .....	8
2.1 Materiales y Componentes Andamios AT-PAC.....	8
2.1.1 <i>Clase de Acero</i> .....	8
2.1.2 <i>Pie derecho/Vertical/Standard</i> .....	8
2.1.3 <i>Horizontal/Larguero/Ledger longitudinal</i> .....	9
2.1.4 <i>Horizontal/Travesaños/Ledger transversal</i> .....	10
2.1.5 <i>Diagonal</i> .....	11
2.1.6 <i>Base regulable con hilo</i> .....	11
2.1.7 <i>Collarín base</i> .....	12
2.1.8 <i>Conexión sistema Ringlock</i> .....	13
2.2 Ensayos Estructurales .....	14
2.2.1 <i>Ensayo de carga horizontal según la dirección longitudinal del andamio</i> .....	14
2.2.2 <i>Ensayo de carga horizontal según la dirección transversal del andamio</i> .....	17
3. MODELACIÓN NUMERICA.....	19
3.1 Diseño del Modelo.....	19
3.2 Standard/Vertical .....	22
3.3 Ledger/Horizontal .....	22
3.4 Diagonal de arriostramiento.....	22
3.5 Bases Regulables .....	23
3.5.1 <i>Ensayo de compresión axial sobre base regulable</i> .....	23
3.6 Conexión Ringlock Pie derecho – Horizontal .....	25

3.6.1	<i>Ensayo de flexión a unión tipo roseta carga dirección ortogonal</i> .....	26
3.6.2	<i>Ensayo de flexión unión tipo roseta carga dirección paralela</i> .....	28
3.6.3	<i>Conexión Ringlock Pie derecho - Diagonal</i> .....	30
3.7	Conexión Collarín Base .....	30
3.8	Tipo de Análisis .....	32
3.8.1	<i>Control de aplicación de la carga</i> .....	32
3.8.2	<i>Control de solución</i> .....	32
4.	VALIDACIÓN DE MODELO .....	33
4.1	Resultados .....	33
4.2	Análisis de resultados .....	35
5.	APLICACIÓN MODELO NÚMÉRICO .....	36
5.1	Estructura Torre de Andamios .....	36
5.2	Cargas Solicitantes .....	37
5.2.1	<i>Peso propio</i> .....	37
5.2.2	<i>Carga de uso</i> .....	37
5.2.3	<i>Carga de viento</i> .....	38
5.3	Casos de Estudio .....	38
5.4	Modelo Numérico .....	40
5.4.1	<i>Control de aplicación de la carga</i> .....	41
5.5	Resultados .....	42
5.6	Análisis de Resultados .....	43
6.	CONCLUSIONES .....	44
7.	BIBLIOGRAFIA .....	45
8.	ANEXOS .....	46

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación del Grado del Acero de Acuerdo a NCh203.Of2006 .....	8
Tabla 2. Input de Datos al Modelo .....	21
Tabla 3. Resultado de los Ensayos a Bases Regulables, Altura Libre 24 cm.....	24
Tabla 4. Resumen de Resultados Carga Máxima y Desplazamiento Máximo Asociado.....	35
Tabla 5. Cargas de Viento .....	38

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema detalle de la placa circular de apoyo en pies derechos .....	9
Figura 2. Esquema geométrico de los pies derechos del andamio (caso 2000 mm) .....	9
Figura 3. Esquema geométrico de un larguero (elemento horizontal) de andamio.....	10
Figura 4. Esquema geométrico de los travesaños del andamio .....	10
Figura 5. Fotografía vista de la diagonal conectada a las fijaciones del pie derecho .....	11
Figura 6. Esquema geométrico de las bases regulables del andamio .....	12
Figura 7. Esquema geométrico de un collarín base .....	13
Figura 8. Conexión sistema ringlock .....	14
Figura 9. Esquema del ensayo de carga horizontal en sentido longitudinal.....	15
Figura 10. Gráfico resultados ensayo carga horizontal sentido longitudinal .....	16
Figura 11. Esquema del ensayo de carga horizontal en sentido transversal.....	17
Figura 12. Gráfico resultados ensayo carga horizontal sentido longitudinal .....	18
Figura 13. Modelo de elementos finitos (Vista Longitudinal) .....	19
Figura 14. Modelo de elementos finitos (Vista Transversal) .....	20
Figura 15. Esquema ensayo compresión axial de bases regulables.....	24
Figura 16. Ejes locales Resorte conexión ringlock .....	26
Figura 17. Gráfico carga-deformación, ensayo de flexión conexión ringlock carga ortogonal ....	27
Figura 18. Gráfico Momento-Giro ensayo de flexión conexión ringlock carga ortogonal .....	27
Figura 19. Gráfico carga-deformación ensayo de flexión conexión ringlock carga paralela.....	28
Figura 20. Gráfico Momento-Giro ensayo de flexión conexión ringlock carga paralela.....	29
Figura 21. Gráfico carga-deformación conexión ringlock pie derecho – diagonal .....	30
Figura 22. Resorte Conexión Collarín base – Pie derecho .....	31

Figura 23. Curva Momento – Giro (R2,R3) Conexión Collarín Base – Pie Derecho .....	31
Figura 24. Gráfico Carga – Desplazamiento para carga horizontal sentido longitudinal.....	34
Figura 25. Gráfico Carga – Desplazamiento para carga horizontal sentido transversal.....	34
Figura 26. Plano 2D torre de andamios h= 8 m.....	37
Figura 27. Regla de estabilidad .....	39
Figura 28. Modelo numérico (caso 1) .....	40
Figura 29. Modelo numérico (caso 2,3,4,5) .....	41
Figura 30. Gráfico resultados curvas carga v/s desplazamiento.....	42

## **ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE ANDAMIOS PREFABRICADOS MULTIDIRECCIONALES AT-PAC SOMETIDOS A CARGAS EN SOFTWARE SAP2000**

Javier Alejandro Álvarez Aguayo

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío

[Javier.alvarez1401@alumnos.ubiobio.cl](mailto:Javier.alvarez1401@alumnos.ubiobio.cl)

Alexander Opazo Vega

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío

[aopazove@ubiobio.cl](mailto:aopazove@ubiobio.cl)

### **RESUMEN**

Esta tesis tiene por objetivo analizar y modelar numéricamente el comportamiento no lineal de los andamios prefabricados multidireccionales AT-PAC sometidos a cargas laterales, caracterizando la configuración de andamios más utilizada en las obras industriales y de construcción.

Se presenta una configuración básica de cuerpo de andamio, con sus respectivos componentes, los cuales trabajan como cuerpo rígido gracias al sistema de conexión ringlock. Para el ingreso de datos al modelo, se asignaron propiedades específicas a la conexión ringlock pie derecho-horizontal, pie derecho-diagonal y conexión base-collarín, con la finalidad que representen los desplazamientos horizontales frente a cargas laterales.

La validación de los modelos se obtiene a partir de los resultados de ensayos estructurales sistema ring de andamio multidireccional AT-PAC, realizado por DICTUC laboratorio de ingeniería estructural.

Luego, se determinó que los modelos numéricos son capaces de realizar un análisis estático no lineal y predecir un comportamiento óptimo válido de los andamios. También, se aprecia que gracias a el sistema de conexión ringlock el cuerpo de andamios presenta alta resistencia promedio a las cargas laterales. Además, existe un incremento en la capacidad resistente del cuerpo de andamio cuando se incluye diagonal de arrostramiento, al obtener mayor rigidez.



Por último, se analizó una estructura de andamios tipo torre de 8 metros de altura, a la cual se le aplicaron las cargas exigidas por la norma chilena y a partir de distintas configuraciones de la torre se hizo una comprobación de la regla de estabilidad establecida por la norma, la cual se ajusta con éxito al comportamiento real de los andamios en terreno. Es por esto que este proyecto de título es un importante aporte para realizar próximos estudios y así analizar con mayor detalle todas las variables y condiciones que afectan en el comportamiento de los andamios.

**Palabras Clave:** Andamios prefabricados multidireccionales, conexión Ringlock, análisis estático no lineal, regla de estabilidad.

7176 Palabras Texto + 23 Figuras/Tablas\*250 = 12926 Palabras Totales

## **ANALYSIS OF THE BEHAVIOR OF PREFABRICATED MULTIDIRECTIONAL SCAFFOLDING ATPAC SUBJECT TO LOADS IN SAP2000 SOFTWARE**

Javier Alejandro Álvarez Aguayo

Civil and Environmental Engineering Department, University of Bio-Bio

[Javier.alvarez1401@alumnos.ubiobio.cl](mailto:Javier.alvarez1401@alumnos.ubiobio.cl)

Alexander Opazo Vega

Civil and Environmental Engineering Department, University of Bio-Bio

[aopazove@ubiobio.cl](mailto:aopazove@ubiobio.cl)

### **ABSTRACT**

The objective of this thesis is to numerically model the behavior of pre-fabricated multidirectional scaffolds, AT-PAC branded, when subject to lateral monotonic loads, which represents the most used configuration of scaffolds in the industrial and construction jobsites.

A basic configuration of scaffold body, including base jacks, starter collars, standards, Ledgers and bay braces joined together by means of the ring lock system is shown. For data entry to model, specific properties were assigned to connection elements, whether it was on ring lock connection right leg-ledger, right-leg-bay brace and connection base – starter collar. The purpose is that horizontal displacements are represented against lateral loads.

Validation of models is obtained from results of structural tests performed on the multidirectional scaffold ring lock system, AT-PAC branded, which was carried out by the laboratory of Structural Engineering, DICTUC.

It was then determined that numerical models are able to perform a non-linear static analysis and predict an optimal valid behavior of scaffolds. It is also observed that thanks to the Ring lock connection system, the scaffolding section shows high average strength against side loads. There is also an increase in strength capacity of scaffold section when bay braces are added, which adds more stiffness to such section.

At the end, a scaffolding tower-type structure of 8 meters of height was analyzed, to which loads demanded by Chilean Standard were applied. A verification of stability requirements included in

the Chilean standard was performed based on different configurations of such tower; results fully meet the Chilean Standard. It is for this reason that this Degree project represents a significant contribution to perform further studies in order to analyze in further detail all variables and conditions affecting scaffold behavior.

**Keywords:** Multidirectional prefabricated scaffolding, Ringlock connection, non-linear static analysis, stability rule.

## 1. INTRODUCCION

Los andamios son estructuras provisionales que sustentan plataformas de trabajo para operarios, materiales y herramientas en varios niveles, que se emplea en faenas de construcción, reparación, mantención o demolición de edificios, obras civiles e instalaciones industriales y mineras. También se emplean en estructuras provisionales que sustentan moldajes, losas y otros sistemas constructivos; en pasarelas provisionales en altura, como escaleras de acceso, rampas, pasarelas, puentes peatonales; y en estructuras provisionales para actos públicos, como escenarios, galerías, torres auto soportantes para iluminación, sonido y publicidad. Las cargas en el andamio pueden ser de trabajadores, equipo de construcción, encofrados y materiales de construcción. Por lo general, los andamios también deben soportar cargas laterales, incluyendo cargas de viento, cargas de impacto y cargas sísmicas.

AT-PAC es una empresa internacional líder en sistema de andamios que utiliza andamios prefabricados multidireccionales, lo cual significa que son andamios en el cual todas o algunas dimensiones son determinadas con antelación mediante uniones o dispositivos de unión fijados permanentemente sobre los componentes. Debido a la importancia del uso del andamio y la falta de estudios disponibles; la empresa AT-PAC, solicitó al departamento de ingeniería estructural de la PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE (DICTUC) realizar ensayos estructurales al sistema de andamio multidireccional AT-PAC.

En este proyecto de título se entrega un análisis no lineal de andamios prefabricados multidireccionales AT-PAC, a partir de un modelo numérico realizado en el software Sap2000, que fue calibrado en base a los resultados de los ensayos realizados por el DICTUC. (Technical Compliance Testing – AT-PAC Chile 2012 (DICTUC)).

El análisis del modelo numérico validado y la información que presenta esta tesis puede ser de gran ayuda para los involucrados en el mundo de los andamios, ya que será posible estudiar distintas estructuras, determinar cuáles son las variables más influyentes en la capacidad de resistir las cargas solicitadas y además verificar criterios establecidos por la norma en post de la mejora de ésta.

## 1.1 Justificación

Tanto en Chile como alrededor del mundo casi todas las operaciones de construcción e industriales y mineras utilizan sistemas de andamios en los cuales operan día a día personas que ponen en riesgo su vida, por lo que es imprescindible para la empresa AT-PAC y para todos los involucrados en el mundo de los andamios, analizar el comportamiento de estas estructuras para evitar eventuales colapsos y accidentes. El colapso de los andamios no sólo lleva a retrasos en el trabajo y a la pérdida de propiedades, sino que también ha sido responsable de numerosas lesiones y muertes de trabajadores, y a pesar de ello la bibliografía disponible sobre los andamios sigue siendo muy limitada y las normas que rigen estas estructuras no tienen actualizaciones recientes.

En general, la seguridad de estas estructuras se evalúa a través de ensayos a cuerpos y componentes específicos, ya que no es factible realizar ensayos a todas las posibles configuraciones del andamio debido al costo asociado, es por esto que surge la necesidad de utilizar modelos numéricos y calibrarlos a partir de los ensayos disponibles para poder predecir con un alto grado de precisión el comportamiento real de estas estructuras en terreno, convirtiéndose en una opción viable de estudio para poder analizar las distintas aplicaciones de los andamios prefabricados multidireccionales.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 *Objetivo general*

Modelar numéricamente el comportamiento no lineal de los andamios prefabricados multidireccionales AT-PAC, en base a los resultados de los ensayos estructurales realizados por el DICTUC.

### 1.2.2 *Objetivos específicos*

- Realizar una revisión y selección de los ensayos estructurales realizados por DICTUC
- Crear un modelo computacional de elementos finitos un cuerpo típico de andamio at-pac en software Sap2000.
- Calibrar el modelo en base a los ensayos estructurales realizados por el DICTUC y evaluar su validez para poder simular apropiadamente el comportamiento del andamio.
- Modelar una estructura de andamio y verificar la regla de estabilidad establecida por la norma chilena.

### **1.3 Metodología**

El procedimiento realizado en esta memoria es dividido en cuatro fases principales:

En la etapa de estudio de antecedentes se realiza una revisión del informe de ensayos estructurales realizados por el DICTUC, se analizan los componentes implementados en los ensayos y se seleccionan los ensayos que nos entregan la información necesaria para definir adecuadamente los inputs de datos al modelo y así generar un modelo de andamio preliminar.

Luego es necesario calibrar el modelo numérico, ingresando propiedades específicas obtenidas de los resultados de los ensayos estructurales realizados por el DICTUC a los distintos elementos modelados que representan los componentes de los andamios AT-PAC.

Posteriormente se analizan los resultados de los ensayos estructurales y los obtenidos por el software para realizar una comparación ensayo-modelo. Se hacen las últimas correcciones y ajustes para finalmente establecer una validación del modelo numérico del cuerpo de andamio.

Por último, a partir del modelo numérico validado se modela una estructura de andamio tipo torre con distintas configuraciones, para realizar la verificación de la regla de estabilidad establecida por la norma chilena, para así establecer conclusiones y recomendaciones cumpliendo el objetivo de esta investigación.

## 2. MARCO TEORICO

En este capítulo se presenta una revisión del informe de ensayos estructurales realizado por el DICTUC a los andamios prefabricados multidireccionales AT-PAC, del cual se extrae la información importante y necesaria para dar un sustento teórico a la realización de los modelos numéricos.

### 2.1 Materiales y Componentes Andamios AT-PAC

La clase de acero y los elementos utilizados por la empresa AT-PAC en sus andamios se especifican a continuación de 2.2.1 a 2.2.8.

#### 2.1.1 Clase de Acero

El informe DICTUC N° 1037055, “Ensayos de Tracción, Doblado y Análisis Químico a Elementos de Andamios Multidireccionales AT-PAC Ring”, emitido el 30 de noviembre de 2012, señala que el acero de los elementos de andamios ensayados corresponde a lo especificado en la Tabla 1.

