



**UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**

**DISEÑO DE SISTEMA PARA ENSAYO DE PROBETAS EN ESFUERZO  
DE FLEXO-COMPRESIÓN**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**DIEGO ELÍAS NACIF HARTLEY**

PROFESOR GUÍA:  
RICARDO HERRERA MARDONES

MIEMBROS DE COMISIÓN:  
MAURICIO SARRAZÍN ARELLANO  
JUÁN FELIPE BELTRÁN

SANTIAGO DE CHILE  
AGOSTO 2008

RESUMEN DE LA MEMORIA  
PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL  
POR: DIEGO NACIF H.  
FECHA: 22/08/2008  
PROF. GUIA: SR. RICARDO HERRERA M.

“DISEÑO DE SISTEMA PARA ENSAYO DE PROBETAS EN ESFUERZO  
DE FLEXO-COMPRESIÓN”

El objetivo general del presente trabajo de título fue el desarrollo del diseño de un sistema de ensayos experimentales, cuyo objeto de ensayo son columnas de edificios de no más de seis pisos escala 1:1. Los ensayos mediante este sistema permitirán: obtener información acerca del comportamiento estructural del espécimen ante sollicitaciones de flexo-compresión, que son comunes de encontrar en columnas de edificios de diversa índole; establecer curvas útiles para el diseño de estructuras que presenten elementos con este tipo de sollicitaciones; explorar nuevos materiales, o bien combinaciones de estos con hormigón, acero, híbridos, etc., puesto que no existe restricción respecto a la naturaleza de los especímenes objetivo.

Actualmente, la Universidad de Chile no tiene sistemas que permitan ensayar probetas en este tipo de esfuerzos combinados. Se propone construir sistema en la sala de máquinas del Centro de Investigación, Desarrollo e Innovación de Estructuras y Materiales (institución dependiente de la Universidad de Chile).

El trabajo de título incluye el diseño estructural y el diseño del sistema de control. El diseño estructural contempla el uso de una prensa existente en IDIEM, en la que se montará un sistema diseñado en acero, que permitirá ejercer el esfuerzo de flexión en la probeta, sin afectar los esfuerzos de compresión proporcionados por la prensa. La capacidad de carga que permite inducir el sistema es de 250 tonf y 150 tonf·m de esfuerzo axial y momento, respectivamente.

El desarrollo del sistema de control se hizo contemplando la necesidad de simpleza de operación, correcto desempeño, y monitoreo de posibles estados críticos para el sistema. El sistema de control fue desarrollado utilizando un lenguaje de programación orientada al objeto, especializado en manejo de sistemas de adquisición de datos y control. Dicho sistema monitorea rotaciones, desplazamientos, y fuerzas; e interviene a través de dos actuadores hidráulicos, utilizando un *controlador P* (Proporcional). Opera a través de una tarjeta de adquisición de datos ubicada en un computador, que procesa y almacena la información obtenida a través de los sensores durante todo el ensayo.

Se concluyó que, con respecto al diseño estructural, se obtuvieron dimensiones esperadas de los elementos constituyentes, en comparación con otros sistemas existentes similares. Con respecto al sistema de control, se pudo alcanzar el nivel de desarrollo necesario para proporcionar un sistema simple, adecuado para satisfacer las necesidades mínimas requeridas para una correcta ejecución, y expandible.

# Índice

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1.1. MOTIVACIÓN	1
1.2. OBJETIVOS	2
1.3. METODOLOGÍA	3
1.4. ORGANIZACIÓN DE LA MEMORIA	4
<b>2. REVISIÓN DE ANTECEDENTES</b>	<b>6</b>
2.1. NORMAS A UTILIZAR EN EL DISEÑO	6
2.2. PRENSA EXISTENTE	6
2.2.1. DESCRIPCIÓN	6
2.2.2. ENTORNO Y ELEMENTOS ADICIONALES	9
2.3. INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN	10
2.3.1. STRAIN GAUGE	10
2.3.2. CELDA DE CARGA	15
2.3.3. SENSORES DE DESPLAZAMIENTO (LVDT)	16
2.3.4. SENSORES DE ROTACIÓN (RVDT)	17
2.4. SISTEMA DE MEDICIÓN	18
2.4.1. ACONDICIONADOR DE SEÑAL	19
2.4.2. MULTIPLEXOR	20
2.4.3. CONVERTOR A/D	20
2.5. SISTEMAS DE ENSAYO EXISTENTES	20
2.6. MARCO TEÓRICO PARA CONSTRUCCIÓN DE DIAGRAMAS DE INTERACCIÓN	23
2.6.1. CONSTRUCCIÓN DE DIAGRAMAS DE INTERACCIÓN PARA PROBETAS DE HORMIGÓN ARMADO	24
2.6.2. CONSTRUCCIÓN DE DIAGRAMAS DE INTERACCIÓN PARA PROBETAS DE ACERO ESTRUCTURAL	27
2.7. SISTEMA DE ACTUADORES HIDRÁULICOS	27
2.8. CONTROLADORES PID	29
<b>3. PARÁMETROS DE DISEÑO</b>	<b>31</b>
3.1. TIPOS DE PROBETAS PARA LAS CUALES SE DISEÑA EL DISPOSITIVO	31
3.1.1. DIMENSIONES DE PROBETAS PERMITIDAS	31
3.2. DEFINICIÓN DE LOS LÍMITES DE MEDICIÓN	32
3.2.1. RESISTENCIAS MÁXIMAS Y MÍNIMAS	32
3.2.2. DEFORMACIONES MÁXIMAS	37
3.2.3. VELOCIDADES DE APLICACIÓN DE CARGAS	37

<b>3.3. MATERIALES</b>	<b>38</b>
<b>4. MODELO</b>	<b>39</b>
<b>4.1. DESCRIPCIÓN DEL MECANISMO</b>	<b>39</b>
<b>4.2. ELEMENTOS QUE COMPONEN EL SISTEMA ESTRUCTURAL</b>	<b>41</b>
4.2.1. VIGAS HORIZONTALES (A)	41
4.2.2. SISTEMA DE CONFINAMIENTO DE LAS CABEZAS DE LA PROBETA (C)	42
4.2.3. EXTENSIONES DE ACTUADORES LATERALES (E)	42
4.2.4. CABEZAL DE ROTACIÓN (F)	43
4.2.5. CAMA DE PRENSA (G)	44
<b>4.3. UNIONES DE ELEMENTOS</b>	<b>44</b>
4.3.1. CONEXIÓN MARCO DE FLEXIÓN PROBETA	45
4.3.2. CONEXIÓN VIGA HORIZONTAL – EXTENSIONES DE ACTUADORES LATERALES	49
<b>5. SISTEMA DE CONTROL</b>	<b>50</b>
<b>5.1. INTRODUCCIÓN AL SISTEMA DE CONTROL Y ADQUISICIÓN DE DATOS</b>	<b>50</b>
5.1.1. ADQUISICIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE SEÑALES	51
<b>5.2. SOFTWARE DE CONTROL</b>	<b>52</b>
5.2.1. ALCANCE Y OBJETIVOS	52
5.2.2. ESTRUCTURA DEL SOFTWARE	54
5.2.3. METODOLOGÍA PARA EL PROCESAMIENTO DE DATOS	57
<b>5.3. CALIBRACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL P</b>	<b>63</b>
<b>5.4. OPERACIÓN DEL SISTEMA</b>	<b>63</b>
<b>6. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES</b>	<b>66</b>
<b>6.1. DISCUSIÓN</b>	<b>66</b>
<b>6.2. CONCLUSIÓN</b>	<b>67</b>
<b>6.3. LIMITACIONES</b>	<b>68</b>
6.3.1. LIMITACIONES DE SOFTWARE	68
6.3.2. LIMITACIONES DE DISEÑO	68
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>69</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>I</b>
<b>ANEXO A: PROCEDIMIENTO DE MONTAJE</b>	<b>II</b>

<b>ANEXO B: MEMORIAS DE CÁLCULO</b>	<b>IV</b>
B.1. DISEÑO DE ELEMENTOS	IV
B.2. CONEXIONES	XXVIII
<b>ANEXO C: CÓDIGO DEL SOFTWARE</b>	<b>XXXVII</b>

<b>IV</b>
IV
XXVIII
<b>XXXVII</b>

## Lista de Figuras

FIGURA 1.1: DIAGRAMA DE ESFUERZOS DE UNA PROBETA .....	2
FIGURA 1.2: TRAYECTORIA DE ESFUERZOS EN UNA PROBETA .....	3
FIGURA 2.1: ESQUEMA DE PRENSA EXISTENTE .....	8
FIGURA 2.2: SISTEMA DE ARRIOSTRE SUPERIOR .....	9
FIGURA 2.3: RIEL Y PUENTE GRÚA .....	10
FIGURA 2.4: STRAIN GAUGE .....	11
FIGURA 2.5: PUENTE DE WHEATSTONE .....	12
FIGURA 2.6: SENSOR DE DESPLAZAMIENTO (LVDT).....	17
FIGURA 2.7: SENSOR DE ROTACIÓN .....	18
FIGURA 2.8: DIAGRAMA DE SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS Y CONTROL [8] .....	19
FIGURA 2.9: ESQUEMA DE SISTEMA DE ENSAYO UTILIZADO POR HULL [1] .....	21
FIGURA 2.10: CONEXIÓN CON PROBETA, SISTEMA UTILIZADO POR HULL [1] .....	21
FIGURA 2.11: ROTACIÓN ENTRE CABEZAS VS MOMENTO, HULL [1].....	22
FIGURA 2.12: DESPLAZAMIENTO ENTRE CABEZAS VS CARGA AXIAL, HULL [1].....	22
FIGURA 2.13: DIAGRAMA DE INTERACCIÓN NORMALIZADO [18].....	23
FIGURA 2.14: COLUMNA EN COMPRESIÓN EXCÉNTRICA [7].....	26
FIGURA 2.15: ESQUEMA DE CONTROL PARA ACTUADORES HIDRÁULICOS LATERALES [1] .....	28
FIGURA 2.16: ESQUEMA DE CONTROLADOR PID [4] .....	29
FIGURA 3.1: EDIFICIO DE ACERO MODELO [17] .....	33
FIGURA 3.2: DIAGRAMA DE INTERACCIÓN PARA H900X350X309.9 EN SU EJE FUERTE .....	34
FIGURA 3.3: PLANTA EDIFICIO HORMIGÓN ARMADO MODELO .....	35
FIGURA 3.4: SECCIÓN TRANSVERSAL PILAR .....	36
FIGURA 3.5: DIAGRAMA DE INTERACCIÓN PARA PILAR 65X65 DE H.A. [18].....	36
FIGURA 4.1: ESQUEMA DEL <i>MARCO DE FLEXIÓN</i> .....	40
FIGURA 4.2: SUPERFICIE DE CONTACTO .....	44
FIGURA 4.3: MODELO DE PLACA EN ZONA EN CONTACTO CON PROBETA .....	47
FIGURA 4.4: MODELO DE PLACA EN ZONA DE PERNO CON MAYOR SOLICITACIÓN .....	48
FIGURA 5.1: ESQUEMA DE SENSORES PERTENECIENTES AL SISTEMA DE CONTROL .....	54
FIGURA 5.2: DIAGRAMA DE FLUJO REALIZADO CON EL PROGRAMA LABVIEW [6] .....	56

## Lista de Tablas

TABLA 2.1: FICHA TÉCNICA DE PRENSA EXISTENTE.....	7
TABLA 2.2: TIPOS DE CELDAS DE CARGA [9] .....	16
TABLA 2.3: PARÁMETROS DEL BLOQUE DE ESFUERZOS EN EL CONCRETO [7] .....	25
TABLA 5.1: CARACTERÍSTICAS DE TARJETA PCI NI-6229 .....	52
TABLA 5.2: DISPOSICIÓN DE INSTRUMENTACIÓN EN LA TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS .....	56
TABLA 5.3: DISPOSICIÓN DE ELEMENTOS EN LAS SALIDAS DE LA TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS .....	57
TABLA 5.4: VARIABLES DE CONTROL Y SU INTERRELACIÓN .....	58
TABLA 5.5: RESUMEN DE MANEJO DE VARIABLES POR PROGRAMA LABVIEW .....	62

# Capítulo 1

---

## INTRODUCCIÓN

### 1.1. Motivación

Actualmente en Chile no existe máquina o prensa que permita desarrollar un estado de esfuerzo de flexo-compresión en probetas, cualquiera sea la índole de ésta.

El estado de esfuerzo de flexo-compresión ocurre comúnmente en columnas de edificios de hormigón armado, de acero, etc. En el diseño de estos elementos generalmente se recurre a diagramas de interacción para determinar sus dimensiones, forma, materiales, armadura, esbeltez, según sea el caso. Dichos diagramas han sido elaborados a partir de una base teórica, calibrada con resultados experimentales.

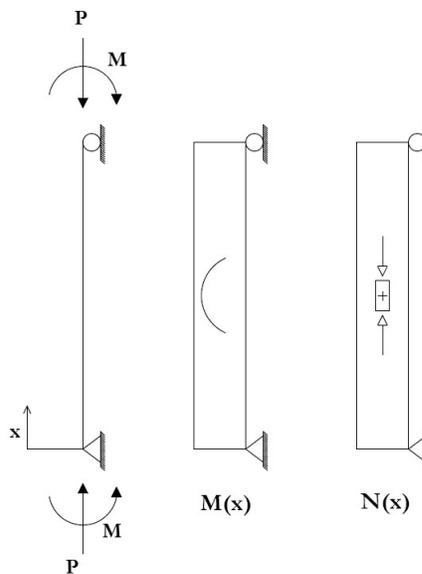
Mediante ensayos de flexo-compresión será posible validar en forma empírica directamente los diagramas de interacción de elementos estructurales, cualquiera sea su naturaleza.

## 1.2. Objetivos

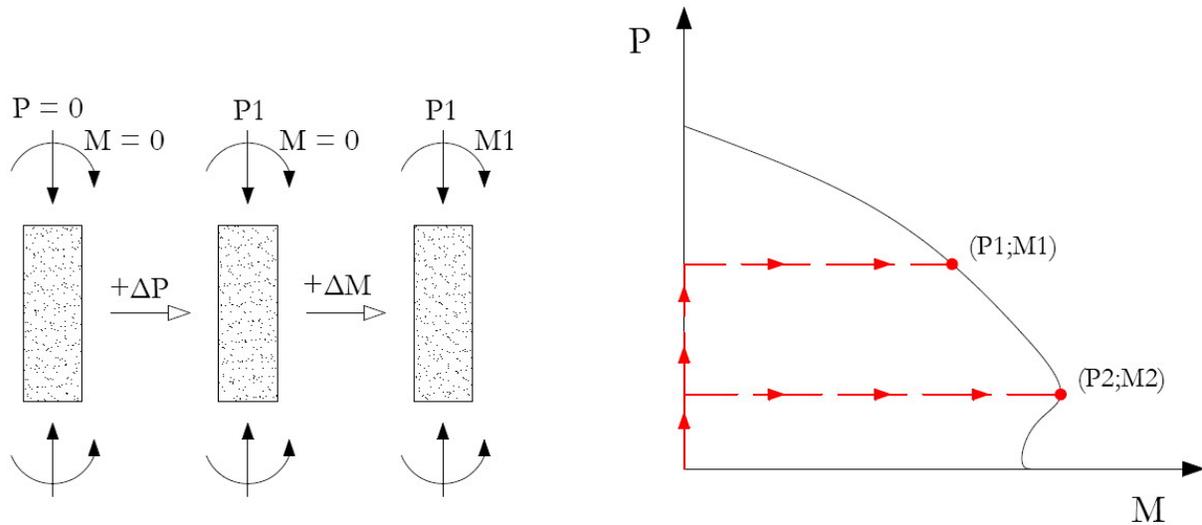
El objetivo principal del presente trabajo es el diseño de un sistema capaz de ensayar prototipos de columnas de edificios en escala 1:1 a flexo-compresión. El estado de esfuerzos internos buscado para una probeta en un ensayo ordinario se muestra en la Figura 1.1. Los esfuerzos durante un ensayo normal se desarrollarán de acuerdo a lo expuesto en la Figura 1.2, donde se aprecia que primero se aplica la fuerza axial, y posteriormente, el momento en forma independiente. Para todos los ensayos se busca el estado de falla de la probeta con el fin de determinar las resistencias últimas, y así poder generar puntos del diagrama de interacción para un conjunto de probetas similares.

A continuación se enumeran los objetivos específicos del presente trabajo:

- Determinar la situación actual en Chile y en el mundo de este tipo de máquinas para ensayos en flexo-compresión.
- Diseñar una estructura cuya función sea transmitir momento uniforme a una probeta sometida a carga axial constante.
- Confeccionar un software de control y manual de operaciones.
- Desarrollar un sistema de operación sencillo, seguro, y confiable.



**Figura 1.1: Diagrama de esfuerzos de una probeta**



**Figura 1.2: Trayectoria de esfuerzos en una probeta**

### 1.3. Metodología

La metodología a utilizar en el trabajo consiste básicamente en cuatro etapas:

1. *Prediseño*: consiste en definir el funcionamiento estructural, los elementos estructurales, dimensiones, uniones entre elementos, materiales, esquema de funcionamiento del mecanismo y elementos de medición, como también los parámetros de diseño. Se definen los tipos de probeta para los cuales se diseña la máquina, y los límites de diseño como: las velocidades de carga, límites de deformación, y esfuerzos máximos.
2. *Diseño*: se elabora el diseño verificando las deformaciones, esfuerzos y dimensiones de los elementos estructurales. También se identifican los límites de operación y estados críticos del sistema, además de establecer en forma precisa las relaciones estado de esfuerzo de probeta con estado de esfuerzo del mecanismo, y deformaciones relativas entre probeta e instrumento.
3. *Diseño lógico*: elaboración de software de control.
4. *Postdiseño*: Finalmente, como última etapa de desarrollo, se determina el procedimiento de montaje del equipo, y se elabora manual de ope-

ración.

## 1.4. Organización de la memoria

En el capítulo 2 *Revisión de antecedentes* del presente trabajo se hace una revisión de antecedentes y documentos existentes a la fecha en cuanto a temas contingentes con la memoria. Se explicitan las normas que se utilizan tanto en el diseño como en la definición de parámetros de diseño; también se presenta el actual estado en Chile y en el mundo de este tipo de máquinas. Se detalla también las características de la prensa existente actualmente en el centro IDIEM, la cual será parte del sistema de ensayo en flexo-compresión. Finalmente, se muestran los instrumentos de medición que dispondrá el sistema final, se detalla el montaje, la arquitectura del sistema de adquisición de datos, y la estructura del sistema de control.

En el capítulo 3 *Parámetros de diseño* se presentan los parámetros necesarios para el diseño de la prensa; se establecen medidas de distancia, características de los materiales que constituyen la estructura de la prensa, se definen los tamaños y formas de las probetas para las cuales se diseña el sistema, también se presentan los límites permitidos en la velocidad de aplicación de las cargas, y las capacidades máximas de esfuerzos de la prensa.

En el capítulo 4 *Modelo* se hace una descripción completa del mecanismo y funcionalidad del sistema estructural. Se detallan características de los elementos explicando su función en el sistema. También, se determinan los tipos de uniones entre los elementos.

En el capítulo 5 *Sistema de control* se define el alcance y objetivos del programa que controla todo el sistema, detallando las formas en que interviene, y las posibilidades de interacción. Se presenta la estructura del programa con el diagrama de flujo y subrutinas que sean necesarias para satisfacer las necesidades explicitadas en la primera parte de este capítulo.

En el capítulo 6 *Discusión y conclusiones* se hace un análisis cualitativo del modelo desarrollado en la memoria, discutiendo los posibles problemas de implementación, la seguridad laboral del usuario, y la eficiencia del sistema con

respecto a los objetivos.

# Capítulo 2

---

## REVISIÓN DE ANTECEDENTES

### 2.1. Normas a utilizar en el diseño

En el diseño del *sistema de flexión* se utiliza la *Specification for Structural Steel Building* de American Institute of Steel Construction Inc. (AISC 2005).

Para la definición de las velocidades de aplicación de cargas durante los ensayos se utiliza la norma chilena Nch 1037.of1977 (INN, 1997).

### 2.2. Prensa existente

#### 2.2.1. Descripción

Se llama *prensa existente* a la máquina que se encuentra en el ala oeste de la sala de máquinas del IDIEM<sup>†</sup>. Actualmente se utiliza para ensayar probetas a

---

<sup>†</sup> IDIEM. Centro de Investigación, Desarrollo e Innovación de Estructuras y Materiales. Es una institución dependiente de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile. Se ubica en Plaza Ercilla 883, comuna Santiago, Santiago de Chile.

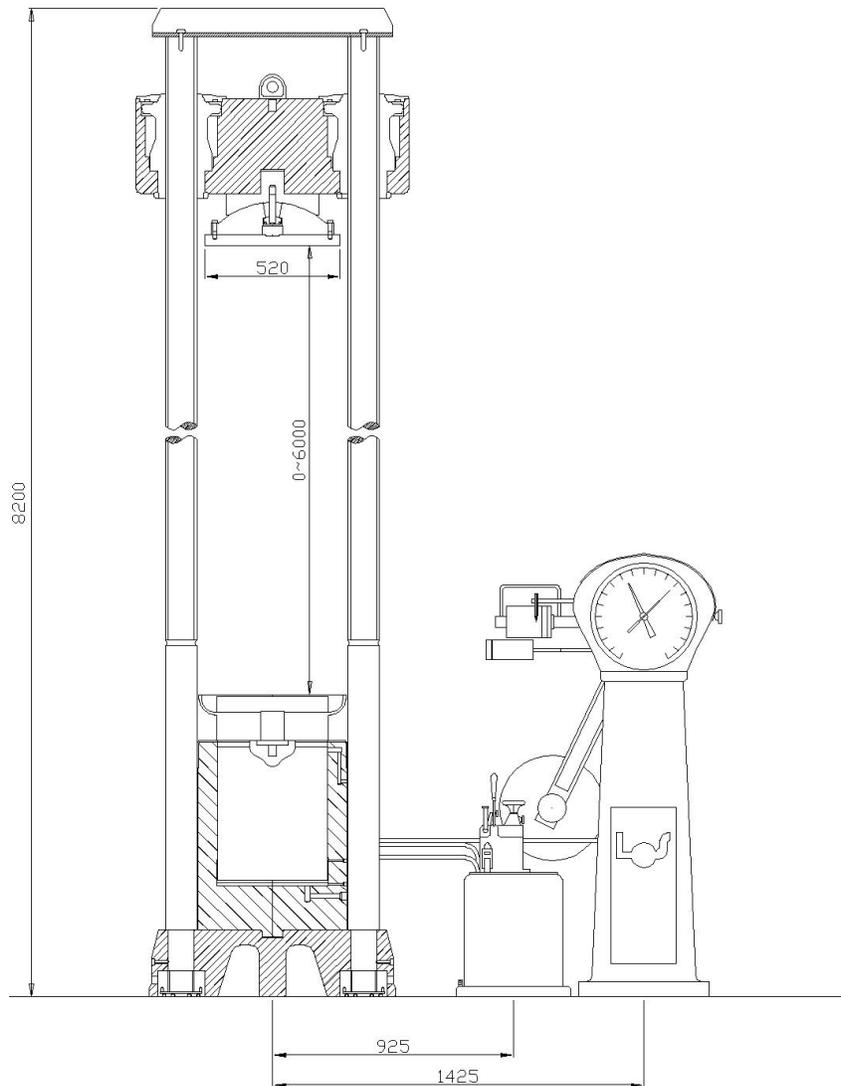
compresión pura, y para ensayos de vigas de hormigón armado a flexión escala 1:1.

Es de marca alemana *Losenhausenwerk*, fue diseñada en 1940 y construida en 1949. Está construida con elementos de acero, tiene una altura de 8,2 m, además de contar con una unidad de potencia como se muestra en la parte derecha de la Figura 2.1. Las características mecánicas generales de la prensa y la unidad de potencia se muestran en la Tabla 2.1.