**Tabla 1. Clasificación del Grado del Acero de Acuerdo a NCh203.Of2006**

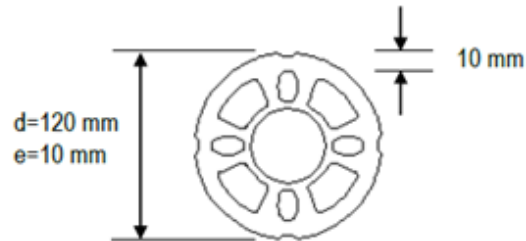
Elemento <sup>(1)</sup>	Clase acero
Diagonal	A270ES
Larguero	A345ES
Tablón	A240ES
Pie derecho	A345ES
Travesaño	A345ES

NOTA:  $E_s = 2100$  (Ton/cm<sup>2</sup>)

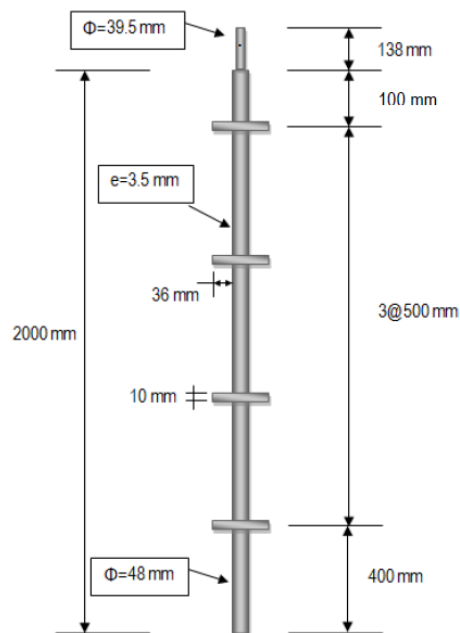
#### 2.1.2 Pie derecho/Vertical/Standard

Compuesto por un perfil metálico tubular de diámetro exterior constante de 48 mm y espesor 3.5 mm, al formar parte de un cuerpo de andamio va orientado de manera vertical. En el presente estudio se utiliza pies derechos en longitud nominal de 2000 mm (hay más variantes), en los cuales existen apoyos (tipo roseta) espaciados cada 500 mm. El pie derecho tiene un extremo superior libre de 100 mm y uno inferior de 400 mm y tiene un peso de 10.6 kgf.

La figura 1 muestra los apoyos tipo roseta que corresponden a placas de acero circulares circunscritas en el perfil tubular del pie derecho, de 10 mm de espesor, con perforaciones que permiten la fijación de los elementos horizontales y diagonales. La figura 2 muestra un esquema típico de este tipo de elementos verticales de 2000 mm.



**Figura 1. Esquema detalle de la placa circular de apoyo en pies derechos**



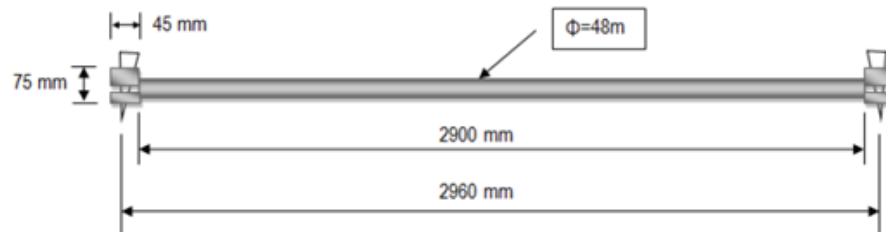
**Figura 2. Esquema geométrico de los pies derechos del andamio (caso 2000 mm)**

### 2.1.3 Horizontal/Larguero/Ledger longitudinal

Compuesto por un perfil metálico tubular de diámetro exterior constante de 48 mm, 3.5 mm de espesor y con largo de sólo el tubo de 2900 mm. Este elemento va orientado de manera horizontal el sentido longitudinal del cuerpo del andamio. Su longitud total es de 3005 mm y el largo entre ejes de conexión a la roseta es de 2960 mm.



El sistema de apoyo o conexión del larguero corresponden a piezas de acero forjado tipo cajones, con una pletina de espesor 7 mm del mismo material, las cuales actúan como pasadores de fijación a las placas tipo rodela de los pies derechos. La Figura 3 presenta un esquema del larguero con longitud a eje de 2960 mm, con las propiedades geométricas anteriormente mencionadas. El peso promedio por elemento es de 12.2 kgf, valor que difiere levemente del catálogo, el cual es 11.8 kgf.

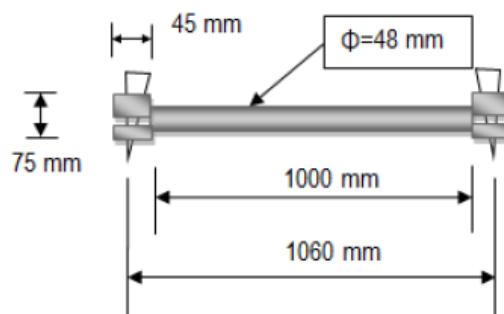


**Figura 3. Esquema geométrico de un larguero (elemento horizontal) de andamio**

#### 2.1.4 Horizontal/Travesaños/Ledger transversal

De iguales características geométricas que los largueros, sólo cambiando el largo del perfil principal a una longitud libre de tubo de 1000 mm y una longitud entre ejes de apoyo de 1060 mm. El sistema de apoyo o conexión del travesaño al pie derecho es idéntico al descrito para los largueros en la sección 2.2.3. Estos elementos están dispuestos en el sentido transversal de la configuración del andamio.

La Figura 4 muestra un esquema típico de este tipo de elementos. El peso promedio por travesaño es 5.0 kgf.



**Figura 4. Esquema geométrico de los travesaños del andamio**

### 2.1.5 Diagonal

Las diagonales dispuestas en el sentido longitudinal del andamio están compuestas por perfiles metálicos tubulares circulares de 48 mm de diámetro exterior y 2.5 mm de espesor. La longitud nominal de este elemento es 3550 mm y el largo entre ejes es de 3600 mm. Se dispone sólo una en cada cuerpo de andamio (por lo que puede trabajar a tracción y a compresión). En ambos extremos las diagonales presentan una pequeña zona con una modificación en su geometría (aplastamiento) a la cual se conecta la misma pieza con forma de C perforada (fierro forjado) y atravesada por una cuña descrita anteriormente para los largueros, este sistema en el caso de las diagonales es giratorio. La unión entre el marco longitudinal y la diagonal se materializa a través del mismo sistema que utilizan los travesaños con los pies derechos. Las diagonales longitudinales tienen un peso aproximado de 11.8 kgf. La figura 5 muestra el ensamble de la diagonal con las fijaciones que posee el pie derecho.



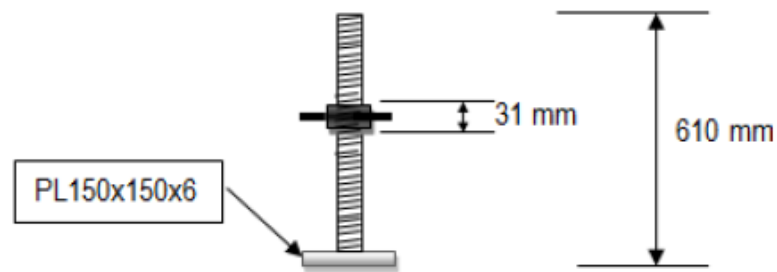
**Figura 5. Fotografía vista de la diagonal conectada a las fijaciones del pie derecho**

### 2.1.6 Base regulable con hilo

Compuestas por un tubo con hilo, con 35 mm de diámetro exterior, 4 mm de espesor y 610 mm de largo total, este elemento sirve para regular la altura del andamio mediante una tuerca con mangos laterales, la cual, dado que también tiene hilo, permite el desplazamiento en el sentido vertical de dicha tuerca a través del tubo. Existe una altura máxima a la que puede subirse la tuerca, a saber, 470 mm desde el suelo. Esta altura máxima está definida por la existencia de un tope a esa altura, que consiste en un punto de soldadura que interrumpe el hilo del perfil de la base. Una vez que la

tuerca lo ha alcanzado no puede seguir subiendo debido a esta obstrucción. Por otra parte, el extremo superior se ensambla dentro del perfil tubular vertical del “calce del tornillo” (elemento a detallarse en el siguiente punto) y por el otro está soldado a una placa de acero de dimensiones 150x150 mm y espesor 6 mm (placa base).

En detalle, el hilo es cuadrado, de un paso de 6.3 mm y una altura de 2 mm. El peso promedio de cada base es 3.6 kgf. En la Figura 6 se presenta un esquema geométrico de las bases.

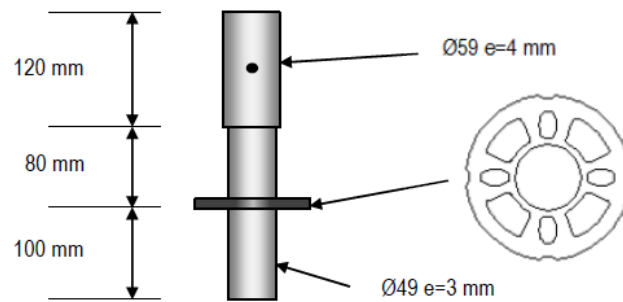


**Figura 6. Esquema geométrico de las bases regulables del andamio**

### 2.1.7 Collarín base

Corresponde a una pieza de transferencia entre las bases regulables y los pies derechos del andamio. La finalidad de esta pieza es brindar un nivel de fijación basal mediante la existencia de una rodela para poder conectar a este nivel tanto largueros como travesaños y una diagonal, además de un primer nivel de tablonés.

Compuesta por dos trozos de perfiles cilíndricos coaxiales, el superior de 59 mm diámetro y 4 mm de espesor y el inferior de 49 mm de diámetro y espesor de 3 mm, además de un apoyo o conexión tipo rodela, de idénticas características a las mencionadas en la descripción de los pies derechos. El peso de este elemento corresponde a 2.0 kgf. La figura 7 muestra un esquema del collarín base.

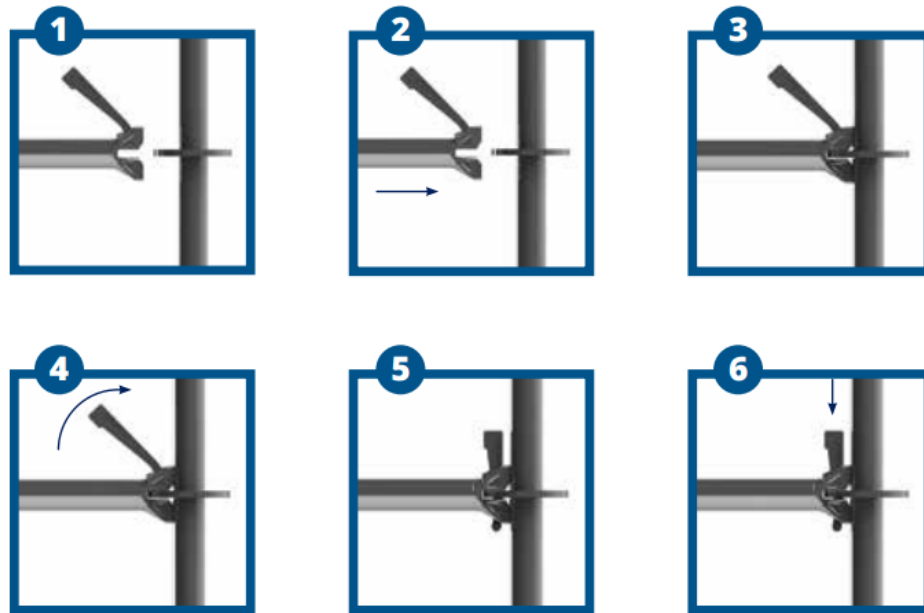


**Figura 7. Esquema geométrico de un collarín base**

### 2.1.8 Conexión sistema Ringlock

El sistema Ring-lock que utiliza la empresa consiste en un andamio de sistema modular que permite a sus usuarios el levantar, utilizar y desmontar en forma rápida y eficiente estructuras temporales de trabajo. El Sistema Ringlock de AT-PAC cumple con los requerimientos los estándares europeos BS EN 12810 y BS EN 12811.

La conexión de nudo del sistema Ringlock se compone de verticales con rosetas fijadas cada 0,5 m y de horizontales provistos con cuñas en ambos extremos (horizontal/ travesaño). Cuando se conectan los extremos del horizontal a la roseta se genera una unión de alta resistencia. Esta conexión es la que transmite las fuerzas a través de toda la estructura del andamio. La roseta tiene un diámetro de 123 mm y posee 8 agujeros, 4 de los cuales son pequeños y 4 son grandes. Los agujeros más pequeños representan el ángulo de 90 grados en el que se montan los horizontales/travesaños. Sobre los agujeros más grandes se montan las diagonales de arriostamiento. La roseta también permite conectar los verticales dentro de los agujeros más grandes de la misma, lo que proporciona hasta 28 grados de maniobrabilidad en cada dirección. Esto permite desplazar el vertical para librarse de posibles interferencias. La figura 8 presenta el sistema de conexión Ringlock.



**Figura 8. Conexión sistema ringlock**

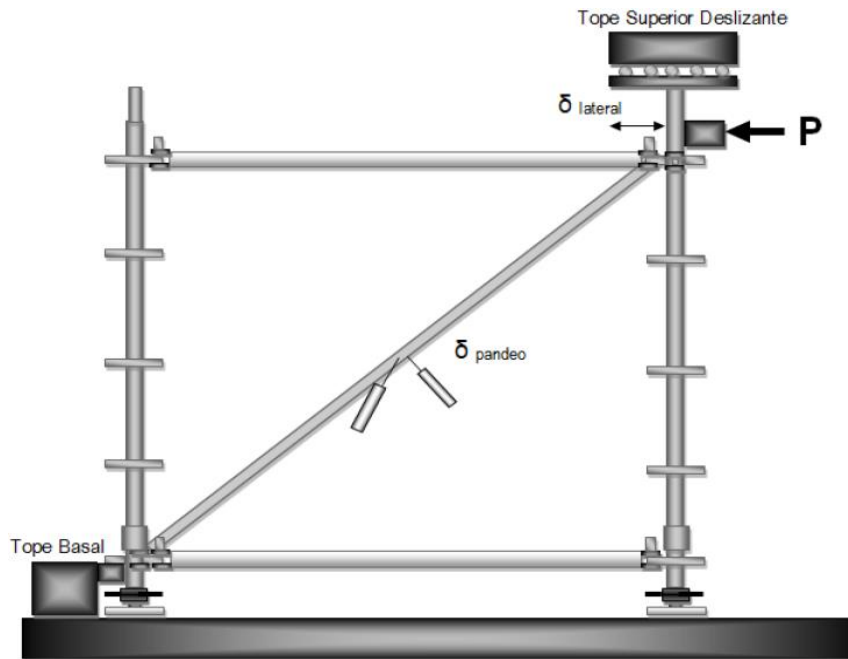
## 2.2 Ensayos Estructurales

A continuación, se describen los ensayos que son parte del alcance de la presente memoria. Todos los ensayos fueron realizados a los elementos que componen el “Sistema de Andamios AT-PAC Ring”, de dimensiones nominales 3050x1150 mm. En cada uno de los tipos de ensayos implementados para el estudio del sistema se realizaron tres probetas idénticas, con lo cual es factible obtener parámetros de validez estadística.

### 2.2.1 Ensayo de carga horizontal según la dirección longitudinal del andamio.

Para el ensayo de carga horizontal según la dirección longitudinal del andamio, se armó un cuerpo de andamio con los elementos principales del sistema (largueros, travesaños, pies derechos) y además la diagonal en uno de los costados longitudinales. No se disponen en la configuración de ensayo de los tablonces en ninguno de los dos niveles y tampoco las barandas. Esta implementación fue la utilizada en las tres probetas ensayadas y tiene como objeto obtener la resistencia y comportamiento del cuerpo de andamio y en particular de la diagonal y su conexión con el resto del sistema, mediante la reproducción de la estructuración con una condición más desfavorable ante la sollicitación impuesta. Como en todos los casos, se ensayaron un total de tres probetas.

Con el objeto de que el andamio (probeta) no se deslizara horizontalmente durante el ensayo, se dispuso de un tope inferior en el extremo opuesto del lugar de aplicación de la carga. Para evitar el volcamiento del andamio durante el ensayo, se dispuso de un tensor al costado del gato hidráulico horizontal, donde se aplicó la carga. En la Figura 9 se presenta una vista general de la implementación del ensayo, en donde se indica la disposición del tope basal y del tensor del costado ensayado.



**Figura 9. Esquema del ensayo de carga horizontal en sentido longitudinal**

La carga fue aplicada horizontalmente (en el sentido longitudinal del andamio), en un punto levemente superior de la intersección del pie derecho vertical del marco transversal, el larguero horizontal superior de dicho marco y la diagonal. La carga se aplicó utilizando un gato hidráulico de 5 toneladas de capacidad, entre el gato hidráulico y el perfil tubular del pie derecho se dispuso de un trozo de madera que tiene como particularidad un rebaje semicircular de forma tal que permite un ajuste perfecto con la geometría tubular del pie derecho para que la carga sea sobre un área de contacto y no en un punto.