**Tabla 2.1: Ficha técnica de Prensa Existente**

FICHA TÉCNICA	
Marca	Losenhausenwerk
Año de fabricación / N°	1949 / 13613
Capacidad	500 tonf
Tipo de máquina	Ensayos compresión - flexión hidráulica
Objetivo	Tracción - compresión
Escala de carga	500 tonf - 250 tonf - 100 tonf
Sensibilidad	1000 kgf - 500 kgf - 200 kgf
Luz entre platos	0 m - 6,4 m
Luz entre apoyos de flexión	30 cm - 400 cm
Luz entre columnas	58 cm
Diámetro de apoyos de flexión	50 mm
Ancho de apoyos de flexión	40 cm
Carrera del émbolo	16 cm
Diámetro del émbolo	42,2 cm
Presión máxima de trabajo	374,48 kgf/cm <sup>2</sup>
Carrera cabezal inferior	28 cm
Dimensión plato superior	50 x 80 cm
Dimensión plato inferior	50 x 80 cm
Velocidad de desplazamiento cabezal	1,39 a 13,65 mm/min
Control de velocidad	Manual - automático
Motor principal / motor cabeza mobil	2,2 kv / 5 HP
Aceite hidráulico	Mobil DTE EXTRA HEAVY

Funciona en base al movimiento de un émbolo hidráulico de doble acción ubicado en la base, sobre el cual se sitúa el cabezal móvil o cabezal inferior. En su parte superior tiene un dispositivo en donde se ubica el cabezal superior. Este dispositivo puede desplazarse, por medio del impulso de un motor, a lo largo de las dos columnas que se irguen desde la base hasta lo más alto de la prensa. Durante un ensayo, el cabezal superior se mantiene fijo en todo momento, es el cabezal inferior el que, por medio del movimiento del émbolo hidráulico, imprime el esfuerzo axial en la probeta.

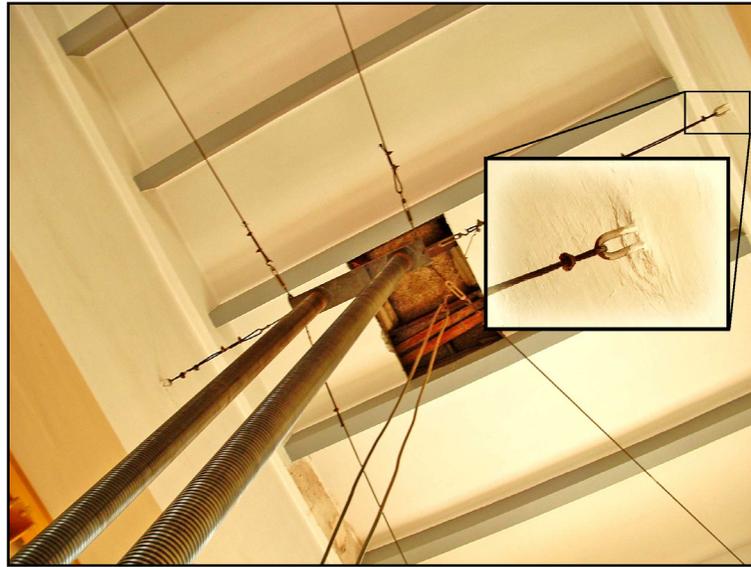


**Figura 2.1: Esquema de Prensa Existente**

La prensa se encuentra anclada a la fundación del edificio por medio de insertos en su base. Su parte superior se encuentra arriostrada a desplazamientos paralelos al plano del suelo por medio de cables anclados al edificio como se muestra en la Figura 2.2.

Las fuerzas que se ejercen sobre la probeta son medidas en base a la presión que desarrolla el fluido que alimenta el actuador hidráulico. Este método no es muy preciso (ver sensibilidad en Tabla 2.1), por lo que en ciertas ocasiones se dispone de un sensor de presión más preciso.

Actualmente la prensa se encuentra en perfecto estado. En su historia sólo ha mostrado una falla menor: durante un ensayo de un aislador sísmico, una cañería que se encarga de transportar el fluido (aceite hidráulico) desde la unidad de potencia al actuador hidráulico, reventó. Esta fue repuesta oportunamente por una cañería flexible (las originales son rígidas), y hoy en día opera sin problemas. El resto de los elementos que componen la prensa se encuentran en buen estado, no presentan signos de desgaste, óxido o golpes.



**Figura 2.2: Sistema de arriostre superior**

### *2.2.2. Entorno y elementos adicionales*

La prensa se ubica, como se ha mencionado anteriormente, en la sala de máquinas de IDIEM. En ese lugar existe un puente grúa que es utilizado para el montaje de probetas y elementos en la prensa. Se considera, dicha grúa, como elemento base en el montaje del sistema de flexión y otros elementos. Tiene una capacidad de levante de 5 toneladas y una altura de operación desde nivel de terreno de 5,5 m. Es operada manualmente mediante un sistema de poleas y cadenas.

Existe también, un sistema de rieles a nivel de terreno (ver Figura 2.3 A), los cuales actualmente se utilizan en el montaje de una viga en el cabezal inferior de la prensa, para ejecutar el ensayo de viga de hormigón armado en escala 1:1. En la Figura 2.3 B se muestra en el fondo el puente grúa, y en el centro, la

dos columnas de acero pertenecientes a la prensa.



**A) Riel**



**B) Puente Grúa**

**Figura 2.3: Riel y Puente Grúa**

El espacio de trabajo, vale decir la distancia entre la prensa y los muros de la sala, o bien a elementos inamovibles, es apropiado para los objetivos de montaje y utilización del sistema de ensayo para probetas en flexo-compresión.

## 2.3. Instrumentos de medición

### 2.3.1. Strain Gauge

El Strain Gauge es uno de los sensores de deformación más usados en el mundo, especialmente, en las áreas de ingeniería civil e industrias debido a su bajo costo, y amplia disponibilidad en el mercado.

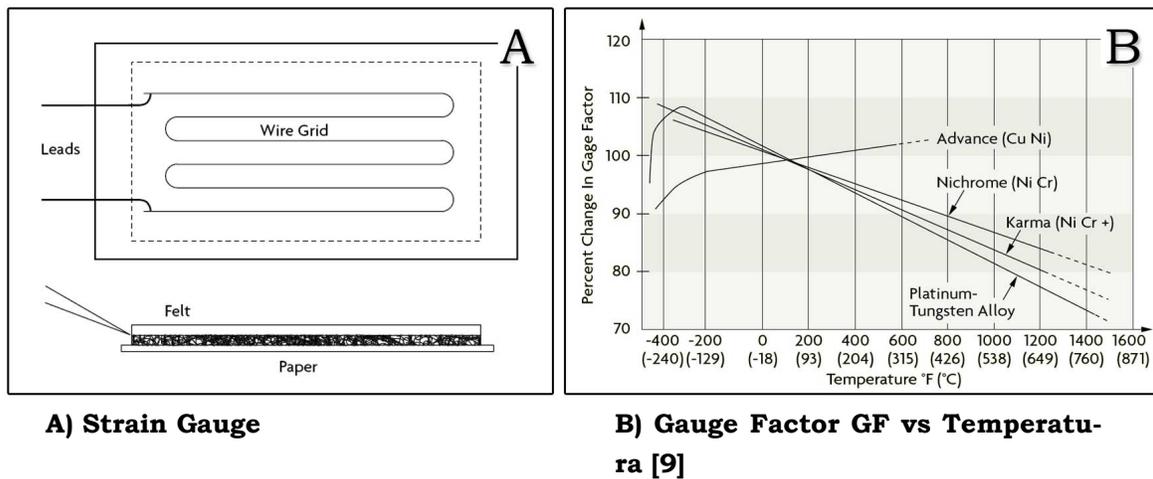
Es un instrumento diseñado para medir pequeñas deformaciones en elementos sólidos. Se clasifica como *sensor pasivo*, es decir, no agrega energía al sistema de medición. Generalmente, poseen un dispositivo conductor (o semiconductor en algunos casos) de electricidad con una resistencia asociada, la cual varía proporcionalmente a la deformación en el instrumento. Los Strain Gauge metálicos consisten en una delgada fibra metálica que se dispone en forma de una malla con las fibras paralelas en el eje de la deformación, como se muestra en la Figura 2.4 A. Esta disposición en forma de malla reduce los efectos de la deformación por corte, y también las deformaciones producidas por los esfuerzos debido al efecto Poisson.

Como se dijo anteriormente, los Strain Gauges funcionan en base al cambio de

resistencia a medida que se produce la deformación. La relación entre el cambio de resistencia y la deformación se llama Gauge Factor ( $GF$ ), y es el parámetro más importante en este tipo de dispositivos. A continuación se muestra la ecuación (2.1), donde  $R$  corresponde a resistencia, y  $L$  a la longitud de la malla del Strain Gauge en la dirección de la deformación.

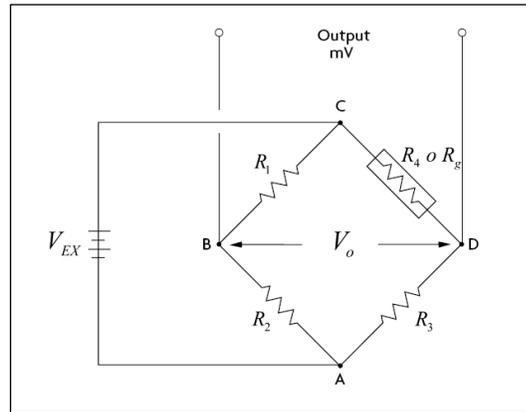
$$GF = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} = \frac{\Delta R/R}{\epsilon} \quad (2.1)$$

El valor de  $GF$  depende del material del conductor. En general, para conductores metálicos será cercano a 2.



**Figura 2.4: Strain Gauge**

Estos sensores miden magnitudes del orden de  $\epsilon \times 10^{-3}$ , por lo que entonces, para medir las deformaciones se requiere medir cambios muy pequeños en la resistencia. Para esto se usa, normalmente, una configuración de *punte* en donde existe una fuente de excitación que entrega un voltaje de entrada ( $V_{EX}$ ), y se lee un voltaje de salida ( $V_o$ ). Un ejemplo de este tipo de configuraciones es el *punte de Wheatstone* que se ilustra a continuación en la Figura 2.5.



**Figura 2.5: Puente de Wheatstone**

Así, el voltaje de salida  $V_o$  será:

$$V_o = \left[ \frac{R_3}{R_3 + R_4} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right] \cdot V_{EX} \quad (2.2)$$

Se observa a partir de la ecuación (2.2) que el voltaje de salida se hace cero cuando se cumple  $R_1/R_2 = R_4/R_3$ . Bajo esta condición se considera que el sistema está balanceado.

Luego, si  $R_g$  es la resistencia nominal del Strain Gauge, la diferencia de resistencia en el dispositivo inducida por la deformación se puede escribir como  $\Delta R = R_g \cdot GF \cdot \varepsilon$ . Y si además se toma  $R_1 = R_2$ , y  $R_3 = R_g$ , se puede escribir  $V_o/V_{EX}$  en función de la deformación.

$$\frac{V_o}{V_{EX}} = -\frac{GF \cdot \varepsilon}{4} \cdot \left( \frac{1}{1 + GF \cdot \frac{\varepsilon}{2}} \right) \quad (2.3)$$

Las medidas obtenidas a través de este tipo dispositivos son afectadas por cambios en la temperatura, no obstante, este problema no es relevante en el caso particular de esta prensa debido a dos factores: 1.- la naturaleza de los ensayos es cuasiestática, es decir, se ejecutan a bajas velocidades, lo que da tiempo para la disipación del calor al ambiente. 2.- Si bien, a pesar del punto anterior, existen aún cambios de temperatura en el instrumento, estas diferen-

cias no sobrepasan los 15°C con la temperatura ambiente. Así, observando el gráfico en la Figura 2.4 B, a tales magnitudes en los cambios de temperatura se considera despreciable los cambios en el Gauge Factor (GF), o lo que es lo mismo, las mediciones no se verán afectadas por efectos de temperatura.

### 2.3.1.1. Montaje

Si bien el Strain Gauge tiene bajo costo, buena precisión, y no es frágil como otros dispositivos, su instalación requiere un especial cuidado. En general, los errores en mediciones obtenidas con Strain Gauges se deben a problemas en su instalación y montaje.

Existen muchas formas de implementar este tipo de dispositivos, a continuación se describe una forma comúnmente utilizada: asistida por cinta adhesiva.

#### 1. Preparación de Superficie.

- a. Remover grasas y aceites de la superficie utilizando un solvente. (ej. Alcohol, acetona, etc.)
- b. Pulir con una lija fina la zona con el fin de remover pintura, óxidos, y manchas. No sobre pulir.
- c. Dibujar posición del dispositivo utilizando un lápiz fino y una regla limpia, preocupándose de la alineación del dispositivo.
- d. Limpie nuevamente el área.

#### 2. Colocación del Strain Gauge.

- a. Lave sus manos con agua y jabón. Limpiar el área del escritorio de trabajo y herramientas con un solvente o detergente.
- b. Utilizando una pinza tome el Strain Gauge. Colóquelo en el área limpia del escritorio con la cara hacia abajo.
- c. Corte un trozo de cinta adhesiva de 15 cm aproximadamente, tome el Strain Gauge con ella. Alinee el dispositivo con el dibujo trazado. Presione un extremo de la cinta, y luego presione lentamente hacia

el otro extremo hasta que el Strain Gauge quede en su sitio.

- d. Levante un extremo de la cinta hasta exponer el Strain Gauge. Aplique en él el catalizador.
- e. Aplicar suficiente adhesivo en toda la superficie asegurando la completa adherencia entre el Strain Gauge y la superficie. Luego, vuelva a pegar la cinta adhesiva presionando desde un extremo hacia otro lentamente. Inmediatamente después presione el Strain Gauge contra la superficie en forma estable al menos por un minuto.
- f. Después de al menos dos minutos después de dejar de presionar el Strain Gauge, tome un extremo de la cinta y tírelo lentamente hasta retirarla completamente.

### 3. Adjuntar la conexión.

- a. Corte los cables del largo deseado. Prepare las puntas cortando el aislante dejando expuesto de 2 a 3 cm el centro conductor. Enróllelo, girando las puntas evitando dañarlo.
- b. Una vez que tenga el cautín a la temperatura deseada, haga una piscina de soldadura fresca y bañe las puntas libres de aislante de los cables.
- c. Coloque soldadura sobre las etiquetas de cobre del Strain Gauge, tal que se formen dos almohadas.
- d. Posicione los conductores no aislados sobre las almohadas de soldadura. Coloque un pedazo de cinta en el extremo de la zona aislada con el objeto de ubicar en la posición correcta el cable en la soldadura.
- e. Usando un solvente limpie toda el área, y retire la cinta adhesiva del cable.
- f. Asegúrese que la zona no aislada del cable no tenga contacto con el espécimen. Si fuese posible, coloque un pedazo de cinta adhesiva

en el cable.

En el caso que se desee tener mayor certeza en el proceso de instalación se recomienda seguir los siguientes pasos de diagnósticos durante la instalación:

1. Mida la resistencia base del Strain Gauge antes de montarlo y conectarlo.
2. Revise los voltajes inducidos en el circuito cuando la fuente de poder esta desconectada. Los voltajes de salida debieran ser muy cercanos a cero.
3. Conecte la fuente de poder al circuito y verifique que los voltajes sean correctos y estables.

### *2.3.2. Celda de carga*

Este dispositivo cumple la función de transformar una fuerza percibida en un eje de esfuerzo en un diferencial eléctrico en forma proporcional. Actualmente existen muchos tipos de celdas de carga, siendo las más comunes las conformadas por un arreglo de Strain Gauges.

Se utilizarán dos celdas de carga en la prensa, con el objeto de controlar la acción de los actuadores hidráulicos laterales pertenecientes al marco de flexión. Van ubicados en los extremos superiores de los actuadores, dispuestos entre el vástago y el marco.

Estos dispositivos deberán ser capaces de medir fuerzas en un rango que comprende desde  $-40\ tonf$  (tracción) hasta las  $40\ tonf$  (compresión) cada uno.

En el mercado existen muchos tipos de celdas de carga, donde cada uno tiene ventajas y desventajas. En la Tabla 2.2 se hace una comparación entre las celdas existentes.

**Tabla 2.2: Tipos de Celdas de Carga [9]**

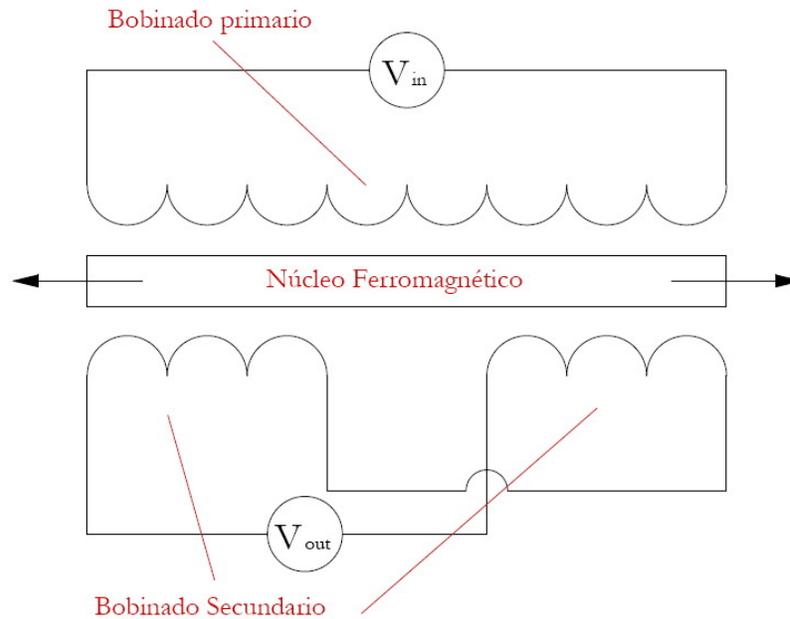
TYPE OF LOAD CELL	WEIGHT RANGE	ACCURACY (FS)	APPLICATIONS	ADVANTAGES	DISADVANTAGES
<b>Mechanical Cells</b>					
Hydraulic	Up to 10,000,000 lb	0.25%	Tanks, bins and hoppers Hazardous areas	Takes high impacts, insensitive to temperature	Expensive, complex
Pneumatic	Wide	High	Food industry, hazardous areas	Intrinsically safe Contains no fluids	Slow response Requires clean, dry air
<b>Strain Gage Cells</b>					
Bending Beam	10-5,000 lb	0.03%	Tanks, platform scales	Low cost, simple construction	Strain gages are exposed, require protection
Shear Beam	10-5,000 lb	0.03%	Tanks, platforms scales, off-center loads	High side load rejection, better sealing and protection	
Canister	to 500,000 lb	0.05%	Truck, tank, track, and hopper scales	Handles load movements	No horizontal load protection
Ring and Pancake	5-500,000 lb		Tanks, bins, scales	All stainless steel	No load movement allowed
Button and Washer	0-50,000 lb 0-200 lb typ.	1%	Small scales	Small, inexpensive	Loads must be centered, no load movement permitted
<b>Other Types</b>					
Helical	0-40,000 lb	0.2%	Platform, forklift, wheel load, automotive seat weight	Handles off-axis loads, overloads, shocks	
Fiber Optic		0.1%	Electrical transmission cables, stud or bolt mounts	Immune to RFI/EMI and high temps, intrinsically safe	
Piezoresistive		0.03%		Extremely sensitive, high signal output level	High cost, nonlinear output

### 2.3.3. Sensores de desplazamiento (LVDT)

El *sensor de desplazamiento* o *transformador diferencial variable lineal* es un dispositivo de registro de posición que provee un voltaje de salida CA proporcional al desplazamiento de su núcleo que pasa a través de un arreglo de bobinas. Funciona en base al mismo principio que un transformador, el cual consta de un bobinado primario, bobinado secundario, y un núcleo magnético. Una corriente alterna  $V_{in}$  conocida se aplica en el bobinado primario, esta corriente induce un campo magnético variable al rededor del núcleo. Este campo magnético, a su vez, induce un voltaje alterno  $V_{out}$  en el bobinado secundario que está en la proximidad del núcleo. Luego, como en cualquier transformador, existe una relación entre el número de vueltas de los bobinados y los voltajes como se muestra en la ecuación (2.4).

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{N_{out}}{N_{in}} \tag{2.4}$$

donde,  $N_{in}$  y  $N_{out}$  es el número de vueltas del bobinado primario y secundario respectivamente.



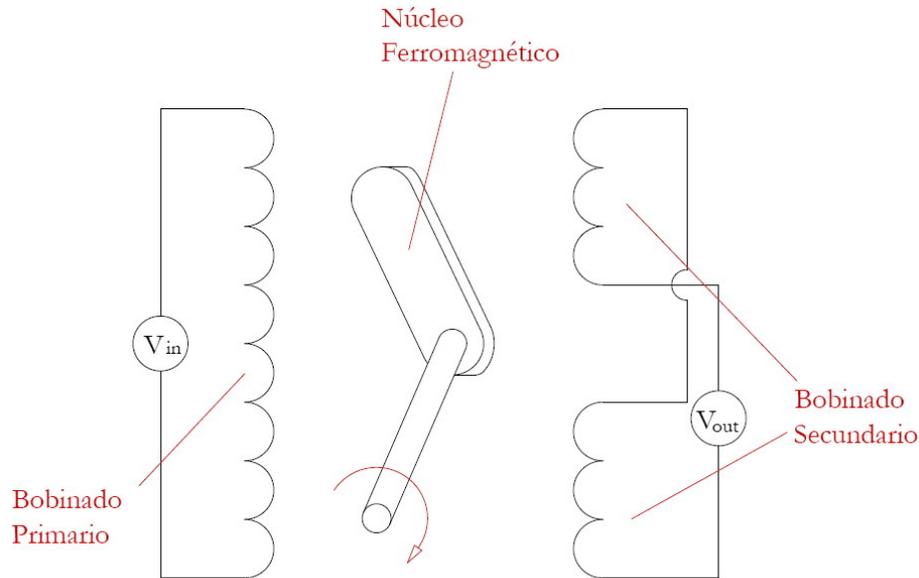
**Figura 2.6: Sensor de desplazamiento (LVDT)**

El voltaje de salida  $V_{out}$  es directamente proporcional al desplazamiento  $D$  del núcleo mientras este último esté expuesto a todas las espiras del bobinado primario. Se relacionan por una constante  $M$ .

$$D = M \cdot V_{out} \quad (2.5)$$

#### 2.3.4. Sensores de rotación (RVDT)

Los sensores de rotación funcionan bajo el mismo principio que los sensores de desplazamiento, con la diferencia que para este caso el núcleo rota entre el bobinado primario y secundario como se muestra en la Figura 2.7.



**Figura 2.7: Sensor de rotación**

Para pequeños giros, el ángulo de rotación  $\theta$  es proporcional a la diferencia entre los voltajes de los bobinados secundarios como se muestra en la ecuación (2.6).

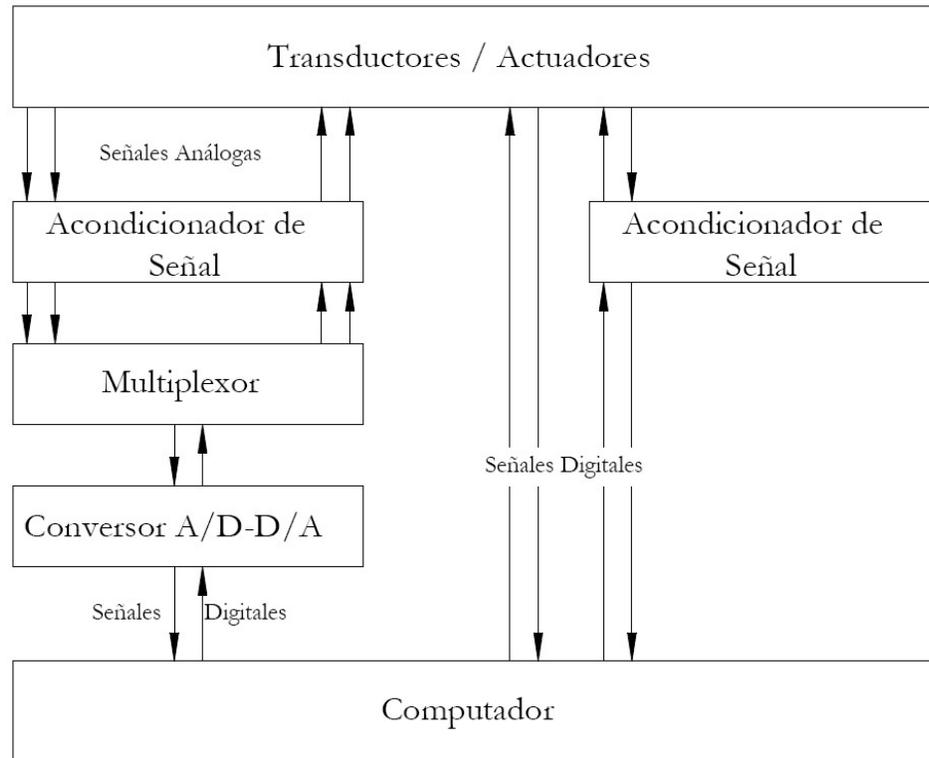
$$\theta = G \cdot \left( \frac{V_1 - V_2}{V_1 + V_2} \right) \quad (2.6)$$

Donde  $G$  es la constante del instrumento;  $V_1$  y  $V_2$  son los voltajes de los bobinados secundarios.