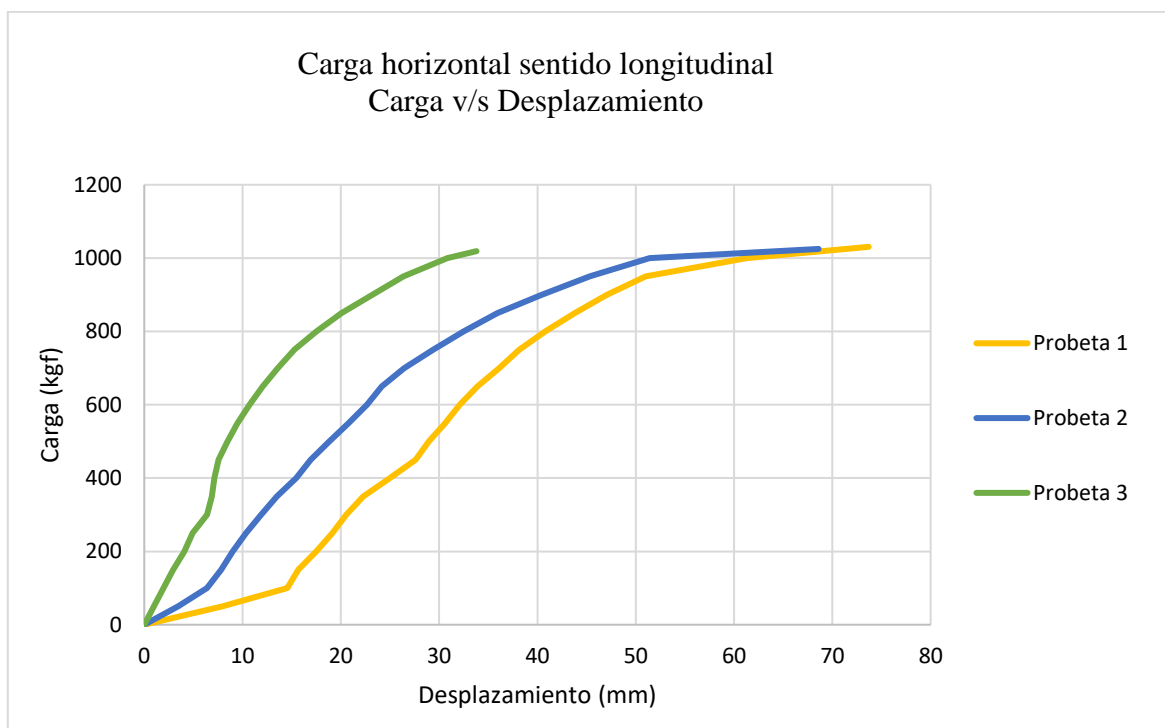
El ensayo se realizó hasta alcanzar la resistencia de fluencia, una deformación excesiva o la falla de algunos de los elementos que componen la probeta. Las deformaciones se midieron mediante la instalación de tres transductores, una pareja se ubicó en el centro de la diagonal en dos direcciones

perpendiculares entre sí, de modo de medir las deformaciones por pandeo de dicha diagonal y el tercer transductor se ubicó en el sentido de aplicación de la carga, de modo de medir las deformaciones horizontales que experimentara el andamio.

Durante el ensayo se registraron los datos obtenidos (carga y deformación) mediante un equipo de adquisición de datos de origen alemán marca HBM, modelo QuantumX MX840A, bajo una frecuencia de muestreo de 5 Hz.

a) resultados obtenidos

El mecanismo de falla principal que se presenta en las tres probetas ensayadas fue por pandeo global de la diagonal, debido a esfuerzos de compresión. Una vez terminados los ensayos, se dibujaron las curvas Carga Aplicada en kilogramo fuerza versus Deformación Lateral del Marco en milímetros, las cuales se presentan en el gráfico de la figura 10.

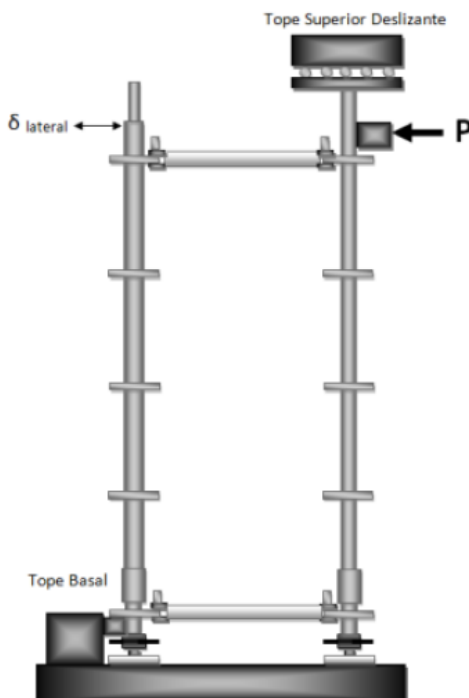


**Figura 10. Gráfico resultados ensayo carga horizontal sentido longitudinal**

### 2.2.2 Ensayo de carga horizontal según la dirección transversal del andamio.

Para el ensayo de carga horizontal en el sentido transversal de los marcos del andamio, se armó un cuerpo con idéntica configuración a la señalada en la sección 2.2.1 para la descripción del ensayo en el sentido longitudinal. El montaje se realiza de forma tal que la aplicación de la carga sea en el sentido transversal del andamio. Con el objeto de que el marco no se deslizara horizontalmente durante el ensayo se dispuso de un tope inferior en el extremo opuesto del lugar donde se aplicó la carga. Adicionalmente, para evitar el volcamiento del marco durante el ensayo, se dispuso de un tensor al costado del gato hidráulico horizontal. En la Figura 11 se presenta una vista general de la implementación del ensayo, en donde se indica la disposición del tope basal y del tensor del costado ensayado.

La carga fue aplicada horizontalmente (en sentido paralelo al marco transversal del andamio), en un punto levemente superior de la intersección del pie derecho vertical del marco transversal, el larguero horizontal superior de dicho marco y el travesaño transversal. La carga se aplicó utilizando un gato hidráulico de 5 toneladas de capacidad, entre el gato hidráulico y el perfil tubular del pie derecho se dispuso de un trozo de madera que tiene como particularidad un rebaje semicircular de forma tal que permite un ajuste perfecto con la geometría tubular del pie derecho para que la carga sea sobre un área de contacto y no en un punto.



**Figura 11. Esquema del ensayo de carga horizontal en sentido transversal**

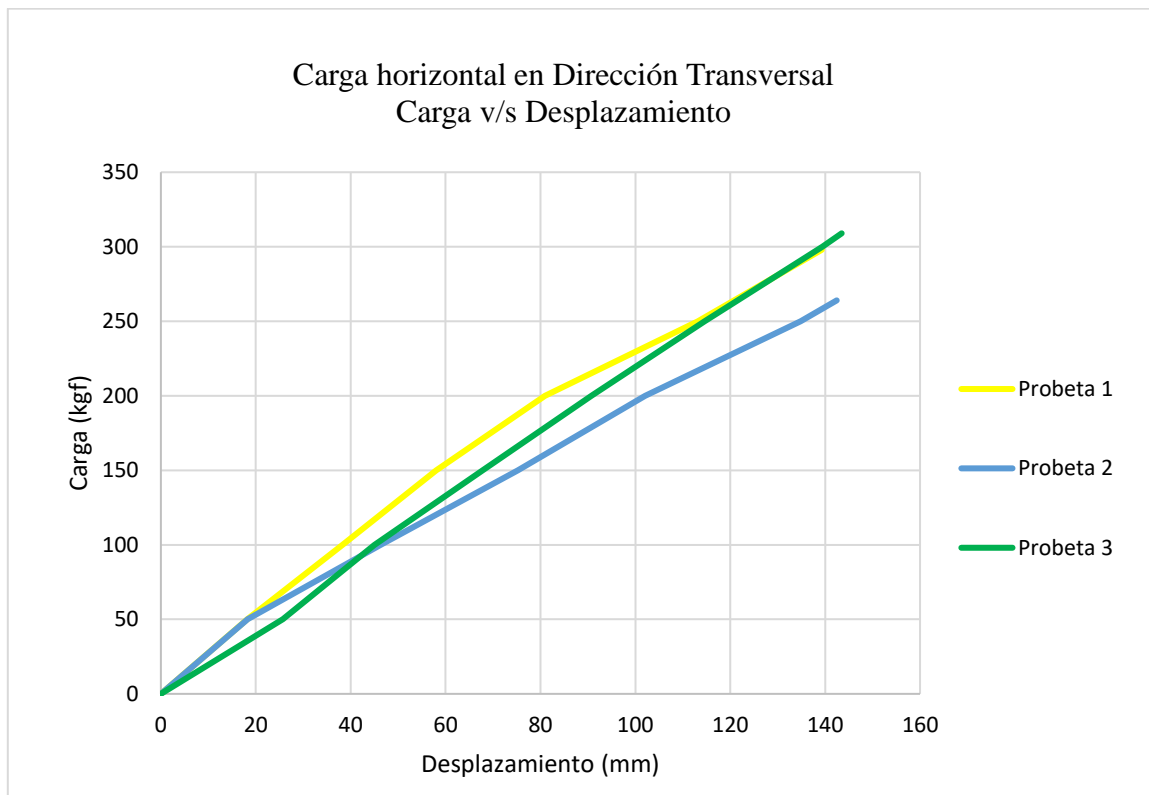


El ensayo se realizó hasta alcanzar la resistencia de fluencia, una deformación excesiva o la falla de algunos de los elementos que componen la probeta. La deformación se midió mediante un transductor tipo roldana dispuesto en la probeta en la misma dirección de aplicación de la carga.

Durante el ensayo se registraron los datos obtenidos (carga y deformación) mediante un equipo de adquisición de datos de origen alemán marca HBM, modelo QuantumX MX840A, bajo una frecuencia de muestreo de 5 Hz.

b) resultados obtenidos

El mecanismo de falla fue debido a una deformación lateral excesiva del marco transversal cargado, motivo por el cual se detuvo el ensayo. Una vez terminados los ensayos, se dibujaron las curvas Carga Aplicada versus Deformación del marco en el sentido de aplicación de la carga (transversal), las cuales se presentan en el gráfico de la figura 12.



**Figura 12. Gráfico resultados ensayo carga horizontal sentido longitudinal**

### 3. MODELACIÓN NUMÉRICA

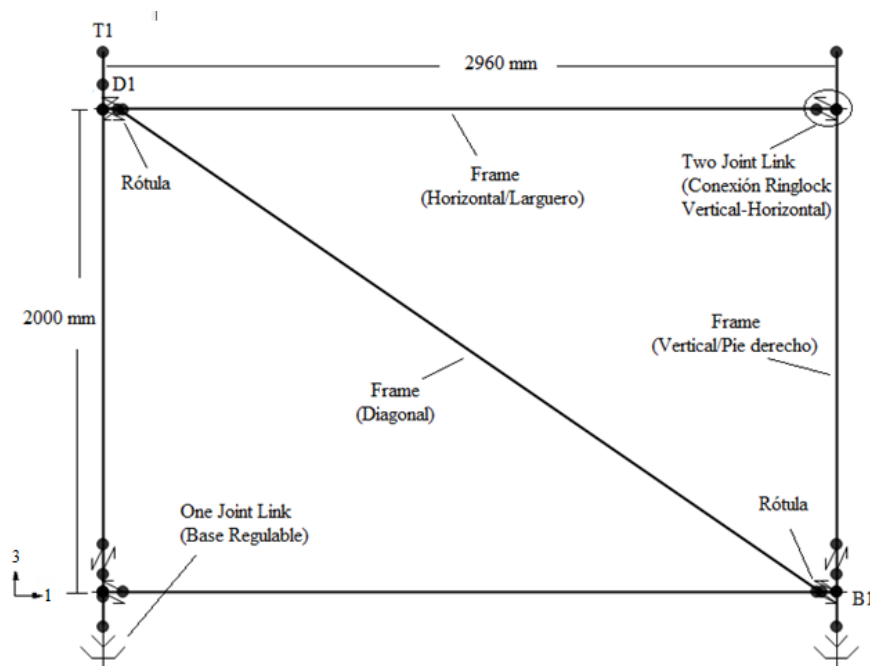
En este capítulo se describe la metodología utilizada para modelar el cuerpo de andamio, incluyendo argumentos de discretización, elección de elementos y sus respectivas asignaciones de propiedades.

Se diseñan un modelo con los mismos detalles constructivos que los descritos en el capítulo anterior, para tener una mejor representación de sus comportamientos y así otorgarles mayor validez.

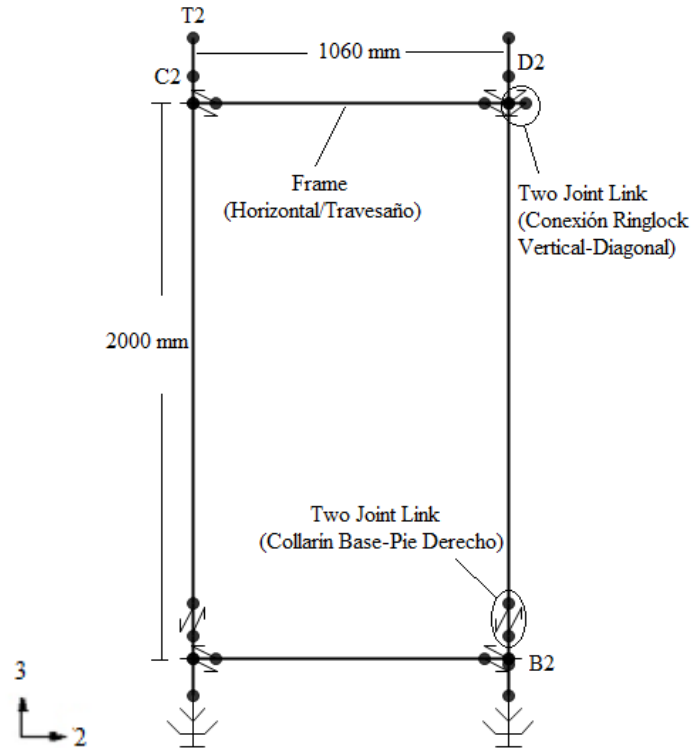
El software comercial SAP2000 (CSI, 2009) fue utilizado para el modelado del cuerpo de andamio, ya que es un programa computacional de elementos finitos especialmente diseñado para procesar datos bajo un análisis estructural. SAP2000 es capaz de realizar un análisis estático no lineal y es apto para modelar el comportamiento del cuerpo de andamio más allá de la carga máxima si se asignan propiedades de conexión adecuadas.

#### 3.1 Diseño del Modelo

La figura 13 y 14 muestran un esquema del modelo con sus dimensiones respectivas, se indican los elementos finitos, los elementos de la estructura física del andamio.



**Figura 13. Modelo de elementos finitos (Vista Longitudinal)**



**Figura 14. Modelo de elementos finitos (Vista Transversal)**

Nota:

T1: Restricción Tope superior antideslizante, modelo carga horizontal sentido longitudinal.

B1: Restricción Tope basal, modelo carga horizontal sentido longitudinal.

D1: Nudo aplicación de carga horizontal sentido longitudinal y de medición desplazamiento horizontal.

T2: Restricción Tope superior antideslizante, modelo carga horizontal sentido transversal.

B2: Restricción Tope basal, modelo carga horizontal sentido transversal.

C2: Nudo aplicación de carga horizontal sentido transversal.

D2: Nudo Medición desplazamiento horizontal (carga horizontal sentido transversal)

Los elementos que conforman el cuerpo de andamio, así como sus respectivos elementos finitos y el detalle de las propiedades no lineales asignadas a cada uno de éstos se resumen en la tabla 2.

**Tabla 2. Input de Datos al Modelo**

Elemento Físico	Tipo	Elemento Finito	Propiedades mecánicas
Standard – Vertical	Pie derecho	Frame	E = 2100000 kg/cm <sup>2</sup>
			u = 0,3
			Fy = 3520 kg/cm <sup>2</sup>
			Fu = 5200 kg/cm <sup>2</sup>
Ledger - Horizontal	Larguero-Travesaño	Frame	E = 2100000 kg/cm <sup>2</sup>
			u = 0,3
			Fy = 3520 kg/cm <sup>2</sup>
			Fu = 5200 kg/cm <sup>2</sup>
Diagonal	Diagonal arriostramiento	Frame	E = 2100000 kg/cm <sup>2</sup>
			u = 0,3
			Fy = 2750 kg/cm <sup>2</sup>
			Fu = 4200 kg/cm <sup>2</sup>
			Límite carga a compresión -982 (kgf)
Base	Apoyo	One Joint Link	Determinado por resultados ensayos DICTUC.
Conexión Ringlock	Pie derecho-Horizontal	Two Joint Link	Determinado por curvas carga – deformación (DICTUC)
	Pie derecho-Diagonal		
Conexión Collarín	Collarín base-pie derecho	Two Joint Link	Determinado por curvas carga – deformación (DICTUC)

NOTA: 1, Valores obtenidos de Technical Compliance Testing - Chile (DICTUC) (2012)

2, En SAP2000, las propiedades de los elementos son definidos en un sistema de coordenadas locales. Los ejes del sistema están denotados por direcciones 1,2 y 3.

3, Frame: E= módulo de elasticidad, u= coeficiente de Poisson, Fy = Tensión de fluencia, Fu = Tensión de ruptura.

4, Two Joint: Las propiedades fueron determinadas de acuerdo a curvas carga -desplazamiento de ensayos experimentales obtenidos de Technical Compliance Testing – Chile (DICTUC) (2012).

5, One joint link: R= Rigidez, determinada de ensayos a compresión axial base regulable.

### **3.2 Standard/Vertical**

Los elementos verticales del cuerpo de andamio denominados pies derecho fueron modelados con un elemento tipo Frame, que está representado por una línea recta de longitud 2118 mm que conecta dos nodos. Se ingresan a el software las dimensiones del elemento, diámetro 48 mm, espesor 3.5 mm y sus propiedades mecánicas definidas en la tabla 2.