## 2.4. Sistema de medición

El sistema de medición es el conjunto de elementos que componen el mecanismo con que se traducen los cambios de las magnitudes físicas desarrolladas durante un ensayo en un registro o imagen digital. Dicha tarea se hace a través del uso de cuatro dispositivos fundamentales: 1.- Instrumento, cuya tarea es transformar en una señal eléctrica una magnitud física en particular. 2.- Acondicionador de señal, se encarga de amplificar y, en algunos casos, linealizar o modificar, la señal de salida del instrumento tal que pueda ser leída por el dispositivo de adquisición de datos. 3.- Conversor A/D, transcribe una señal análoga en una señal digital que puede ser entendida por un computador. 4.-

Computador, almacena los datos, los analiza, y ordena intervenciones en el sistema de control. En algunos casos, cuando se pretende implementar muchos sensores análogos es conveniente incorporar al sistema un Multiplexor, que se encarga de combinar dos o más canales de información en un solo medio de transmisión.



**Figura 2.8: Diagrama de sistema de adquisición de datos y control [8]**

En el sistema de medición se utilizarán Strain Gauges, LVDTs, RVDTs, celdas de carga, y un transductor de presión. Algunos de estos sensores entregan una señal de salida análoga que debe ser modulada y digitalizada, otros en cambio, generan directamente una señal digital. Los dispositivos que deben ser considerados en el sistema de comunicación entre los transductores y el computador se muestran en la Figura 2.8.

#### 2.4.1. Acondicionador de señal

Este dispositivo es indispensable en la implementación de Strain Gauges, puesto que estos sensores son de tipo *pasivo – resistivo* lo que implica la necesidad de suministrar energía al dispositivo.

Otros sensores que necesitan un acondicionador de señal, son los LVDTs y los RVDTs. Son transductores de tipo *pasivo – inductivo* que necesitan, al igual que los Strain Gauges, de una fuente de energía. En el caso particular de los sensores de desplazamiento, es probable que sea necesario corregir la no linealidad de la señal de salida para grandes desplazamientos.

#### 2.4.2. Multiplexor

El multiplexor, como se ha mencionado anteriormente, es un dispositivo al cual entran las señales generadas por los distintos sensores a través de canales independientes, y sale toda esta información a través de un solo canal de salida.

En el caso particular de un ensayo a flexo-compresión, se utilizarán muchos Strain Gauges, LVDTs, y RVDTs, además de un par de celdas de carga, y un transductor de presión. Y considerando el alto costo que tienen los conversores A/D se hace indispensable el uso de uno o más de estos dispositivos.

#### 2.4.3. Conversor A/D

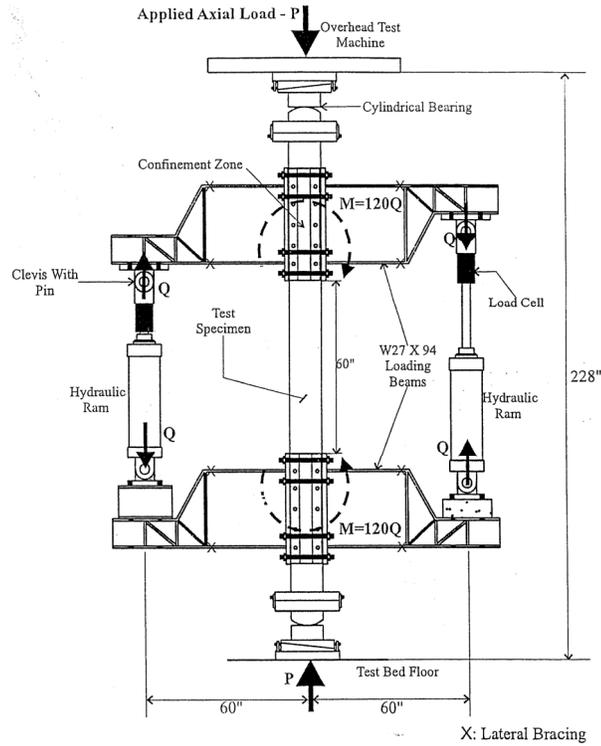
Como se pretende controlar el sistema mediante un computador, es insoslayable convertir toda señal análoga a una digital. Este proceso de conversión tiene costos asociados: tiempo y resolución. Y, como es esperar, mientras mayor sea la resolución de salida de la señal, mayor tiempo requiere el proceso.

### 2.5. Sistemas de ensayo existentes

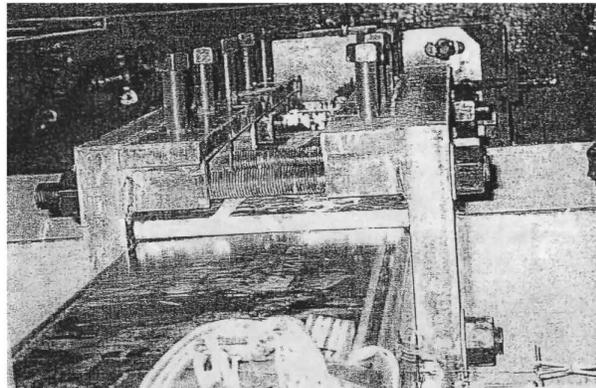
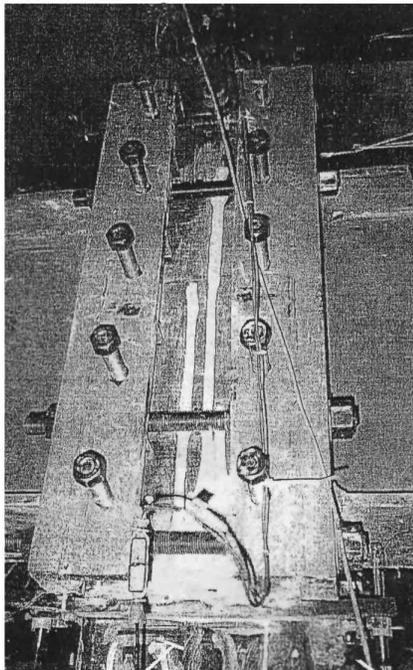
En la tesis de magíster de Hull [1] se hicieron ensayos en flexo-compresión de columnas mediante un sistema de ensayo ubicado en la universidad de Lehigh en Bethlehem, Pennsylvania, Estados Unidos. Este sistema funciona con una prensa que proporciona la fuerza axial, y un sistema de flexión conectado directamente al espécimen que proporciona el momento en forma independiente. El sistema de flexión es de acero y funciona en base a dos actuadores hidráulicos sincronizados, y vigas horizontales que se conectan con la probeta. En la Figura 2.9 se muestra un esquema de dicho sistema, y en la Figura 2.10 un detalle de la conexión entre las vigas horizontales y la probeta.

Hull obtuvo gráficos de comportamiento como los que se muestran en la Figura 2.11 y Figura 2.12, que son objetivo del sistema que se diseña en este trabajo.

Los ensayos realizados fueron a carga axial constante e incremento monótonico de momento.



**Figura 2.9: Esquema de Sistema de Ensayo Utilizado por Hull [1]**



**Figura 2.10: Conexión con Probeta, Sistema Utilizado por Hull [1]**

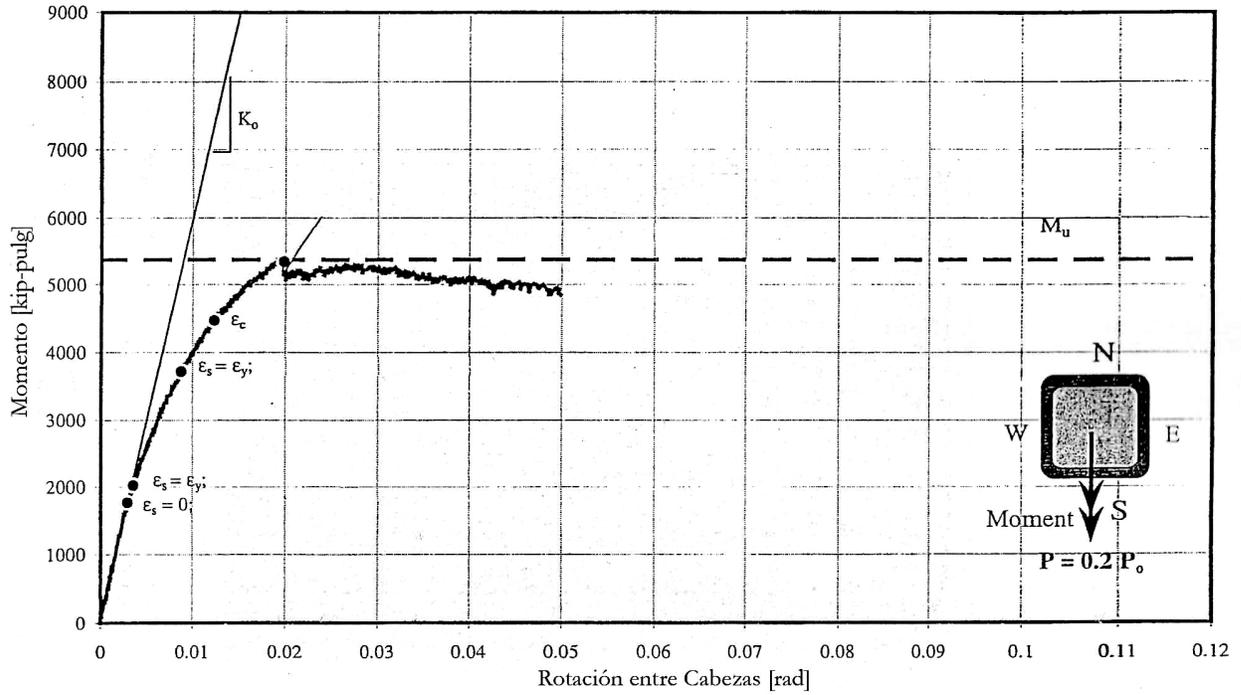


Figura 2.11: Rotación entre Cabezas Vs Momento, Hull [1]