### **3.3 Ledger/Horizontal**

Los elementos horizontales del cuerpo de andamio denominados largueros y travesaños fueron modelados con un elemento tipo Frame, que está representado por una línea recta que conecta dos nodos. Se ingresan a el software las dimensiones del elemento, diámetro 48 mm, espesor 3.5 mm y sus propiedades mecánicas definidas en la tabla 2.

### **3.4 Diagonal de arriostramiento**

La diagonal dispuesta en el sentido longitudinal del andamio fue modelada con un elemento tipo Frame, los cuales están representadas por una línea recta de longitud 3550 mm, que conecta dos nodos y está rotulado en sus extremos. Se ingresa a el software las dimensiones del elemento, diámetro 48 mm, espesor 2.5 mm y sus propiedades mecánicas definidas en la tabla 2. Además, se define en el modelo la resistencia máxima a compresión de la diagonal igual a 982 kg, por lo que una vez alcanzada dicha carga, la diagonal deja de aportar rigidez al cuerpo de andamio.

### 3.5 Bases Regulables

Normalmente en obra las bases de los andamios descansan sobre tablonces de madera, por lo tanto, la definición de la propiedad base es considerablemente compleja. La adopción de fijar los desplazamientos horizontales es demasiado conservadora e incorrecta, al igual que liberar dichos desplazamientos ya que la carga debido a su propio peso no permite que la estructura se mueva en el plano horizontal.

Considerando las características de la base el elemento one joint Link tipo “Friction Isolator” representa de manera consistente la situación real, ya que le indica al programa que este elemento es capaz de trabajar sólo a compresión y además considera el roce acero-madera en los desplazamientos horizontales. La rigidez axial a compresión de este elemento finito se obtiene del ensayo de compresión axial sobre base regulable presentado en 3.5.1. Se define el coeficiente de roce estático acero-madera 0,6 y el coeficiente de roce dinámico acero-madera 0,3.

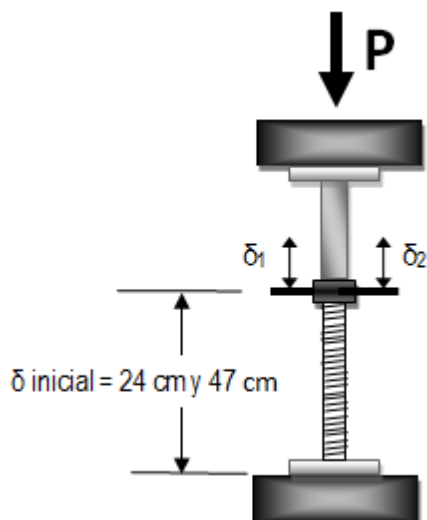
#### 3.5.1 Ensayo de compresión axial sobre base regulable.

Las bases regulables, fueron ensayadas a compresión axial, utilizando un trozo de perfil tubular de un pie derecho, del mismo sistema, en su parte superior, para simular el traspaso de tensiones normal que sufre este elemento durante su utilización.

Se realizaron dos tipos de configuración de ensayo tal que la ubicación de la tuerca niveladora permitiera un aumento de nivel de la base del pie derecho de 24 cm y 47 cm sobre el nivel basal libre. El trozo de pie derecho fue cortado perfectamente recto y ortogonal al eje del perfil, apoyado directamente sobre la superficie de carga, sin uso de bases extra. La extensión del trozo de pie derecho implementado en los ensayos es levemente superior a la longitud libre de hilo superior. Se realizaron tres ensayos para cada tipo de configuración.

La carga, fue aplicada utilizando la prensa Amsler, con la escala de 50 toneladas y bajo velocidad de aplicación de la carga controlada. Durante el ensayo se registró la deformación axial poniendo dos transductores, uno en cada mango de la tuerca con hilo. Estos desplazamientos fueron registrados mediante un equipo de adquisición de datos digital de origen japonés marca TML, modelo TDS-302. La carga fue registrada directamente de la prensa con la cual se aplicó la sollicitación de compresión.

El esquema general del ensayo de las bases regulables, que aplica para las dos alturas implementadas, se muestra en la Figura 15 a continuación.



**Figura 15. Esquema ensayo compresión axial de bases regulables**

El ensayo se realizó hasta obtener una rigidez cercana a cero en la probeta (incremento de deformación sin incremento de carga), una deformación excesiva o el colapso de algún elemento de la base.

La Tabla 3 muestra un resumen de los resultados obtenidos durante los ensayos realizados con altura libre de 24 cm. Se destaca que, si bien esta tabla entrega una rigidez axial, esta responde a la rigidez posterior al acomodo inicial de las probetas.

**Tabla 3. Resultado de los Ensayos a Bases Regulables, Altura Libre 24 cm**

Probeta	Carga máxima ( kgf )	Carga Admisible Sugerida FS=3 ( kgf )	Rigidez axial Elástica K (kgf/mm) <sup>(1)</sup>	Deformación vertical Máxima <sup>(2)</sup> (mm)	Observaciones
CBR-AT-PAC-RS-24-01	15800	5267	10245	2.8	Pandeo global del conjunto ensayado.
CBR-AT-PAC-RS-24-02	14200	4733	9876	2.1	
CBR-AT-PAC-RS-24-03	15900	5300	12336	1.9	
<b>Promedio</b>	<b>15300</b>	<b>5100</b>	<b>10819</b>	<b>2.3</b>	
<b>Desviación Estándar</b>	<b>954</b>	<b>318</b>	<b>1327</b>	<b>0.5</b>	

De la tabla 3 se obtiene una rigidez axial 10819 (kgf/mm) a utilizar en el elemento finito “one joint link” tipo “friction isolator”

### 3.6 Conexión Ringlock Pie derecho – Horizontal

La unión entre los elementos standard/pie derecho – ledger/horizontal es determinante en el comportamiento estructural del cuerpo de andamio frente a sollicitaciones externas, ya que es esta unión la que permite que la estructura pueda trabajar en conjunto como un elemento rígido.

La conexión ringlock fue modelada por elementos Two-Joint Link de tipo Multilinear Elastic. En general, cada conexión está compuesta por seis “resortes” internos independientes, un resorte por cada grado de libertad. Además, cada resorte fue asignado con propiedades no lineales.

Para la representación de esta conexión se activan los 6 grados de libertad en el espacio, donde:

U1: resorte que representa deformación axial a lo largo del eje local 1.

U2: resorte que representa deformación por corte a lo largo del eje local 2.

U3: resorte que representa deformación horizontal a lo largo del eje local 3.

R1: resorte que representa la torsión en la conexión.

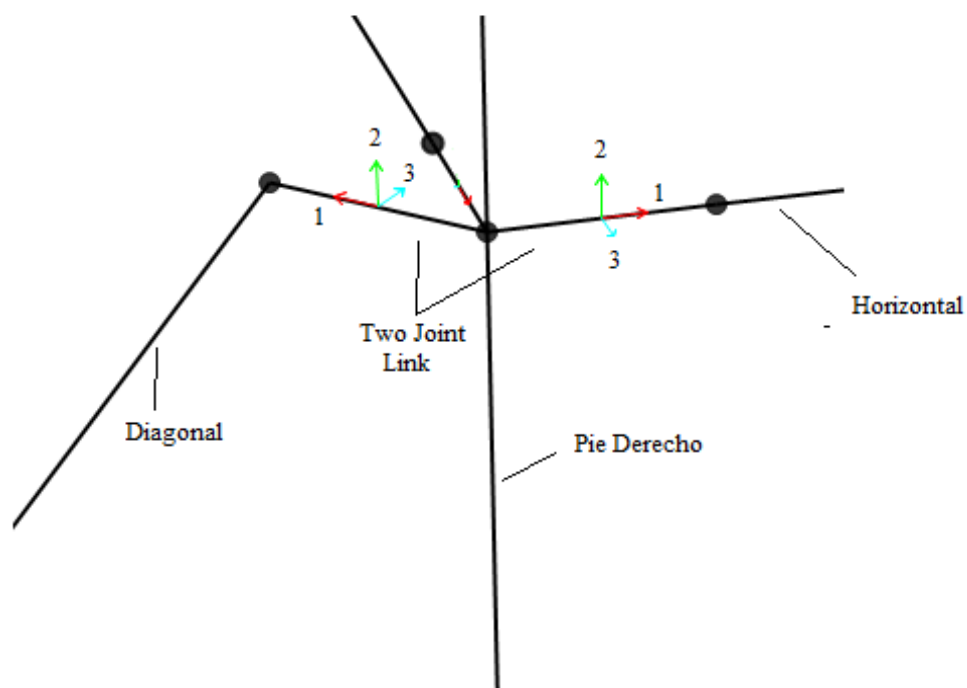
R2: resorte que representa la rigidez flexural en el eje local 2.

R3: resorte que representa la rigidez flexural en el eje local 3.

Se agina propiedad fija a los resortes U1 y R1 de la conexión y el comportamiento no lineal de los otros grados de libertad es distinto frente a cargas laterales paralelas y ortogonales. Las propiedades de cada resorte se obtienen de los resultados de los ensayos de flexión a unión tipo roseta y se representan por curvas carga- deformación, momento-giro presentadas en 3.6.1 y 3.6.2.

En la figura 16 se muestran los ejes locales del elemento finito que representa la conexión Ringlock.



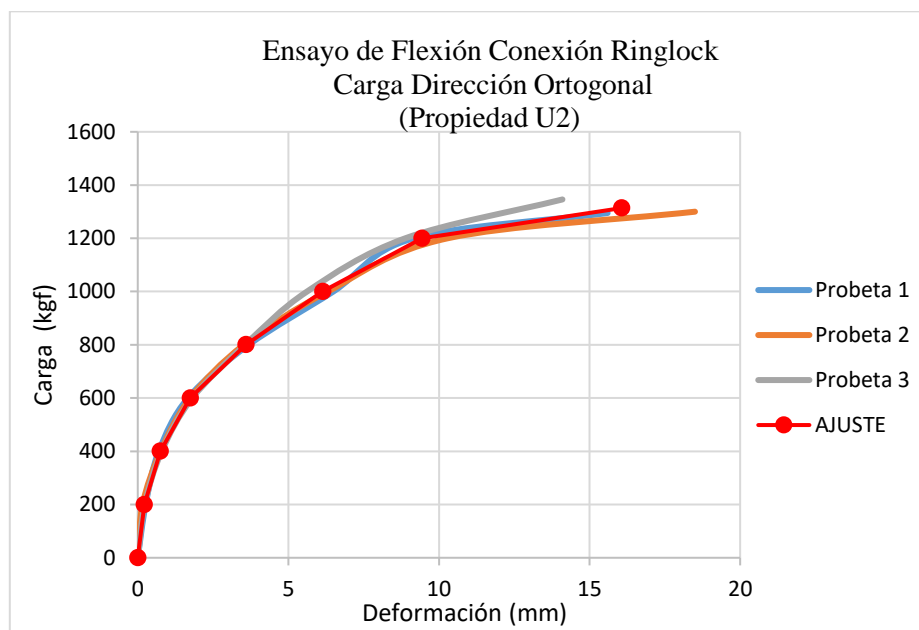


**Figura 16. Ejes locales Resorte conexión ringlock**

### 3.6.1 Ensayo de flexión a unión tipo roseta carga dirección ortogonal

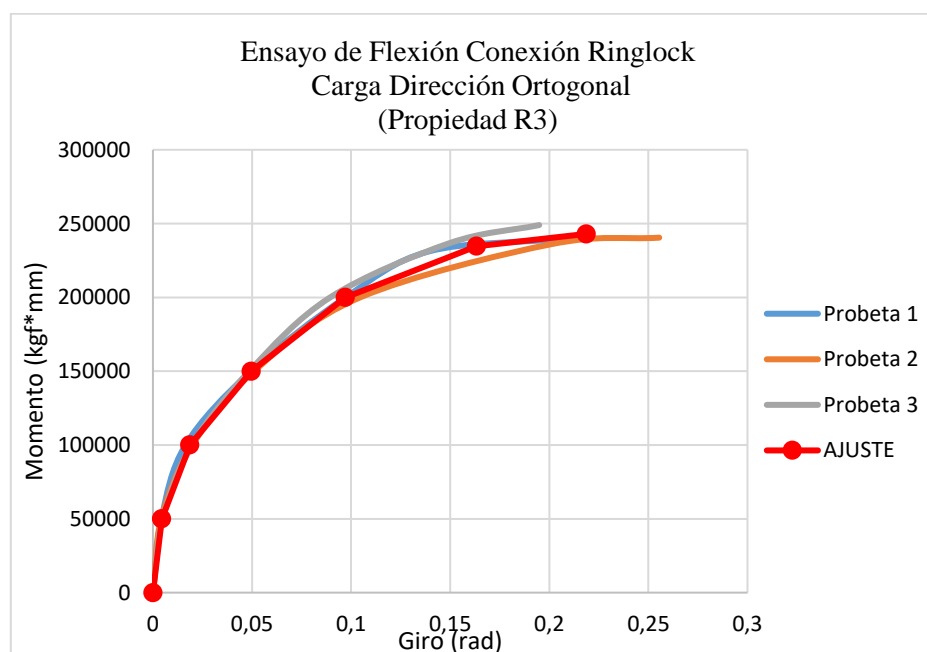
Se ensayaron tres probetas hasta obtener una falla por plastificación del sistema. El comportamiento fue de tipo inelástico, correspondiéndose con las deformaciones residuales con las que quedó la conexión. Se observó poca deformación por flexión en el travesaño cargado, siendo la roseta el elemento que presentó las mayores. La configuración y detalles del ensayo de flexión a la unión tipo roseta se encuentran en el anexo A.

A continuación, en la figura 17 se muestra el comportamiento general de las probetas en términos de curvas Carga Aplicada versus Deformación en el Apoyo.



**Figura 17. Gráfico carga-deformación, ensayo de flexión conexión ringlock carga ortogonal**

El objetivo del ensayo es caracterizar la unión mediante una rigidez flexural obtenida mediante la aplicación de carga máxima. Por ello se incluye una curva de Momento en la Roseta versus el Giro Promedio para el ensayo en dirección ortogonal, apreciables en la figura 18.

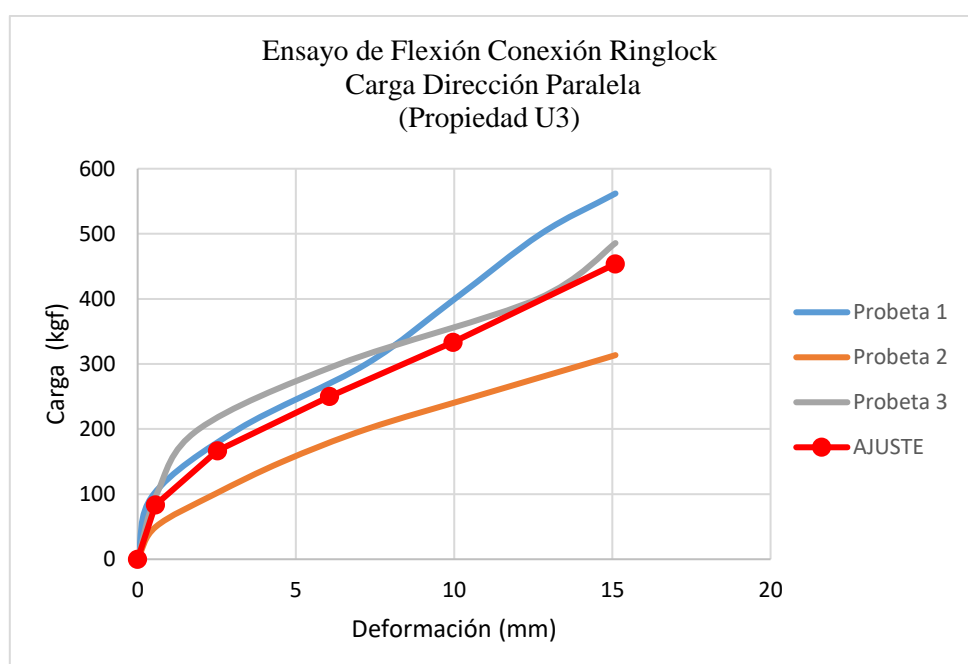


**Figura 18. Gráfico Momento-Giro ensayo de flexión conexión ringlock carga ortogonal**

### 3.6.2 Ensayo de flexión unión tipo roseta carga dirección paralela

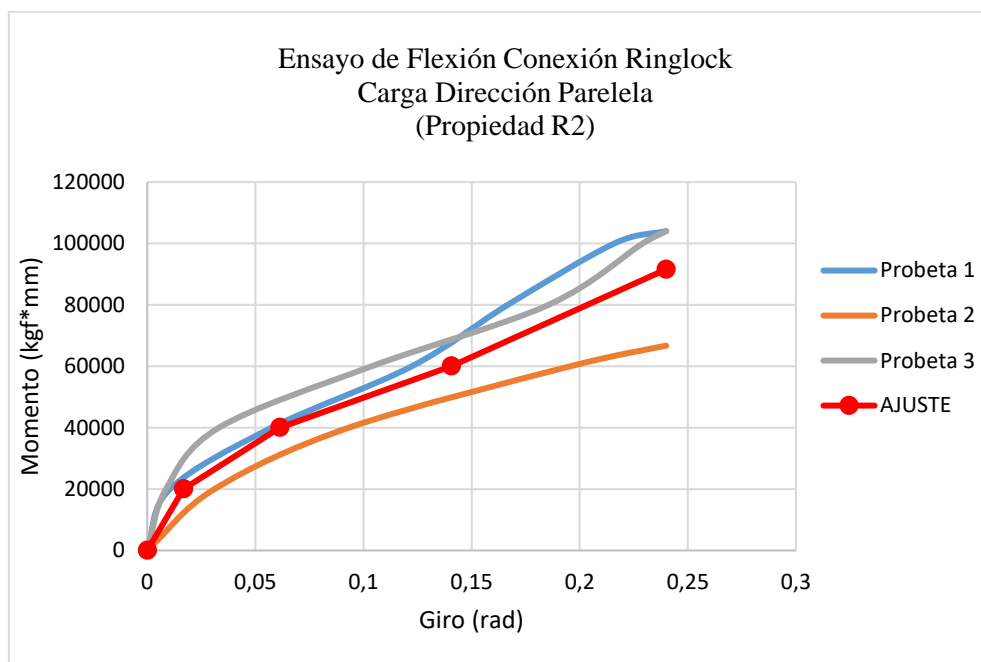
Se ensayaron tres probetas hasta obtener una falla por plastificación del sistema. El comportamiento fue de tipo plástico, correspondiéndose con las deformaciones residuales con las que quedó la conexión. La configuración y detalles del ensayo de flexión a la unión tipo roseta se encuentran en el anexo A.

A continuación, la figura 19 muestra el comportamiento general de las probetas en términos de curvas Carga Aplicada versus Deformación en Apoyo.



**Figura 19. Gráfico carga-deformación ensayo de flexión conexión ringlock carga paralela**

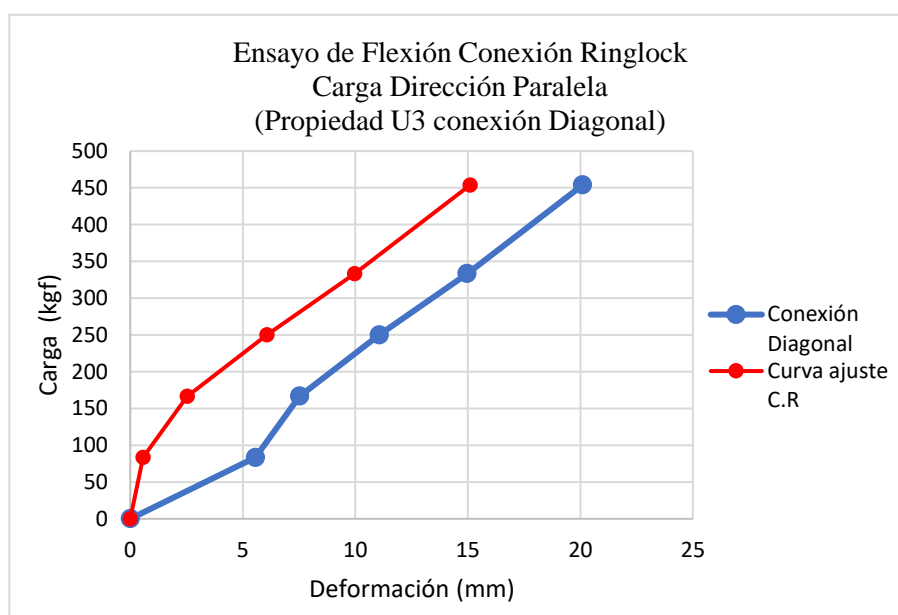
Como en el caso para el ensayo en dirección ortogonal, se caracteriza la unión tipo roseta mediante una rigidez flexural. Por lo cual, se incluye una curva de Momento en la Roseta versus el Giro Promedio para el ensayo en dirección paralela, apreciables la figura 20.



**Figura 20. Gráfico Momento-Giro ensayo de flexión conexión ringlock carga paralela**

### 3.6.3 Conexión Ringlock Pie derecho - Diagonal

La unión entre los elementos standard/pie derecho – diagonal corresponde al mismo sistema conexión ringlock detallada en el punto 3.6, salvo una variante en la propiedad del grado de libertad U3 (Figura 19), debido a que el orificio de la roseta para conectar la diagonal tiene una dimensión mayor al orificio para conectar el horizontal, por lo que al aplicar la carga lateral al cuerpo de andamio se produce un reacomodo de la conexión. Este reacomodo se representa en la zona baja de la curva carga – deformación mostrada en la figura 21 que aplica como propiedad para el grado de libertad U3, en la cual se observa que hasta alcanzar una deformación aproximada de 5 mm, la rigidez de la conexión es de un 10% de la rigidez máxima.

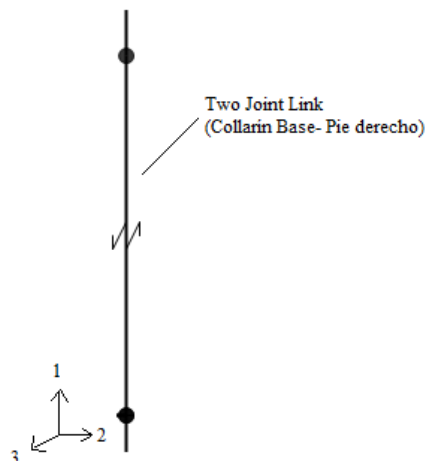


**Figura 21. Gráfico carga-deformación conexión ringlock pie derecho – diagonal**

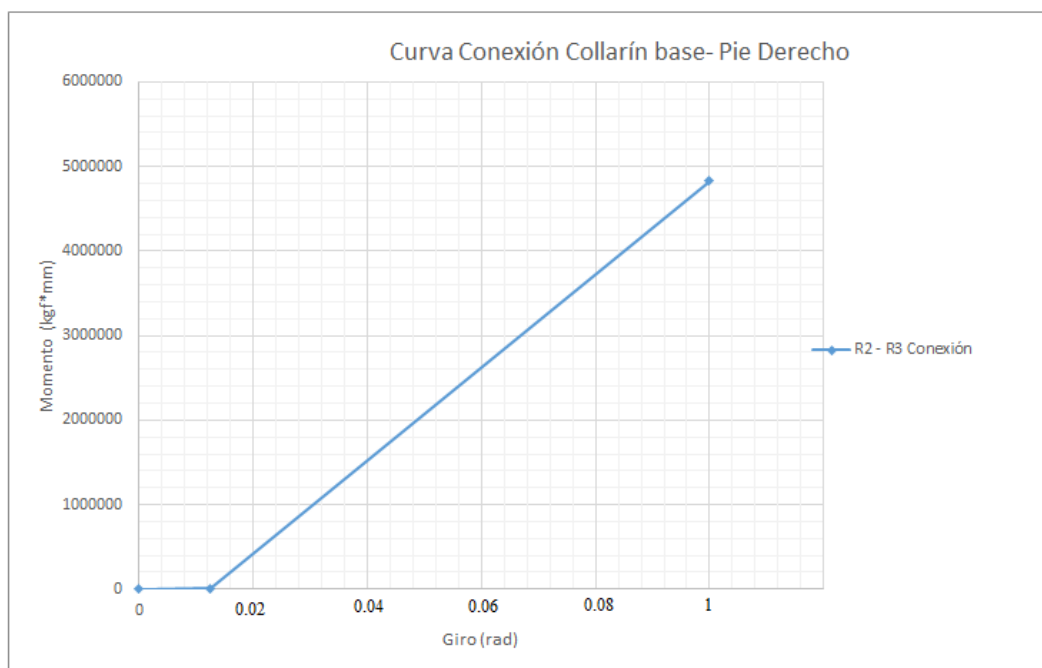
### 3.7 Conexión Collarín Base

La conexión collarín base – pie derecho fue modelada por el elemento Two-Joint Link de tipo Multilinear Elastic (Figura 22). Para la representación de esta conexión se activan los 6 grados de libertad en el espacio. Se asigna propiedad fija a los resortes U1, U2, U3 y R1, para representar la continuidad del elemento vertical que genera esta conexión. Por otro lado, a los resortes de los grados

de libertad R2 y R3 se les asigna la propiedad no lineal de la figura 23 que representa el comportamiento de la conexión cuando la estructura se ve sometida a cargas laterales.



**Figura 22. Resorte Conexión Collarín base – Pie derecho**



**Figura 23. Curva Momento – Giro (R2,R3) Conexión Collarín Base – Pie Derecho**

En la figura 23 se aprecia que la conexión presenta una 15% de su rigidez máxima hasta que alcanza un giro de 0.0125 (rad), lo cual representa un reacomodo de los elementos debido a la diferencia sus diámetros que se obtiene de cálculos que son posible encontrar en el anexo B.

### **3.8 Tipo de Análisis**

En este estudio, un análisis estático no lineal es usado para el análisis del cuerpo de andamio para considerar los efectos no lineales de las conexiones y de los materiales.

#### *3.8.1 Control de aplicación de la carga*

En un análisis estático no lineal, existen dos diferentes métodos de control de aplicación de la carga, los cuales son carga controlada y desplazamiento controlado. Cuando la magnitud de la carga que será aplicada es conocida y la estructura sea capaz de soportar esa carga, se utiliza el método carga controlada en el análisis. Cuando la deformación de la estructura en un nodo específico es conocida o se desea conocer, se utiliza la opción de desplazamiento controlado.

En este estudio se aplica el método de desplazamiento controlado, debido a que los desplazamientos son conocidos de los ensayos estructurales que se realizaron al cuerpo de andamio. Al momento de modelar, para el caso de la carga en sentido longitudinal el grado de libertad horizontal U1 del nudo D1 (figura 13) fue seleccionado como punto de monitoreo del desplazamiento. Para el caso de la carga en sentido transversal el grado de libertad horizontal U2 del nudo D2 (figura 14) fue seleccionado como punto de monitoreo del desplazamiento.

Es importante mencionar que la carga es aplicada en el nudo D1 (figura 13) en sentido longitudinal y en el nudo C2 (figura 14) en sentido transversal, ambas de tipo Pushover, esto es un método de análisis estático no lineal donde primero actúan las cargas gravitacionales en la estructura produciéndose las primeras deformaciones, luego pasan a actuar las cargas laterales monotónicas que se incrementan, paso a paso, en una dirección hasta que se forma la primera rótula plástica y se presenta una redistribución de rigidez de la estructura, y así prosigue un proceso iterativo hasta que la estructura falla totalmente.

#### *3.8.2 Control de solución*

Durante el análisis estático no lineal del desplazamiento controlado, el desplazamiento va incrementando hasta llegar al requerido, por lo que una serie de pasos son necesarios para satisfacer el equilibrio. Para resolver las ecuaciones no lineales en cada paso, las iteraciones se llevan a cabo hasta que la solución converge. Si no se logra la convergencia, el programa divide los pasos en sub-pasos más pequeños y lo intenta de nuevo.

La convergencia puede ser controlada mediante una serie de asignaciones tales como:

**Tolerancia de convergencia:** Es un criterio que asegura alcanzar el equilibrio en cada paso e influye directamente en el tiempo del análisis. Se utiliza una tolerancia de 0,0001, ya que al utilizar una tolerancia de convergencia cercana a 1 no se realiza un análisis detallado y se obtienen resultados sobredimensionados.

**Máximas iteraciones por paso:** Controla el número de iteraciones permitidas en un paso antes de que el programa requiera de un sub-paso más pequeño. Se utiliza un valor de 10.

**Máximos pasos nulos:** Los pasos nulos ocurren durante el procedimiento de solución no lineal cuando la iteración no converge y se intenta con un paso más pequeño. Un excesivo número de pasos nulos indica que el programa tiene problemas para converger. Se utilizan 50 pasos nulos a lo máximo.

#### **4. VALIDACIÓN DE MODELO**

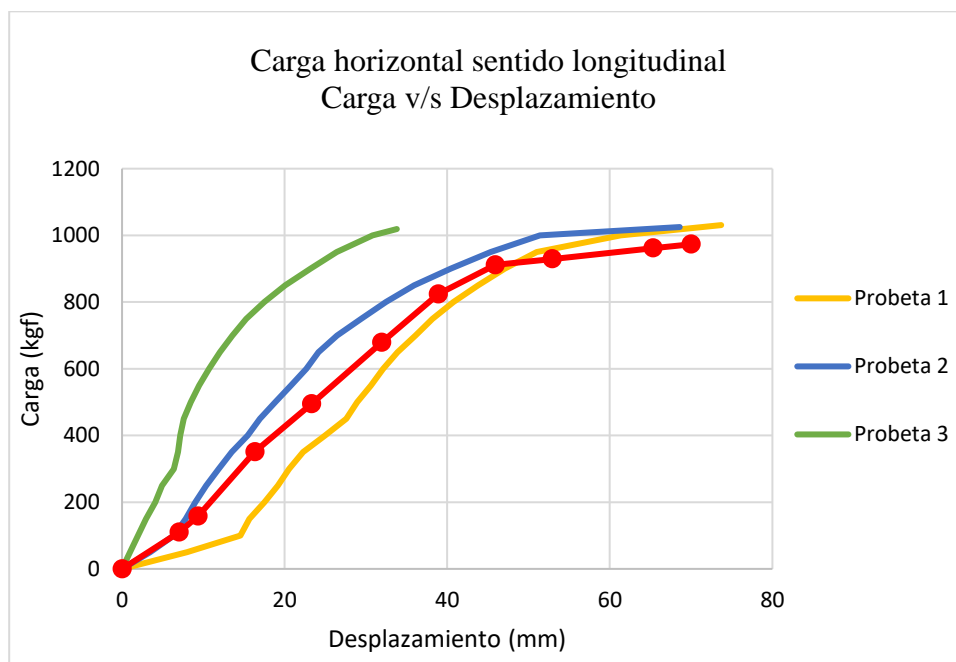
En este capítulo se exponen los resultados del análisis estático no lineal aplicado al modelo numérico calibrado en el software computacional SAP2000. Los resultados están expresados en forma de curvas carga - desplazamiento y muestran una representación total del comportamiento del cuerpo de andamio. Se menciona la palabra “total” ya que el cuerpo de andamio está conformado por un set de propiedades no lineales representadas por curvas carga-deformación, momento-giro en donde cada una influye en el comportamiento de la estructura.

La validez de los modelos es evaluada por una comparación de los datos que conforman las curvas carga-desplazamiento obtenidas tanto por los ensayos estructurales realizados por el DICTUC, como por los modelos numéricos. Específicamente la comparación se centra en la capacidad máxima resistente por ambos métodos y cómo se ven influenciados por el sistema de conexión ringlock.

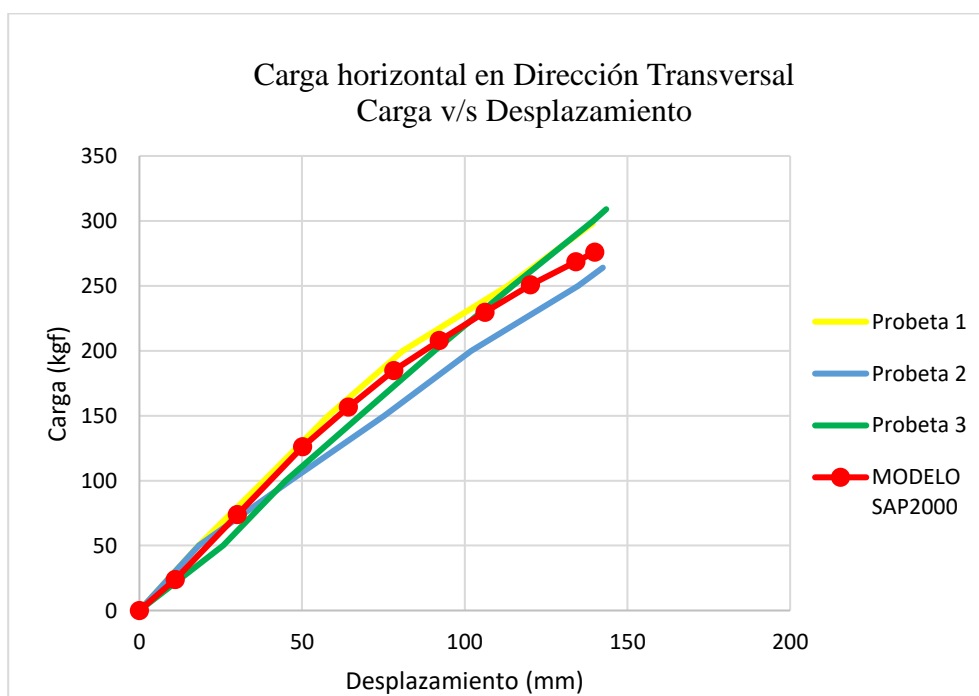
##### **4.1 Resultados**

Los gráficos carga-desplazamiento mostrado en las figuras 24 y 25 presentan, en forma simultánea, el comportamiento de 3 probetas de andamios ensayados para las dos configuraciones planteadas y la predicción del modelo respectivo para cada una de ellas.