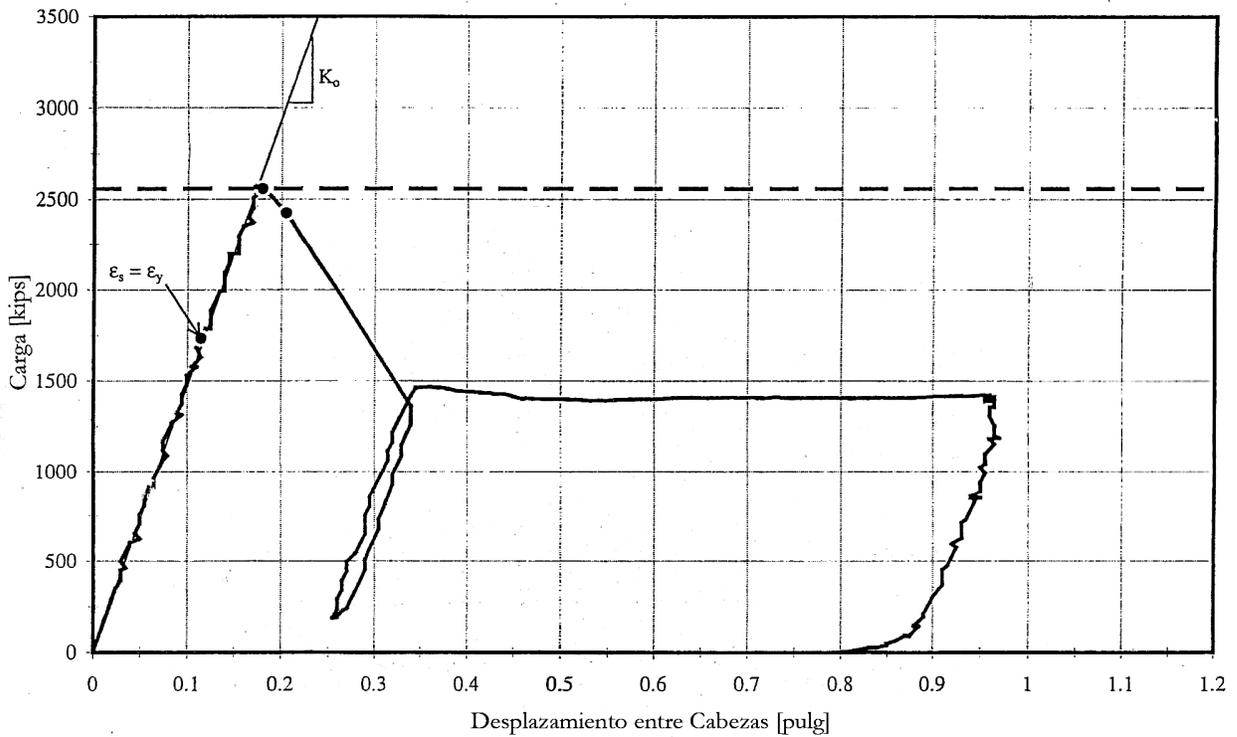
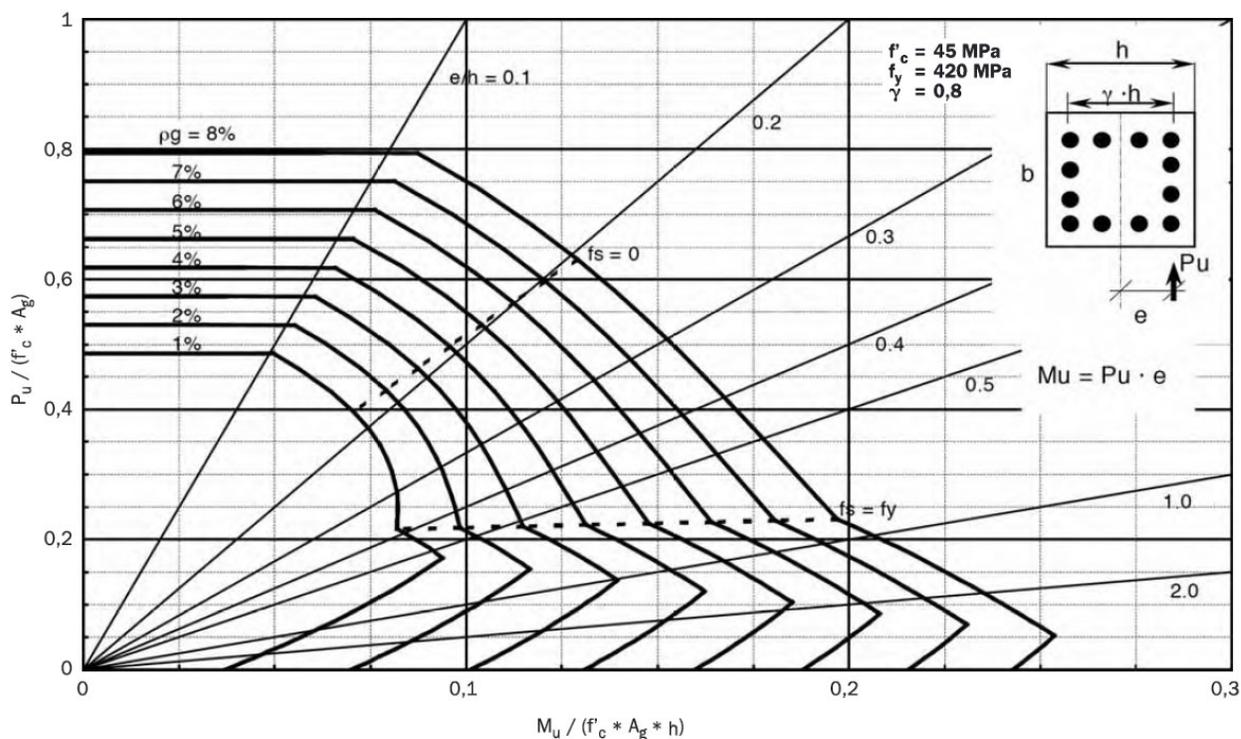


Figura 2.12: Desplazamiento entre Cabezas Vs Carga Axial, Hull [1]

## 2.6. Marco teórico para construcción de diagramas de interacción

Uno de los objetivos de esta memoria es el desarrollo de un software de control que permita al usuario de la prensa obtener de manera directa y simple los diagramas de interacción de los elementos que someta a ensaye. Para hacer esto posible es necesario fundamentar apropiadamente el mecanismo de construcción de dichos diagramas según la naturaleza de la probeta.

Diagrama de interacción se llama a los gráficos que relacionan, para un elemento estructural determinado, sus estados de esfuerzo de compresión y de flexión. La curva en estos diagramas representa el estado de falla, es decir, un punto sobre la curva determina que para esa combinación de esfuerzo axial y de momento, el elemento está en un inminente estado de falla, y para cualquier estado de esfuerzos que se represente por un punto en el diagrama que se encuentre fuera del área que encierra la curva, el elemento no será capaz de resistirlo. A continuación en la Figura 2.13 se muestra un diagrama de interacción normalizado para columnas de hormigón armado.



**Figura 2.13: Diagrama de Interacción Normalizado [18]**

Para la construcción de estos diagramas se debe caracterizar el estado de límite que domina en la falla. Los estados límites se determinan por las propiedades geométricas del elemento, propiedades mecánicas de los materiales, y por el estado de esfuerzos combinados al cual es sometido. Tomando esto en cuenta, se hace engorroso diseñar un software que arroje diagramas de interacción para la amplia gama de probetas que son objeto del sistema de ensayo, por lo que se restringe sólo a la construcción de diagramas de interacción para elementos de hormigón armado y de acero estructural, dejando el resto como tarea para el usuario.

### *2.6.1. Construcción de diagramas de interacción para probetas de Hormigón Armado*

Los elementos a compresión pueden dividirse en dos grandes categorías: las *columnas cortas*, en las cuales la resistencia se rige por la resistencia de los materiales y por la geometría de la sección transversal, y las *columnas esbeltas* en las cuales la resistencia se reduce por las deflexiones laterales.

#### *2.6.1.1. Columnas cortas*

Considerando los siguientes supuestos:

- Las secciones planas permanecen planas durante la deformación.
- Compatibilidad de deformaciones, es decir, las deformaciones del acero en cualquier sitio de la sección son las mismas que la del hormigón adyacente.

Se desarrolla el caso de una columna sometida a fuerzas axiales de compresión en dirección paralela a su eje ( $P_n$ ), y a flexión ( $M_n$ ). Se define la excentricidad  $e$  como  $e = M_n / P_n$ . La distribución real de esfuerzos a compresión en el concreto se reemplaza por una distribución rectangular equivalente con una altura  $a = \beta_1 \cdot c$ , donde  $\beta_1$  se obtiene a partir de la ecuación (2.7) según artículo 10.2.7.3 del código ACI 318 [10], y  $c$  es la distancia del borde de la sección transversal al eje neutro (ver Figura 2.14 C).

$$\begin{aligned} \beta_1 &= 0.85 - 0.05 \frac{f'_c - 27.579}{6.895} & \text{si } 0.65 \leq \beta_1 \leq 0.85 \\ \beta_1 &= 0.65 & \text{si } \beta_1 < 0.65 \\ \beta_1 &= 0.85 & \text{si } \beta_1 > 0.85 \end{aligned} \quad (2.7)$$

**Tabla 2.3: Parámetros del bloque de esfuerzos en el concreto [7]**

	$f'_c$ [MPa]				
	$\leq 27,6$	34,5	41,4	48,3	$\geq 55,2$
$\alpha$	0,720	0,680	0,640	0,600	0,560
$\beta$	0,425	0,400	0,375	0,350	0,325
$\beta_1=2\beta$	0,850	0,800	0,750	0,700	0,650
$\gamma=\alpha/\beta_1$	0,850	0,850	0,850	0,860	0,860

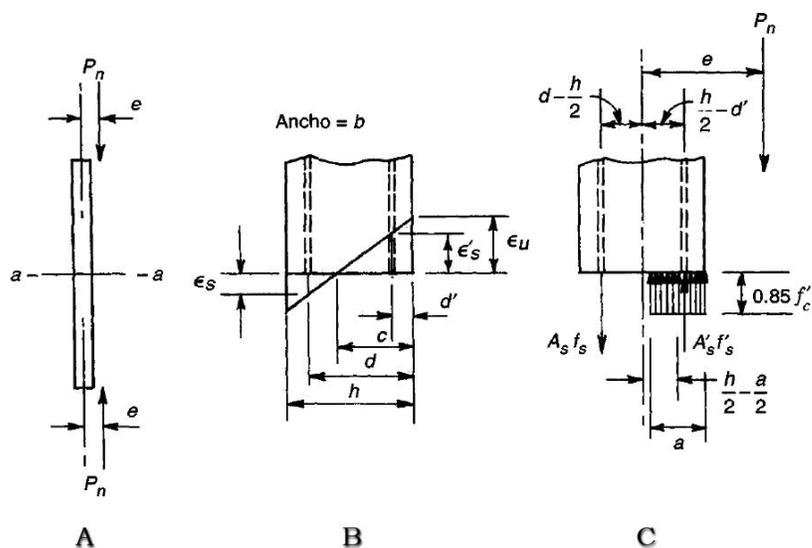
Luego, haciendo equilibrio de fuerzas entre los esfuerzos internos y las fuerzas externas se tiene:

$$P_n = 0.85 f'_c ab + A'_s (f'_s - 0.85 f'_c) - A_s f_s \quad (2.8)$$

donde  $f'_c$  es la resistencia a la compresión del concreto;  $A'_s$  y  $A_s$  el área de acero en compresión y en tracción respectivamente;  $f'_s$  y  $f_s$  es el esfuerzo en el acero en tracción y compresión respectivamente.

Ahora se escribe la ecuación (2.9) en donde se equilibran los momentos con respecto a la línea central de la sección.

$$M_n = P_n e = 0.85 f'_c ab \left( \frac{h}{2} - \frac{a}{2} \right) + A'_s (f'_s - 0.85 f'_c) \left( \frac{h}{2} - d' \right) + A_s f_s \left( d - \frac{h}{2} \right) \quad (2.9)$$



**A) Columna cargada. B) Distribución de deformaciones en sección a-a. C) Esfuerzos y fuerzas para la resistencia última nominal.**

**Figura 2.14: Columna en compresión excéntrica [7]**

El fenómeno físico de la aplicación de cargas flexocompresivas a este tipo de columnas puede desarrollar la falla en dos formas diferentes: 1.- Para grandes excentricidades la falla se inicia por la fluencia del acero en tracción ( $f_s = f_y$ ). Luego, el concreto en compresión alcanzará su deformación unitaria última  $\epsilon_u = 0.003$  [10], mientras que el acero en compresión es posible que fluya o no. 2.- Para excentricidades más pequeñas, el concreto a compresión supera  $\epsilon_u$  antes de que el acero en tracción entre en fluencia, de hecho es posible que no exista acero en tracción, dependiendo de la posición del eje neutro.

### 2.6.1.2. Columnas esbeltas

Se llamará *columnas esbeltas* a todas aquellas para la cual existe una reducción importante de su capacidad a carga axial a causa de la acción de *momentos de segundo orden*. Estos momentos son importantes cuando el elemento tiene deflexiones significativas debido al momento de primer orden actuante, y está sometido a grandes cargas axiales.

Cuando una *columna esbelta* falla, lo hace por la acción creciente de los *momentos de segundo orden*, lo que produce una falla frágil en el elemento. Este tipo de fallas son extremadamente peligrosas, puesto que conlleva desplazamientos grandes, bruscos y violentos, con riesgo vital para quienes lo presen-

cien. Es por esta causa que el sistema de ensayo a flexo-compresión considera un sistema de control donde se implementan medidas instantáneas de acción cuando se detecta falla por pandeo global.

### 2.6.2. Construcción de diagramas de interacción para probetas de Acero Estructural

En general, las columnas de acero estructural se componen de alma y alas, que cumplen una función bien determinada. Para los distintos estados de carga que puede desarrollar una columna, es propio distinguir los estados de cada uno de los elementos que componen la columna en forma separada. Así, durante un ensayo, en las curvas de resistencia deformación se podrá, en la mayoría de los casos, distinguir cuando se ha alcanzado fluencia, pandeos locales, roturas, e inestabilidades para cada elemento en particular.