**Figura 24. Gráfico Carga – Desplazamiento para carga horizontal sentido longitudinal**



**Figura 25. Gráfico Carga – Desplazamiento para carga horizontal sentido transversal**

La tabla 4 resume las cargas máximas y los respectivos desplazamientos máximos obtenidos por los modelos y por los ensayos estructurales. Tanto la carga máxima como el desplazamiento máximo de los 3 ensayos estructurales se promediaron. Los datos que componen la predicción en forma de curvas carga-desplazamiento realizada por los modelos se encuentran en el anexo C.

**Tabla 4. Resumen de Resultados Carga Máxima y Desplazamiento Máximo Asociado**

Sentido Carga		Output SAP2000	DICTUC	Diferencia
			(promedios)	(%)
Longitudinal	Cmáx	954.9	1025	6.84
	Dmáx	58.04	58.70	
Transversal	Cmáx	276.02	290	4.82
	Dmáx	140.04	140	

Nota: Cmáx: kgf.; Dmáx: mm.; R = Rigidez: kgf/mm

## 4.2 Análisis de resultados

Según la información entregada por los gráficos, al realizar la comparación ensayo estructural – modelo numérico, se puede apreciar un buen ajuste de la curva del modelo Sap2000 con respecto a la curva de los ensayos estructurales. Esto se confirma con los resultados de carga máxima mostrados en la tabla 4, que indican una diferencia mínima de 6,84% en sentido longitudinal y 4.82% en sentido transversal.

En el gráfico que representa el sentido longitudinal del andamio se pueden apreciar que la curva presenta en su inicio una pendiente baja, lo cual indica que el andamio adquiere su rigidez máxima luego de alcanzar un determinado desplazamiento, esto responde al reacomodo real que sufren las conexiones pie derecho-diagonal, pie derecho-collarín base y que fue representado en las propiedades no lineales de cada conexión. También es posible apreciar en la zona final de la curva una pérdida

considerable de rigidez del andamio, esto debido a que la diagonal al alcanzar su carga axial límite (-982 kg) pierde totalmente sus propiedades y su aporte a la rigidez del cuerpo es prácticamente nulo.

Con respecto al gráfico que representa el sentido transversal del andamio se observa que el comportamiento tiene una tendencia lineal considerable, sin embargo, se puede apreciar en su inicio una diferencia en la pendiente debido al reacomodo de la conexión pie derecho – collarín base que tiene definida en su propiedad (U3) una rigidez inicial del 15% de su rigidez máxima.

Finalmente, de la tabla 4 de los resultados se obtiene que la rigidez promedio output-DICTUC en el sentido longitudinal del andamio tiene un valor de 17 kgf/mm, que es considerablemente mayor a la rigidez de 2 kgf/mm en el sentido transversal del andamio. Esto se aprecia en la disminución de los desplazamientos horizontales y el aumento en la capacidad resistente de la cara longitudinal del andamio, debido a la clara influencia de la diagonal de arriostramiento.

## **5. APLICACIÓN MODELO NÚMÉRICO**

En capítulo se presenta la aplicación del modelo numérico validado a una estructura torre de andamios AT-PAC y que se somete a las cargas reales de uso. Se analizan 5 modelos de la torre con configuraciones distintas de la torre de andamios con el fin de realizar una verificación consistente de la regla de estabilidad exigida por la norma chilena (Nch998. Of 1999). Los resultados de este análisis estático no lineal aplicado al modelo están expresados en forma de curvas carga - desplazamiento y muestran una representación del comportamiento de la torre de andamio frente a las cargas solicitantes.

### **5.1 Estructura Torre de Andamios**

En la figura 26 se muestra un plano 2D de la estructura a estudiar que consiste en una torre de andamios cuyos elementos y conexiones presentan las mismas características y propiedades vistas en los capítulos anteriores. Esta torre tiene una dimensión en planta de 3.07 m x 0.73 m, una altura de 8 m más ring de seguridad (1 m) y además se considera un cuerpo lateral para dar la característica de andamio auto soportante.

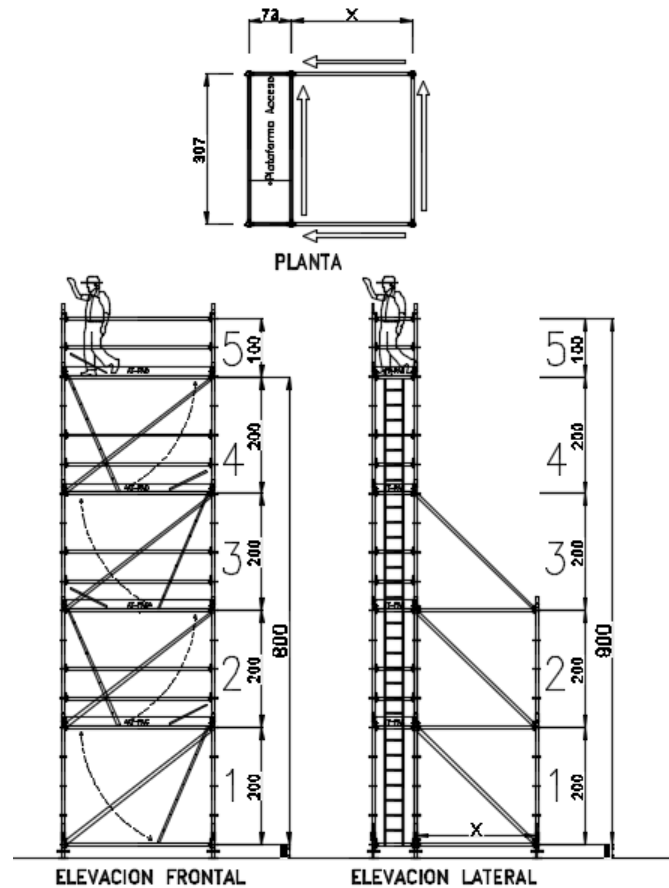


Figura 26. Plano 2D torre de andamios  $h= 8$  m.

## 5.2 Cargas Solicitantes

Las cargas que actúan sobre la estructura de andamio en estudio se presentan a continuación en 5.2.1 a 5.2.3

### 5.2.1 *Peso propio*

Del catálogo de productos AT-PAC, se define una carga muerta para las plataformas de  $31 \text{ kg/m}^2$ , la cual genera una carga distribuida de  $47.6 \text{ kg/m}$  sobre los travesaños de  $0.73 \text{ m}$ .

### 5.2.2 *Carga de uso*

Del punto 4.5 de la norma Nch.997. Of1999: Andamios – Terminología y clasificación, se define a la estructura en estudio como andamio Clase 1, lo que implica una carga de uso uniformemente repartida

de 75 kgf/m<sup>2</sup> sobre sus plataformas de trabajo, la cual es representada en el modelo como una carga distribuida de 115.13 kg/m sobre los travesaños de 0.73 m.

### 5.2.3 Carga de viento

Del punto 5.3 de la norma Nch2501/2 Of. 2000: Andamios metálicos modulares prefabricados – Parte 2: Requisitos estructurales; se obtiene la presión ejercida por el viento sobre la estructura de andamios. En la tabla 5 se presentan las cargas puntuales máximas ingresadas al modelo, que representan la presión provocada por la acción del viento. Estas cargas se aplican en los todos los nodos de la estructura en su altura respectiva.

**Tabla 5. Cargas de Viento**

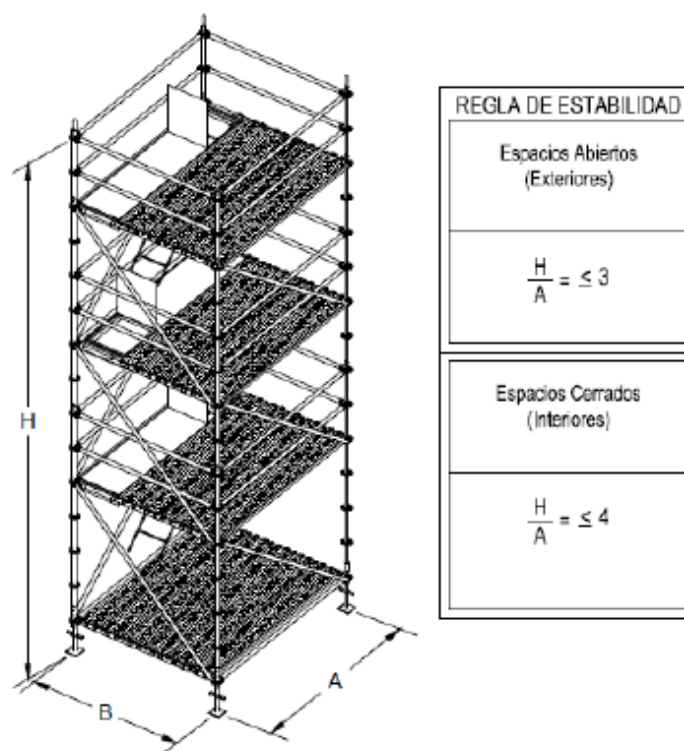
Altura (m)	Carga (kgf)
0	14.71
2	29.1
4	29.8
6	30.5
8	31.2

## 5.3 Casos de Estudio

Se define en el punto 5.5 de norma Nch988. Of 1999: Andamios – Requisitos generales de seguridad el siguiente criterio:

“En el caso de plataformas autosoportantes, la altura no debe exceder de 4 veces el lado mejor de la base, en montajes interiores; ni debe exceder 3 veces el lado menor, en montajes al exterior.”

En la figura 27 se presenta un esquema 3D explicativo de la regla de estabilidad establecida por la norma.



**Figura 27. Regla de estabilidad**

Aplicando lo exigido por la norma para el estudio en cuestión, el lado menor de la base debe tener una dimensión mínima de 2.67 metros, por lo tanto, la distancia X de la figura 26, debe tener un valor mínimo de 1.94 m.

Considerando lo anterior, se definen 5 casos de estudio con el objetivo de verificar la regla de estabilidad:

- Caso 1: Torre de andamios sin cuerpo lateral, X = 0 m. (No cumple regla)
- Caso 2: Torre de andamios con cuerpo lateral, X = 1.09 m. (No cumple regla)
- Caso 3: Torre de andamios con cuerpo lateral, X = 1.57 m. (No cumple regla)
- Caso 4: Torre de andamios con cuerpo lateral, X = 2.07 m. (Si cumple regla)
- Caso 5: Torre de andamios con cuerpo lateral, X = 2.57 m. (Si cumple regla)

Las distancias X definidas para cada caso se establecen según las medidas predeterminadas de los elementos horizontales que dispone la empresa AT-PAC.

## 5.4 Modelo Numérico

El modelo numérico de la torre de andamio en estudio presenta los mismos elementos y propiedades de conexión definidas en el capítulo 3.

La figura 28 muestra un esquema del modelo de la torre de andamios para el caso 1 y la figura 29 para los casos 2 al 5 (X varía según el caso), ambas presentan las dimensiones respectivas de la estructura y las cargas correspondientes al peso propio, de uso y viento.

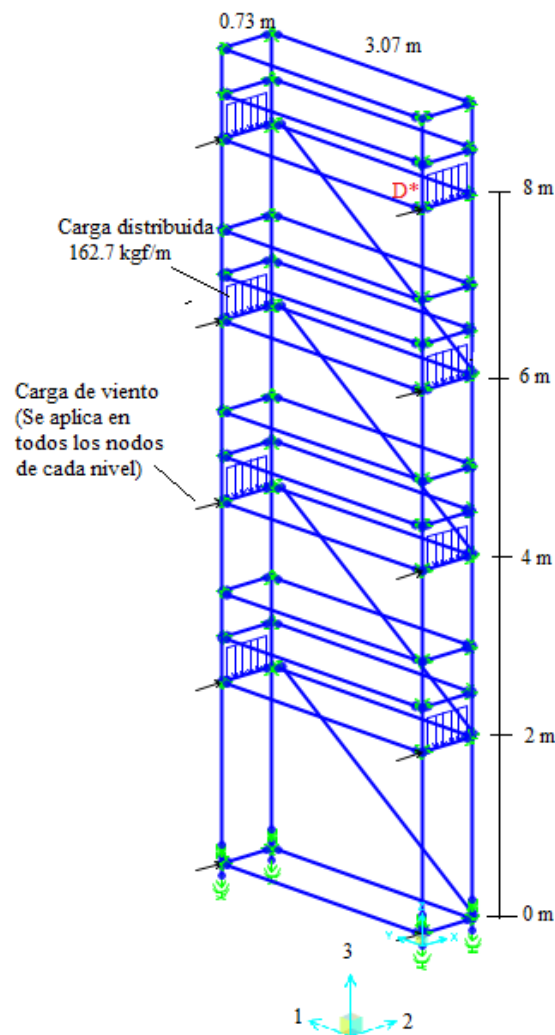
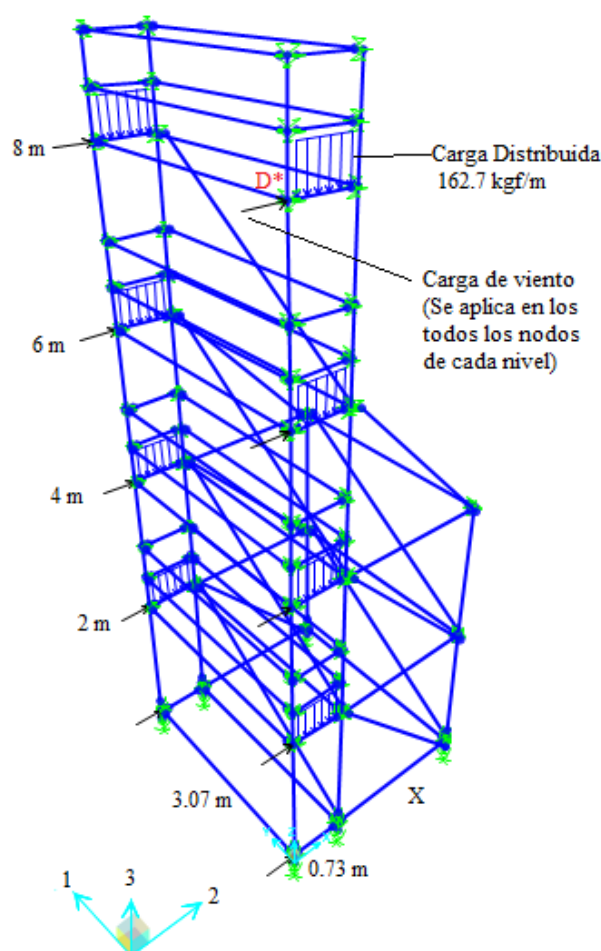


Figura 28. Modelo numérico (caso 1)



**Figura 29. Modelo numérico (caso 2,3,4,5)**

#### 5.4.1 Control de aplicación de la carga

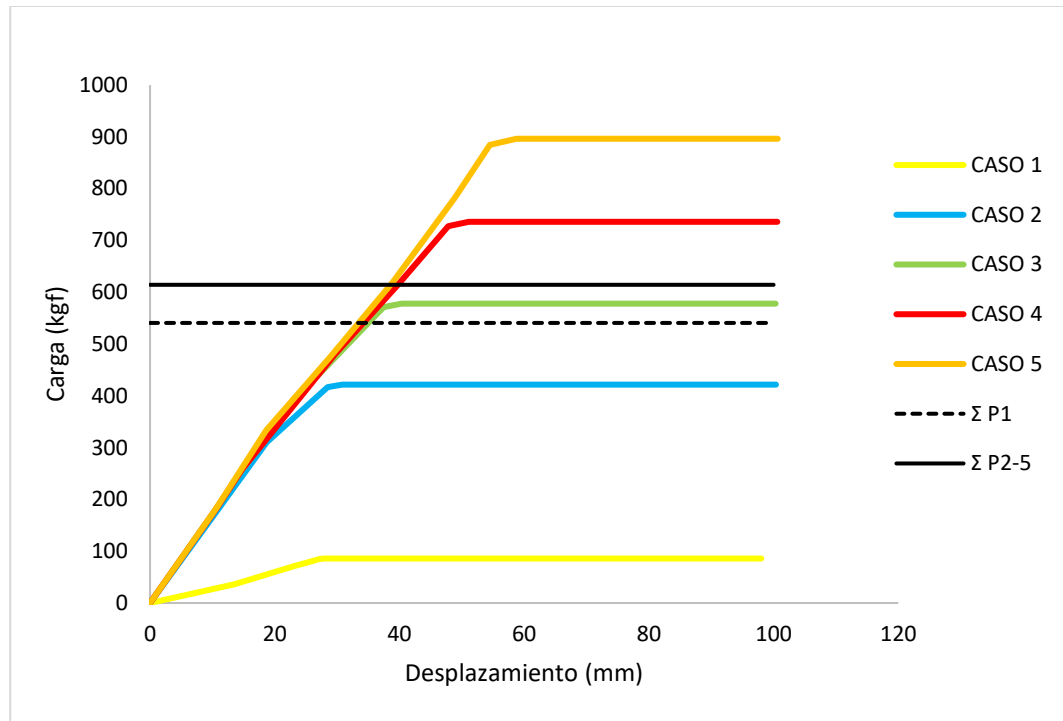
Se aplica el mismo tipo de análisis presentado en el punto 3.8, análisis pushover con método de desplazamiento controlado. En todos los modelos el grado de libertad U2 del nudo D\* (figura 28 y 29) fue seleccionado como punto de monitoreo de desplazamiento.

Es importante mencionar que la carga distribuida generada por el peso propio de las plataformas y por la carga de uso, actúan como cargas gravitacionales que producen las primeras deformaciones de la estructura y que las cargas laterales de viento que son aplicadas en la dirección global U2, son de tipo Pushover y son las que determinan luego del proceso iterativo la falla de la estructura.



## 5.5 Resultados

El gráfico carga-desplazamiento mostrado en la figura 30 presenta comportamiento de los 5 casos analizados que corresponden a las distintas configuraciones que se le dio a la torre de andamio.



**Figura 30. Gráfico resultados curvas carga v/s desplazamiento**

Donde:

$$\Sigma P1 = 540.8 \text{ (kgf)}$$

$\Sigma P1$ : Sumatoria de las fuerzas horizontales generadas por acción del viento para el caso 1.

$$\Sigma P2-5 = 614.4 \text{ (kgf)}$$

$\Sigma P2-5$ : Sumatoria de las fuerzas horizontales generadas por acción del viento para los casos 2,3,4,5.

## 5.6 Análisis de Resultados

Del gráfico de la figura 30 se obtiene que la estructura de andamios tiene una carga horizontal máxima admisible antes de perder resistencia y fallar por volcamiento. Para cada caso se presenta lo siguiente:

Caso 1: La carga de falla de la estructura de andamios es muy inferior a la sumatoria de las fuerzas generadas por acción del viento ( $\sum P1$ ), por lo que la torre de andamios no cumple con la regla de estabilidad.

Caso 2-3: La carga de falla de la estructura de andamios es menor a la sumatoria de las fuerzas generadas por acción del viento ( $\sum P2-5$ ), por lo que la torre de andamios no cumple con la regla de estabilidad.

Caso 4-5: La carga de falla de la estructura de andamios es considerablemente mayor a la sumatoria de las fuerzas generadas por acción del viento ( $\sum P2-5$ ), por lo que la torre de andamios en su dimensión cumple correctamente con la regla de estabilidad.

## 6. CONCLUSIONES

El modelo de elementos finitos desarrollado en este proyecto de título, puede realizar un análisis estructural estático no lineal y predecir un comportamiento óptimo y válido de los andamios prefabricados multidireccionales AT-PAC, en comparación al comportamiento mostrado por los cuerpos de andamios ensayados.

Durante la etapa de calibración del modelo, se logró determinar que las propiedades no lineales asignadas a la conexión ringlock afectan fuertemente a la predicción del comportamiento del andamio e influye directamente en su capacidad resistente, por otro lado, la propiedad no lineal asignada a la conexión vertical - collarín base representa de buena manera el reacomodo real que sufre la estructura al recibir cargas laterales.

El modelo numérico de este proyecto logra representar el efecto que provoca el uso la de diagonal de arriostramiento, ya que se registra un incremento considerable en la resistencia a la carga lateral y además al ingresar la carga axial límite permite definir el comportamiento del andamio cuando se alcanzan las cargas máximas resistentes y éstas dejan de aportar rigidez a la estructura.

El modelo validado permite analizar una estructura torre de andamio y verificar que la regla de estabilidad establecida por la norma chilena se ajusta con éxito al comportamiento real de los andamios en terreno. Sin embargo, la norma no considera todas las variables que pueden influir sobre los andamios, tales como: dirección desfavorable del viento, uso del andamio, disposición de los cuerpos laterales.

Debido a esto, la realización de este proyecto de título es un importante aporte para realizar próximos estudios, ya que gracias a este modelo se podrá analizar con mayor detalle todas las variables y condiciones que afectan en el comportamiento de los andamios.

## 7. BIBLIOGRAFIA

- [1] S.L. Chan and Z. H. Zhou. (1995). Stability analysis of semirigid Steel scaffolding. Department of Civil and Structural Engineering, Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong.
- [2] Laboratorio Ingeniería Estructural DICTUC. (2012). AT-PAC ring system scaffolding technical compliance testing. Dictuc, Pontificia Universidad católica de Chile, Chile.
- [3] SAP2000, versión 14.0: Analysis reference manual. Computer and Estructures, Inc., 2009.
- [4] Soeiro, Marcos Andrew Rabelo; Holanda, Aurea Silva and Patente Junior, Evandro. (2017). Nonlinear analysis of steel scaffolds for shoring of concrete structures. REM, Int. Eng. J. 2017, vol.70, n.1, pp.19-26.
- [5] Guillamón P. (2013). Stability analysis of different type of Steel scaffolds. Final Project, Politecnico di Torino, Italia.
- [6] Yu WK, Chung, K. F., and Chan, S. L. (2004). Structural instability of multi-storey door-type modular steel scaffolds. Engineering Structures. 2004; 26:867-81.
- [7] Tayakorn Chandrangsue, BSc, MSc; Kim JR Rasmussen, MScEng, PhD. (2009). Structural Modelling of Support Scaffold Systems. School of Civil Engineering, The University of Sydney, Australia.
- [8] Tobar Juan, Senior Scaffolding Expert. (2015). La revolución del andamio en Chile, Chile.

## 8. ANEXOS

### INDICE GENERAL ANEXOS

Anexo A .....	48
Anexo B .....	57
Anexo C .....	58

### INDICE DE TABLAS ANEXOS

Tabla A1. Resultados generales ensayo de flexión unión tipo roseta en dirección ortogonal....	52
Tabla A2. Resumen general ensayo de flexión unión tipo roseta en dirección ortogonal.....	53
Tabla A3. Resultados generales ensayo de flexión unión tipo roseta en dirección paralela.....	54
Tabla A4. Resumen general ensayo de flexión unión tipo roseta en dirección paralela.....	56
Tabla C1. Resultado Comportamiento Andamio Carga Sentido Longitudinal.....	58
Tabla C2. Resultado Comportamiento Andamio Carga Sentido Transversal.....	59

### INDICE DE FIGURAS ANEXOS

Figura A1. Vista lateral esquema del montaje de ensayo de flexión a unión tipo roseta (Dir. Ortogonal).....	50
Figura A2. Vista lateral esquema del montaje de ensayo de flexión a unión tipo roseta (Dir. Paralela).....	50
Figura A3. Vista lateral esquema de ubicación de los puntos de carga y medición para ambas variantes.....	50

Figura A4. Gráfico curvas carga aplicada – deformación en el apoyo ensayo de flexión carga dirección ortogonal.....	51
Figura A5. Gráfico curvas momento – giro ensayo de flexión carga dirección ortogonal.....	52
Figura A6. Gráfico curvas carga aplicada – deformación en el apoyo ensayo de flexión carga dirección paralela.....	54
Figura A7. Gráfico curvas momento – giro ensayo de flexión carga dirección paralela.....	55
Figura B1. Collarín base. ....	57
Figura B2. Standard/Vertical.....	57

## **Anexo A**

### **Ensayo de Flexión a Unión tipo roseta.**

#### **DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO**

El objetivo de este ensayo corresponde en determinar el comportamiento, niveles de resistencia y rigideces del sistema de conexión tipo que posee el sistema de andamio ensayado, mediante el cual se conectan los diferentes elementos horizontales y diagonales al pie derecho. Dicho sistema consiste en placas circulares, tipo rosetas, con perforaciones, existentes en forma distribuida en los pies derechos y piezas especiales dispuestas en los extremos del resto de los elementos tubulares, que cuenta con una pletina tipo cuña que actúa como pasador. Dada la geometría del sistema y la forma de conexión se realizan ensayos para evaluar los parámetros de interés en la dirección vertical y horizontal de la conexión.

En el montaje de este ensayo se intentó reproducir la sollicitación de la roseta tal como ocurre en su uso natural, formando parte de un pie derecho que conecta mediante ella a largueros, travesaños y diagonales. Para simular un elemento circular típico se utilizó una pieza de AT-PAC llamada ‘ménsula para una plataforma’, correspondiente a un perfil tubular de sección similar a los travesaños, pero con una longitud de 235 mm y una conexión en base a una pletina pasadora en un extremo del mismo tipo que tienen los elementos comunes. En términos generales, se conectó una ménsula a una roseta de un pie derecho y, en una primera instancia, se procedió a aplicar carga sobre la ménsula en dirección perpendicular al plano principal de la roseta; en una segunda instancia, la carga fue aplicada en dirección paralela a este plano. Esta sollicitación es realizada por medio de un gato hidráulico de 5 toneladas de capacidad, en el centro del vano de la ménsula, lográndose tener un brazo suficientemente pequeño como para reducir considerablemente la pérdida de energía por deformaciones flexurales del perfil de la ménsula.

Existen dos variantes de este ensayo, cada una con tres probetas testeadas:

- En Dirección Ortogonal al plano de la roseta: Se conectan cuatro travesaños a un pie derecho, dispuestos horizontalmente en el piso del Laboratorio, dos en una roseta y dos en otra roseta ubicada a 1000 mm de la anterior. Un quinto elemento, la ménsula, se une a una de esas rosetas de manera que recibe la carga del gato en el vano, a 185 mm del eje del pie derecho en dirección perpendicular al plano principal de la roseta. La reacción del sistema es proporcionada por dos elementos robustos en los que se apoya cada extremo del pie derecho. Esta dirección de carga simula un travesaño o larguero que está cargando una conexión tipo roseta en sentido gravitacional, todo lo anterior formando parte de un andamio montado convencionalmente. En la Figura A1 se esquematiza el montaje de esta variante del ensayo en cuestión.

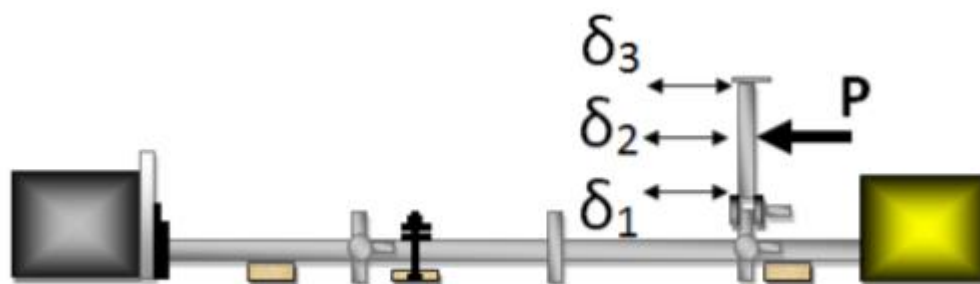
- En Dirección Paralela al plano de la roseta: Se conectan dos travesaños a una misma roseta de un pie derecho, dispuestos en sentido horizontal al nivel del piso del Laboratorio. A esta misma roseta, se une la ménsula mediante el sistema de pletina pasadora, la cual es cargada en su vano en la misma posición del caso anterior, pero de tal forma que la dirección de la carga es paralela al plano principal de la roseta. El sistema de reacción es similar al primer caso, con la salvedad de que los elementos que se reaccionan son los travesaños, como se puede ver en la Figura A2. Esta dirección de carga simula un travesaño o larguero solicitando una conexión tipo roseta en sentido lateral, todo lo anterior formando parte de un andamio montado convencionalmente.

Nótese que el elemento tipo diagonal, cuando está montado, efectúa una carga sobre la conexión de roseta que se puede descomponer en dos direcciones, una ortogonal al plano principal de la roseta y otra paralela a él. Así, esta situación queda comprendida en las dos variantes de este ensayo, anteriormente descritas.

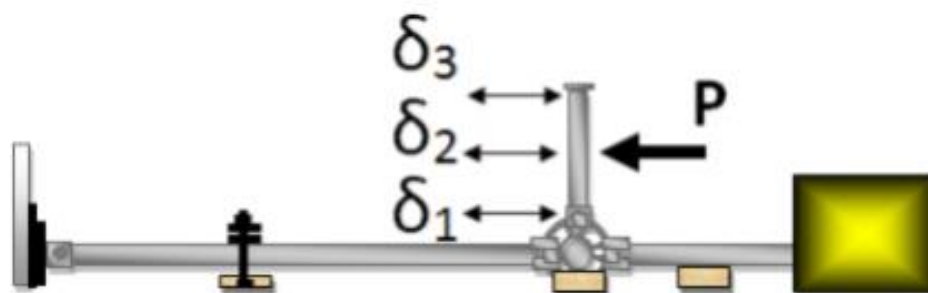
En ambos grupos de ensayos se instalan transductores en puntos específicos para medir la deformación del travesaño cargado en el sentido de la aplicación de la carga. Uno de ellos se ubica en un punto cercano al apoyo, otro a nivel de la aplicación de la carga y un último cercano al extremo libre. Para los detalles ver Figura A3.

Durante el ensayo se registraron los datos obtenidos (carga y deformación) mediante un equipo de adquisición de datos de origen alemán marca HBM, modelo QuantumX MX840A, bajo una frecuencia de muestreo de 2 Hz.

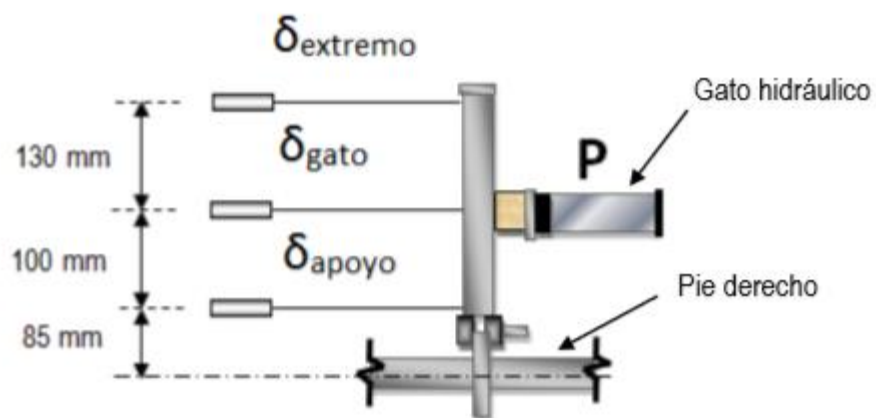




**Figura A1.** Vista lateral esquema del montaje de ensayo de flexión a unión tipo roseta (Dir. Ortogonal).



**Figura A2.** Vista lateral esquema del montaje de ensayo de flexión a unión tipo roseta (Dir. Paralela).



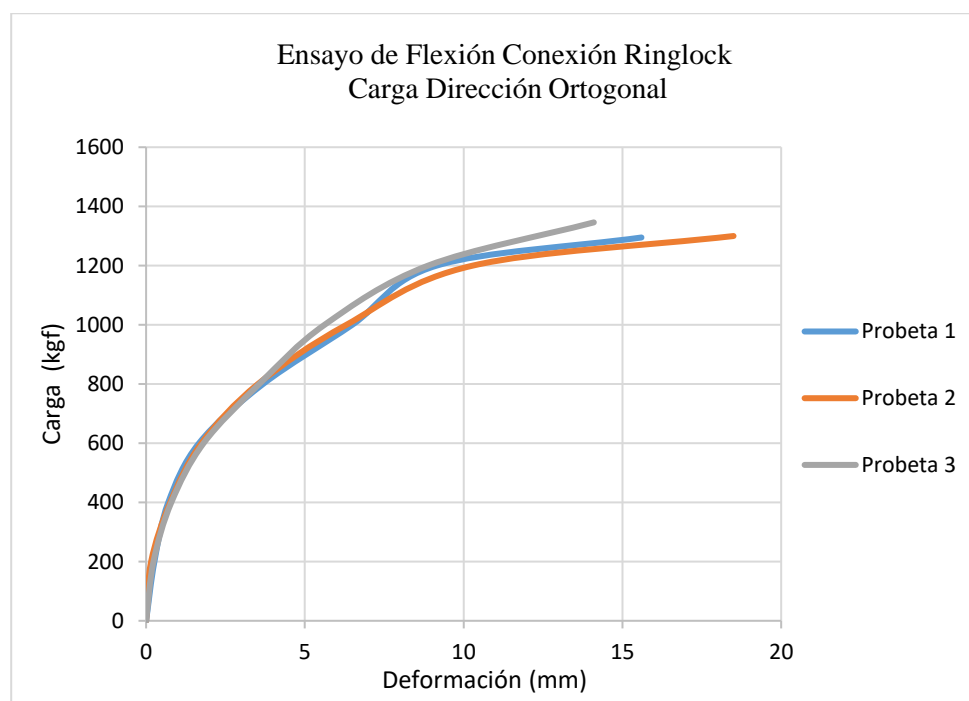
**Figura A3.** Vista lateral esquema de ubicación de los puntos de carga y medición para ambas variantes.

## RESULTADOS OBTENIDOS

### Dirección Ortogonal

Se ensayaron tres probetas hasta obtener una falla por plastificación del sistema. El comportamiento fue de tipo inelástico, correspondiéndose con las deformaciones residuales con las que quedó la conexión. Se observó poca deformación por flexión en el travesaño cargado, siendo la roseta el elemento que presentó las mayores.