La norma LRFD [2] hace una aproximación de los diagramas de interacción de las columnas mediante dos rectas descritas por la ecuación (2.10). Más adelante en la sección 3.2.1.1 en la Figura 3.2 se muestra un diagrama de interacción para el caso particular de una columna de acero.

$$\text{Para } \frac{P_r}{P_c} \geq 0.2$$

$$\frac{P_r}{P_c} + \frac{8}{9} \cdot \left( \frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \right) \leq 1.0 \quad (2.10)$$

$$\text{Para } \frac{P_r}{P_c} < 0.2$$

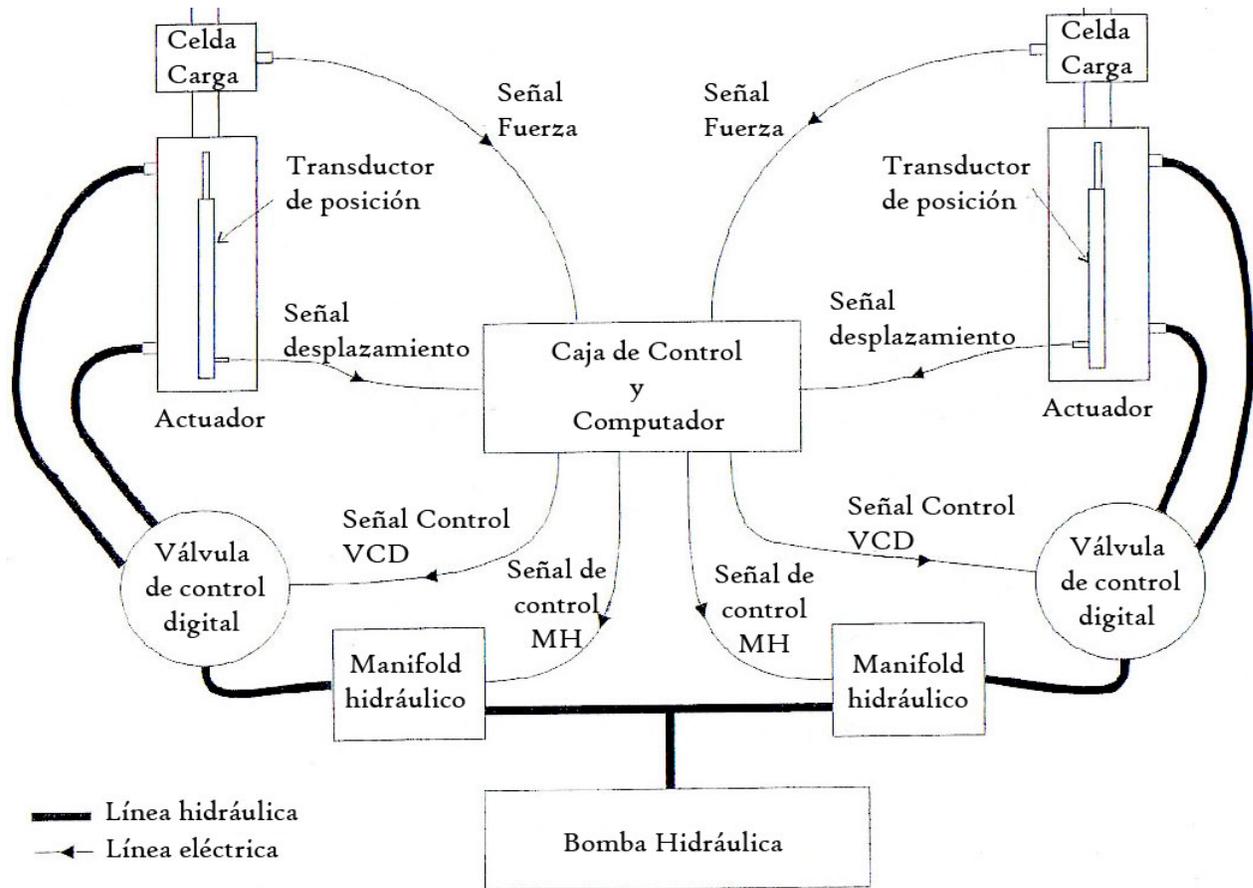
$$\frac{P_r}{2P_c} + \left( \frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \right) \leq 1.0$$

## 2.7. Sistema de actuadores hidráulicos

En el sistema de ensayo de probetas a esfuerzo de flexo-compresión hay 3 actuadores hidráulicos: uno de ellos pertenece a la *prensa existente* y se ubica en el cabezal inferior; los otros dos pertenecen al sistema de flexión, y se encuentran entre los extremos de las vigas transversales.

Los actuadores hidráulicos son dispositivos que se controlan mediante el flujo

de aceite hidráulico con que se alimenta. La velocidad de acción del actuador está determinada por el caudal de entrada, y la fuerza que es capaz de levantar, por la presión. Estas dos variables están controladas por la acción de un dispositivo llamado *Hydraulic Service Manifold* (HSM), que es manejado por un computador, y alimentado por una bomba hidráulica como se muestra en la Figura 2.15. Entre el HSM y el actuador existe una válvula de control digital, que se encarga de suspender o liberar el flujo de aceite en la dirección deseada.



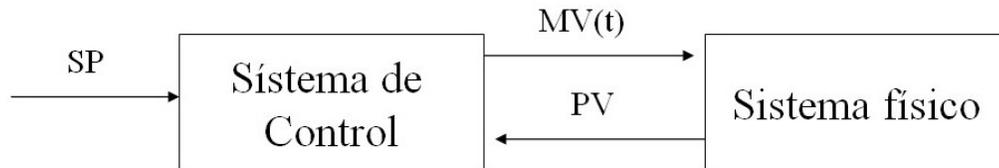
**Figura 2.15: Esquema de control para actuadores hidráulicos laterales [1]**

Los actuadores laterales son de *doble acción*, es decir, pueden ejercer fuerza de tracción y de compresión en el eje de acción. El desplazamiento del vástago se monitorea por medio de un LVDT dispuesto en forma paralela al eje de acción del actuador, que entrega registros de posición directamente al computador. Además, la fuerza que imprime cada uno es monitoreada a través de una celda de carga dispuesta en el extremo del vástago. Estas celdas, al igual que los

LVDTs, se comunican con el computador.

## 2.8. Controladores PID

Es un sistema de control, que interviene en el sistema físico a través de un actuador, capaz de mantener una variable o proceso en un punto deseado dentro del rango de medición que el sensor mide.



**Figura 2.16: Esquema de Controlador PID [4]**

Este sistema trabaja mediante la utilización del *error*, que se define como la diferencia entre el valor de referencia o valor deseado (SP) y la señal de entrada al sistema de control (PV).

$$e(t) = PV - SP \quad (2.11)$$

Las siglas PID se deben a que la señal de salida del sistema se compone de tres partes: una parte proporcional  $P$ , una integral  $I$ , y una derivativa  $D$ . Cada una de las salidas de estas partes se adicionan para generar la señal que se envía al sistema físico (2.12).

$$MV(t) = P_{Salida} + I_{Salida} + D_{Salida} \quad (2.12)$$

La parte proporcional, como se muestra en la ecuación (2.13), es el producto de la señal del *error* con la *constante proporcional* ( $K_P$ ). Esta elimina casi por completo el error, pero existen dos problemas: la constante proporcional tiene valores óptimos dependientes del rango en que se encuentre la variable de control, y además cuando el sistema se encuentra en estado estacionario no se soluciona lo que se llama *error estacionario*.

$$P_{Salida} = K_P \cdot e(t) \quad (2.13)$$

La parte integral se encarga de disminuir y eliminar el *error estacionario* que

resulta de la acción de la parte proporcional. Aquí el *error* es integrado en el tiempo, por lo que se trata de una función que promedia o suma el *error* en un lapso de tiempo determinado. Luego es multiplicado por la constante integral ( $K_I$ ), como se muestra en la ecuación (2.14).

$$I_{Salida} = K_I \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (2.14)$$

La parte derivativa trabaja cuando hay cambios en el valor absoluto de *error*. Esta función mantiene el *error* al mínimo corrigiéndolo proporcionalmente con la velocidad misma que se produce, de esta manera evita que el error se incremente. Como se muestra en la ecuación (2.15), se deriva el error con respecto al tiempo y luego se multiplica por la constante derivativa ( $K_D$ ).

$$D_{Salida} = K_D \frac{de}{dt} \quad (2.15)$$

Finalmente, la señal que se envía al sistema físico queda reescribiendo la ecuación (2.12) como se muestra a continuación:

$$MV(t) = K_P \cdot e(t) + K_I \int_0^t e(\tau) d\tau + K_D \frac{de}{dt} \quad (2.16)$$

# Capítulo 3

---

## PARÁMETROS DE DISEÑO

### 3.1. Tipos de probetas para las cuales se diseña el dispositivo

No existen restricciones en cuanto a los materiales que puedan ser ensayados en la prensa, es decir, las probetas podrán ser de hormigón armado, acero estructural, madera, híbridos, etc. No obstante, es importante tener siempre presente las limitantes que existen en cuanto a capacidad de la prensa, puesto que si la prensa no es capaz de llevar a la falla la probeta no se cumplirá el objetivo.

#### *3.1.1. Dimensiones de probetas permitidas*

Debido a que se pretende que la prensa sea útil en pilares de edificios de hasta 6 pisos, se ha determinado que la altura máxima de la probeta que será posible ensayar es de  $3,5\text{ m}$  y la mínima de  $2,5\text{ m}$ . Las dimensiones transversales de las probetas dependerán de la forma, es decir, cambiarán las restricciones de acuerdo a la forma de la sección transversal y la orientación de la probeta. La dimensión de la sección transversal paralela al marco de flexión será como máximo  $90\text{ cm}$ , y en la otra dirección estará restringida por la distancia entre columnas de la *prensa existente*, que es  $58\text{ cm}$ . Luego considerando un espacio

prudente para ubicar los pasadores que van por fuera de la probeta entre viga y viga, se dispone como límite  $32\text{ cm}$ .

Siempre las probetas deberán presentar simetría en torno al eje de flexión, al eje perpendicular al de flexión, y al de la probeta. Esto se debe que el sistema no está diseñado para soportar flexión fuera del eje de la acción de momento aplicado, ni torsión.