A continuación, en la figura A4 se muestra el comportamiento general de las probetas en términos de curvas Carga Aplicada versus Deformación en el apoyo (∅1 en la Figura A1, para carga en dirección ortogonal al plano de la roseta).



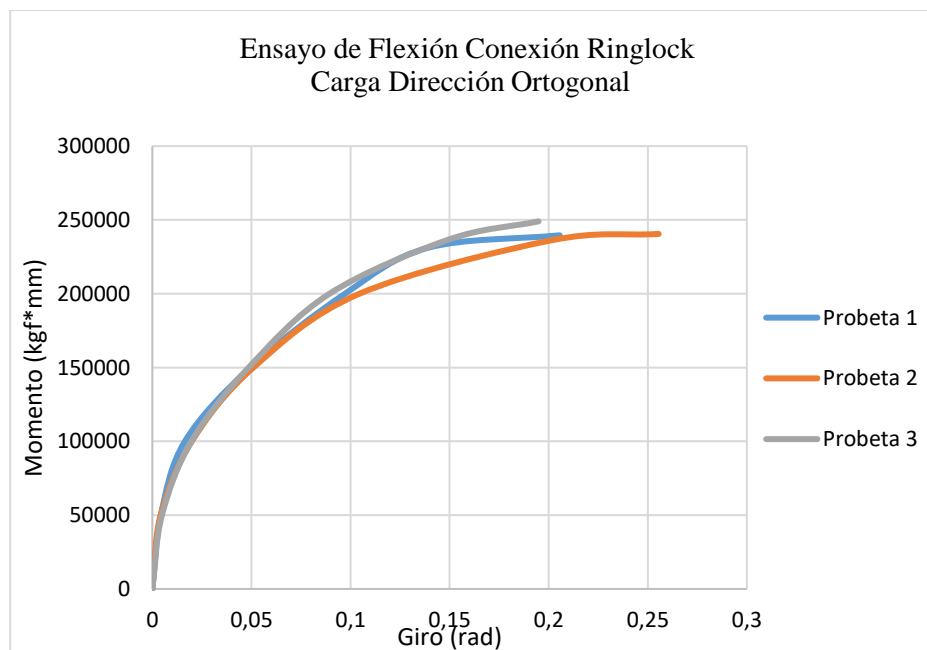
**Figura A4. Gráfico curvas carga aplicada – deformación en el apoyo ensayo de flexión carga dirección ortogonal.**

En la Tabla A1 se presenta un resumen de los resultados generales del ensayo de flexión a unión tipo roseta en dirección ortogonal, incluyéndose la carga máxima y deformación asociada a la medición en el apoyo  $\gamma_1$ , según se definió anteriormente.

**Tabla A1. Resultados generales ensayo de flexión unión tipo roseta en dirección ortogonal.**

Probeta	Carga máxima (kgf)	Deformación en apoyo asociada a carga máxima ( $\delta_1$ ) (mm)
FOUR-AT-PAC-RS-01	1295	15.6
FOUR-AT-PAC-RS-02	1300	18.5
FOUR-AT-PAC-RS-03	1346	14.1
<b>Promedio</b>	<b>1314</b>	<b>16.1</b>
<b>Desviación Estándar</b>	<b>28</b>	<b>2.3</b>

El objetivo de este ensayo es caracterizar la unión mediante una rigidez flexural obtenida mediante el criterio del 45% de la carga máxima. Por ello se incluye una curva de Momento en la Roseta versus el Giro Promedio para el ensayo en dirección ortogonal, apreciables en la figura A5.



**Figura A5. Gráfico curvas momento – giro ensayo de flexión carga dirección ortogonal.**

Un resumen de los parámetros detallados en estos gráficos se puede encontrar en la Tabla A2, la cual incluye, específicamente, el momento máximo y el giro promedio asociado, el giro promedio asociado al 45% del momento máximo, y la rigidez flexural de la unión para una carga en sentido Ortogonal.

**Tabla A2. Resumen general ensayo de flexión unión tipo roseta en dirección ortogonal.**

Probeta	Momento máximo (kgf-cm)	Giro promedio asociado al momento máximo ( $\bar{\theta}$ ) <sup>(1)</sup> (rad)	Giro promedio asociado al 45% del momento máximo ( $\bar{\theta}_{45\%}$ ) (rad)	Rigidez flexural asociada al 45% del momento máximo ( $K_{\theta}$ ) <sup>(2)</sup> (kgf-cm/rad)
FOUR-AT-PAC-RS-01	23958	0.205	0.020	548619
FOUR-AT-PAC-RS-02	24050	0.247	0.024	457853
FOUR-AT-PAC-RS-03	24901	0.190	0.025	455857
<b>Promedio</b>	<b>24303</b>	<b>0.214</b>	<b>0.023</b>	<b>487443</b>
<b>Desviación Estándar</b>	520	0.03	0.00	52990

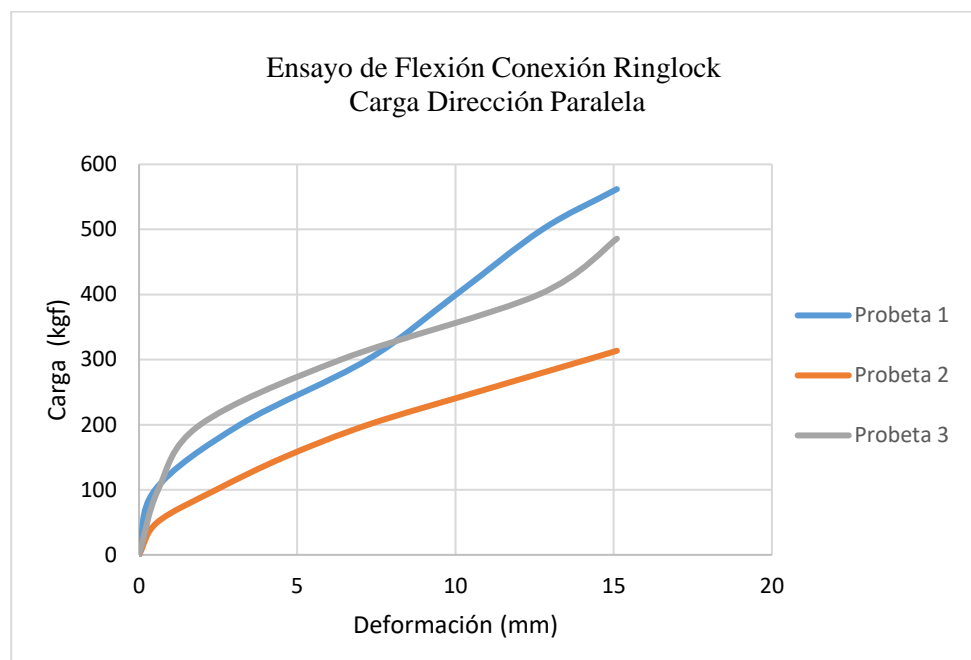
Nota: (1) Corresponde al promedio de los giros en torno al eje de conexión, calculados en los tres puntos de medición, inmediatamente cuando se alcanza el momento máximo. (2) Corresponde a la rigidez secante de giro de la unión roseta en sentido ortogonal, considerando como límite superior el 45% del momento máximo alcanzado, rango en el que se espera linealidad.

#### Dirección Paralela

Se ensayaron tres probetas hasta obtener una falla por plastificación del sistema. El comportamiento fue de tipo plástico, correspondiéndose con las deformaciones residuales con las que quedó la conexión. Se observó menor deformación por flexión en el travesaño cargado y en la roseta, pero sí plastificó la pletina pasadora de la ménsula.

A continuación, en la figura A6 se muestra el comportamiento general de las probetas en términos de curvas Carga Aplicada versus Deformación en el apoyo. (Y1 en la Figura A2, para carga en dirección Paralela).

Posteriormente, en la Tabla A3 se presenta un resumen de los resultados generales del ensayo de flexión a unión tipo roseta en dirección paralela, incluyéndose la carga máxima y deformación asociada para cada punto de medición, según se definió anteriormente.

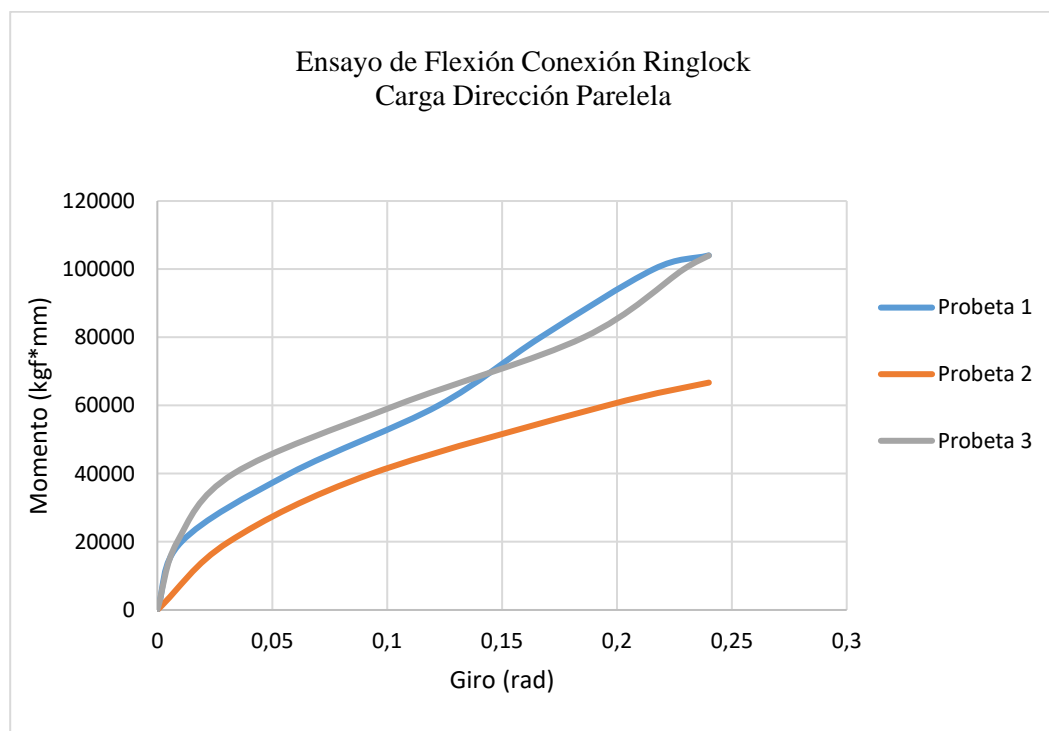


**Figura A6. Gráfico curvas carga aplicada – deformación en el apoyo ensayo de flexión carga dirección paralela.**

**Tabla A3. Resultados generales ensayo de flexión unión tipo roseta en dirección paralela.**

Probeta	Carga máxima (kgf)	Deformación en apoyo asociada a carga máxima (δ) (mm)
FPUR-AT-PAC-RS-01	562	15.1
FPUR-AT-PAC-RS-02	384	23.4
FPUR-AT-PAC-RS-03	603	19.7
<b>Promedio</b>	<b>517</b>	<b>19.4</b>
<b>Desviación Estándar</b>	<b>116</b>	<b>4.2</b>

Como en el caso para el ensayo en dirección ortogonal, se caracteriza la unión tipo roseta mediante una rigidez flexural obtenida mediante el criterio del 45% de la carga máxima. Por lo cual, se incluye una curva de Momento en la Roseta versus el Giro Promedio para el ensayo en dirección paralela, apreciables en la figura A7.



**Figura A7. Gráfico curvas momento – giro ensayo de flexión carga dirección paralela.**

En la Tabla A4 se entrega un resumen de los parámetros detallados en los anteriores gráficos, la cual considera, específicamente, el momento máximo y el giro promedio asociado, el giro promedio asociado al 45% del momento máximo, y la rigidez flexural de la unión para una carga en sentido paralelo.

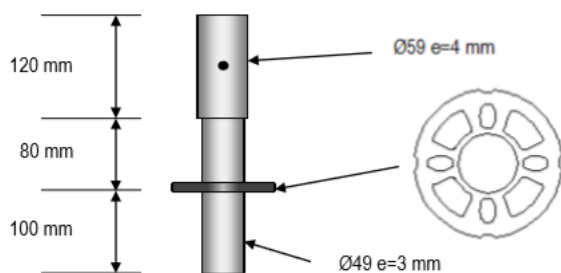
**Tabla A4. Resumen general ensayo de flexión unión tipo roseta en dirección paralela.**

Probeta	Momento máximo (kgf-cm)	Giro promedio asociado al momento máximo ( $\bar{\theta}$ ) <sup>(1)</sup> (rad)	Giro promedio asociado al 45% del momento máximo ( $\bar{\theta}_{45\%}$ ) (rad)	Rigidez flexural asociada al 45% del momento máximo ( $K_{\theta}$ ) <sup>(2)</sup> (kgf-cm/rad)
FPUR-AT-PAC-RS-01	10404	0.237	0.081	57832
FPUR-AT-PAC-RS-02	7110	0.281	0.068	47251
FPUR-AT-PAC-RS-03	11154	0.272	0.070	72037
<b>Promedio</b>	<b>9556</b>	<b>0.263</b>	<b>0.073</b>	<b>59040</b>
<b>Desviación Estándar</b>	<b>2151</b>	<b>0.02</b>	<b>0.01</b>	<b>12437</b>

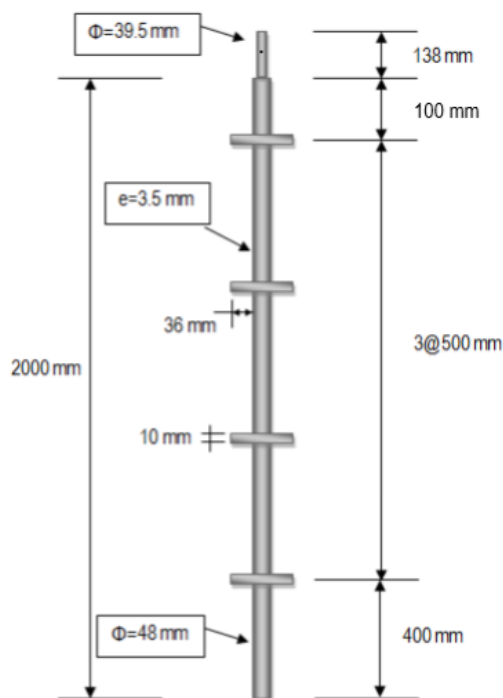
Nota: (1) Corresponde al promedio de los giros en torno al eje de conexión, calculados en los tres puntos de medición, inmediatamente cuando se alcanza el momento máximo. (2) Corresponde a la rigidez secante de giro de la unión roseta en sentido paralelo, considerando como límite superior el 45% del momento máximo alcanzado, rango en el que se espera linealidad.

## Anexo B

En la figura B1 y B2 se presentan esquemas geométricos de los elementos collarín base y standard/vertical respectivamente.



**Figura B1. Collarín base.**



**Figura B2. Standard/Vertical.**

De las figuras se obtiene la información necesaria para calcular el giro en radianes de la conexión, esto es:

- Diámetro collarín = 59 mm, espesor = 4 mm.
- Diámetro Vertical = 48 mm, espesor = 3.5 mm.
- Largo conexión = 120 mm.

Se define X, como la distancia que se genera en la conexión por la diferencia de diámetros y que permite el giro.

$$\rightarrow X = [(59 \text{ mm} - 2 * 4 \text{ mm}) - 48 \text{ mm}] * 0.5 = 1.5 \text{ mm}$$

$$\rightarrow \text{Angulo en grados} = \text{Sen}^{-1} (1.5 / 120) = 0.716^\circ$$

$$\rightarrow \text{Angulo en radianes} = 0.716^\circ * 0.0174533 = \mathbf{0.0125 \text{ rad}}$$



### Anexo C

Los resultados en forma de gráficos fueron presentados desde la figura 24 y 25 en el punto 4 Validación de modelo.

Los datos que conforman las curvas carga horizontal-desplazamiento horizontal resultantes del modelo realizado en SAP2000 se indican en las tablas C1 y C2 por cada tipo de sentido de carga del andamio.

**Tabla C1. Resultado Comportamiento Andamio Carga Sentido Longitudinal.**

<b>Output Sap2000</b>	
<b>Desp (mm)</b>	<b>Carga (kgf)</b>
0.015504	0
7.015504	109.63
9.332258	157.93
16.332258	350.88
23.332258	495.02
31.92287	678.56
38.92287	824.05
45.92287	911.22
52.92287	929.24
65.330894	961.97
70.015504	973.24

**Tabla C2. Resultado Comportamiento Andamio Carga Sentido Transversal.**

<b>Output Sap2000</b>	
<b>Desp (mm)</b>	<b>Carga (kgf)</b>
0.035427	0
11.009422	23.98
30.150029	73.89
50.229034	126.18
64.229034	156.67
78.229034	184.83
92.229034	207.87
106.229034	229.72
120.229034	250.74
134.229034	268.62
140.035427	276.02