## 3.2. Definición de los límites de medición

### 3.2.1. Resistencias máximas y mínimas

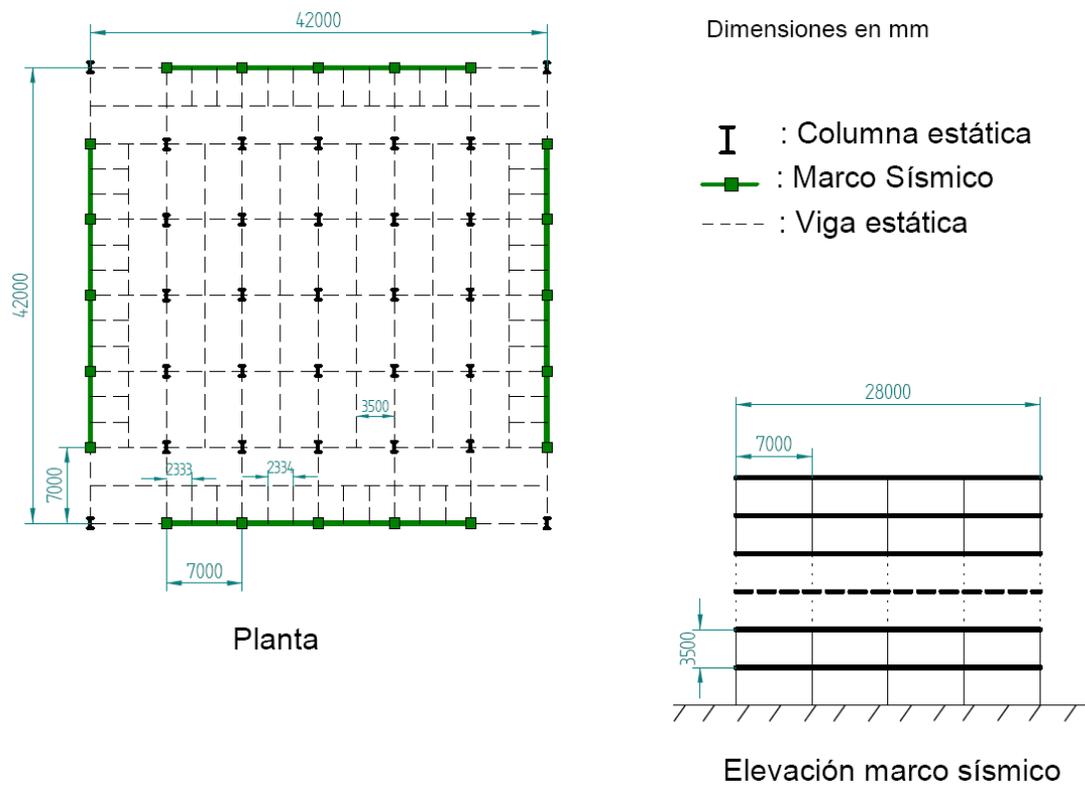
La resistencia máxima de diseño está determinada por la capacidad máxima de esfuerzos resistentes de las probetas más resistentes pertenecientes al objetivo del diseño. Este objetivo de diseño se refiere al ensayo de elementos equivalentes en dimensión y resistencia a columnas de edificios de no más de seis pisos. Así, se procedió a revisar dos edificios de seis pisos: uno de acero estructural, y uno de hormigón armado. Ambos funcionan en base a marcos compuestos por vigas y columnas. En cada uno de ellos se buscó la columna que estuviese bajo las mayores solicitaciones del tipo flexo-compresivas. Luego, debido a que se pretende llegar a la falla de los elementos durante los ensayos, es necesario ponderar por un factor amplificador las cargas encontradas. Este factor está determinado, para las solicitaciones encontradas a partir del edificio de hormigón armado, por el hecho que los elementos de H.A. se diseñan pensando en que trabajará en su rango elástico lineal, es decir, en el 60% de su  $f_c$ . De esta forma el factor será  $1/0.6$ . En el caso de las solicitaciones encontradas a partir del edificio de acero también es necesario amplificarlas. La norma LRFD 2005 en el capítulo H (ver referencia [2]) dispone una curva de interacción discretizada en dos tramos para el diseño de elementos sometidos a esfuerzos combinados. No obstante, para la determinación del factor amplificador resulta más fácil tomar como referencia los valores de castigo a la resistencia de la compresión y de la flexión en forma independiente; y como  $\phi_c = \phi_b = 0.9$ , el factor será  $1/0.9$ .

Finalmente, tomando las máximas solicitaciones para las columnas con mayores cargas de los dos edificios, y redondeando las cifras, las solicitaciones máximas que debe inducir la prensa en las probetas es  $P_{\text{diseño}} = 250\text{ tonf}$  y

$$M_{diseño} = 150 \text{ tonf} \cdot \text{m}.$$

### 3.2.1.1. Edificio de acero estructural modelo

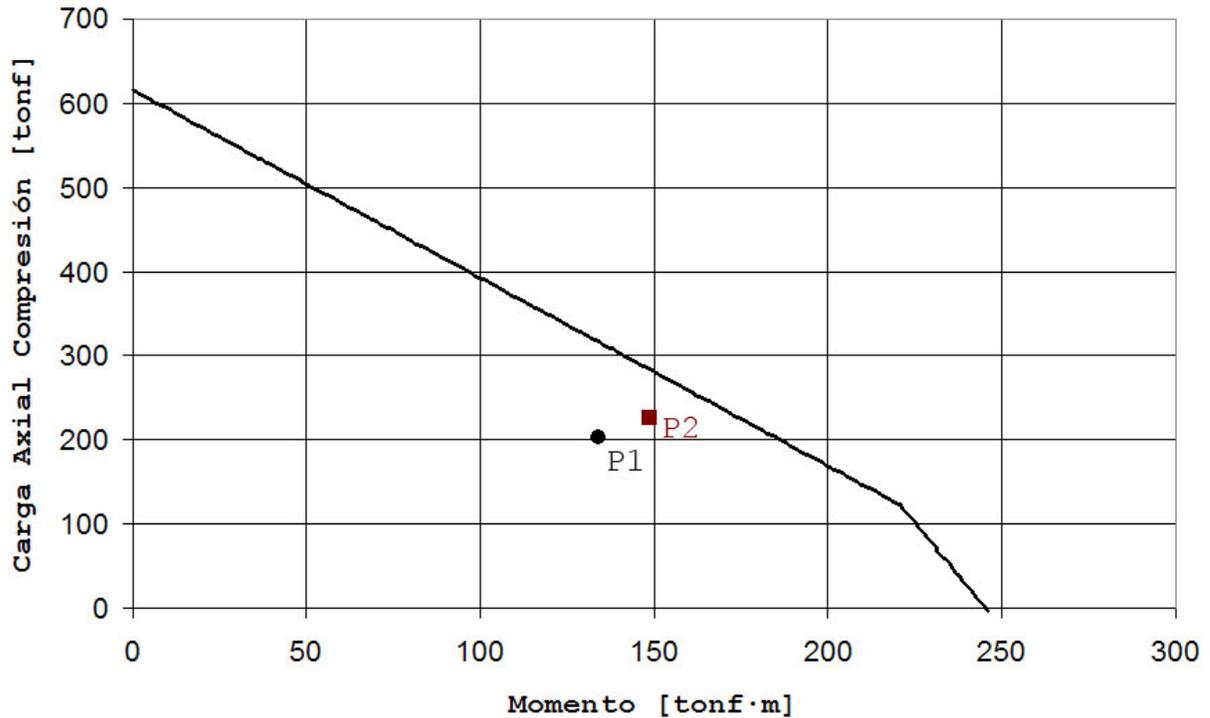
Con el fin de determinar las capacidades de las columnas más solicitadas en un edificio de seis pisos de acero estructural, se tomó los resultados de diseño de un edificio estudiado en el trabajo de título de R. A. Valenzuela [17]. En dicho trabajo se modeló un edificio de seis pisos con resistencia sísmica en base a cuatro marcos perimetrales como se muestra a continuación en la Figura 3.1.



**Figura 3.1: Edificio de Acero Modelo [17]**

Los resultados del modelo efectuado arrojaron una sollicitación para la columna más solicitada de  $P_u = 204 \text{ tonf}$  en compresión axial, y  $M_{ux} = 134 \text{ tonf} \cdot \text{m}$  y  $M_{uy} = 0 \text{ tonf} \cdot \text{m}$  de momento. Para estos esfuerzos se dispuso un perfil H900X350X309.9, obteniéndose un factor de utilización  $FU = 0,611$  según AISC 2005 [2]. La capacidad de dicho perfil se puede escribir a través de un diagrama de interacción (ver Figura 3.2) haciendo uso de la ecuación (2.10).

### Diagrama de Interacción



**Figura 3.2: Diagrama de Interacción para H900X350X309.9 en su Eje Fuerte**

En la Figura 3.2 el punto P1 es el par  $(204\text{tonf}; 134\text{tonf}\cdot\text{m})$  solicitaciones provenientes del análisis, y el punto P2 es el par  $(227\text{tonf}; 149\text{tonf}\cdot\text{m})$  que resulta de ponderar el punto P1 por el factor  $1/0,9$ .

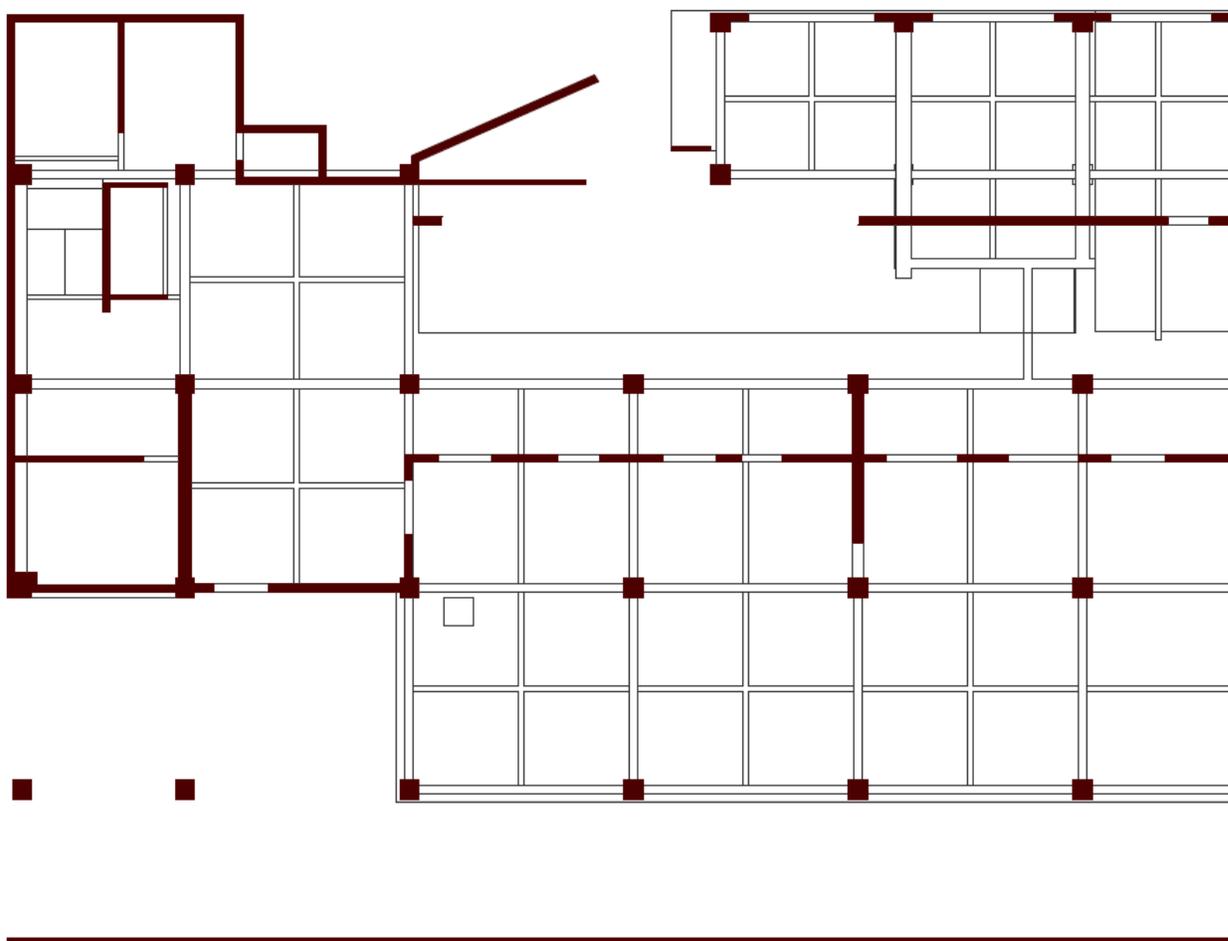
A partir de este último diagrama se infiere que la columna de acero resiste el par  $(250\text{tonf}; 150\text{tonf}\cdot\text{m})$ , quedando este punto muy cerca de la capacidad del perfil. Esto se debe a que se está utilizando el 61% de la capacidad del perfil.

#### 3.2.1.2. Edificio de hormigón armado modelo

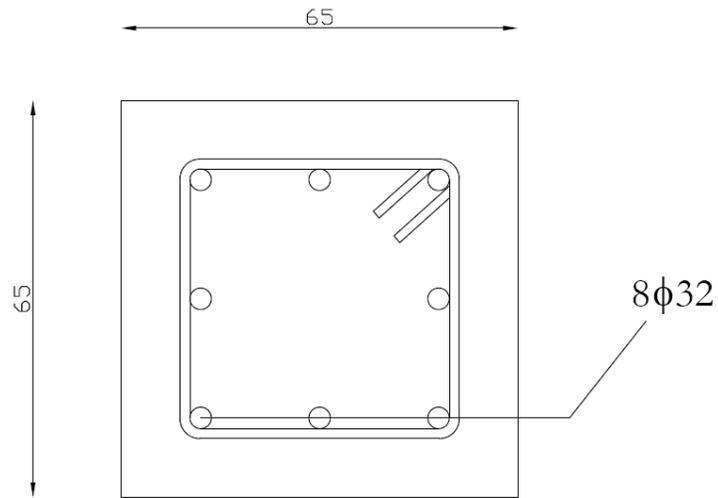
Se ha elegido un edificio de hormigón de cinco pisos cuya resistencia sísmica funciona en base a marcos rígidos. En la Figura 3.3 se muestra una planta estructural a nivel de cielo subterráneo.

Al igual que con el edificio de acero, se procedió a identificar la columna mayormente solicitada en esfuerzo de flexo-compresión. La sección transversal de

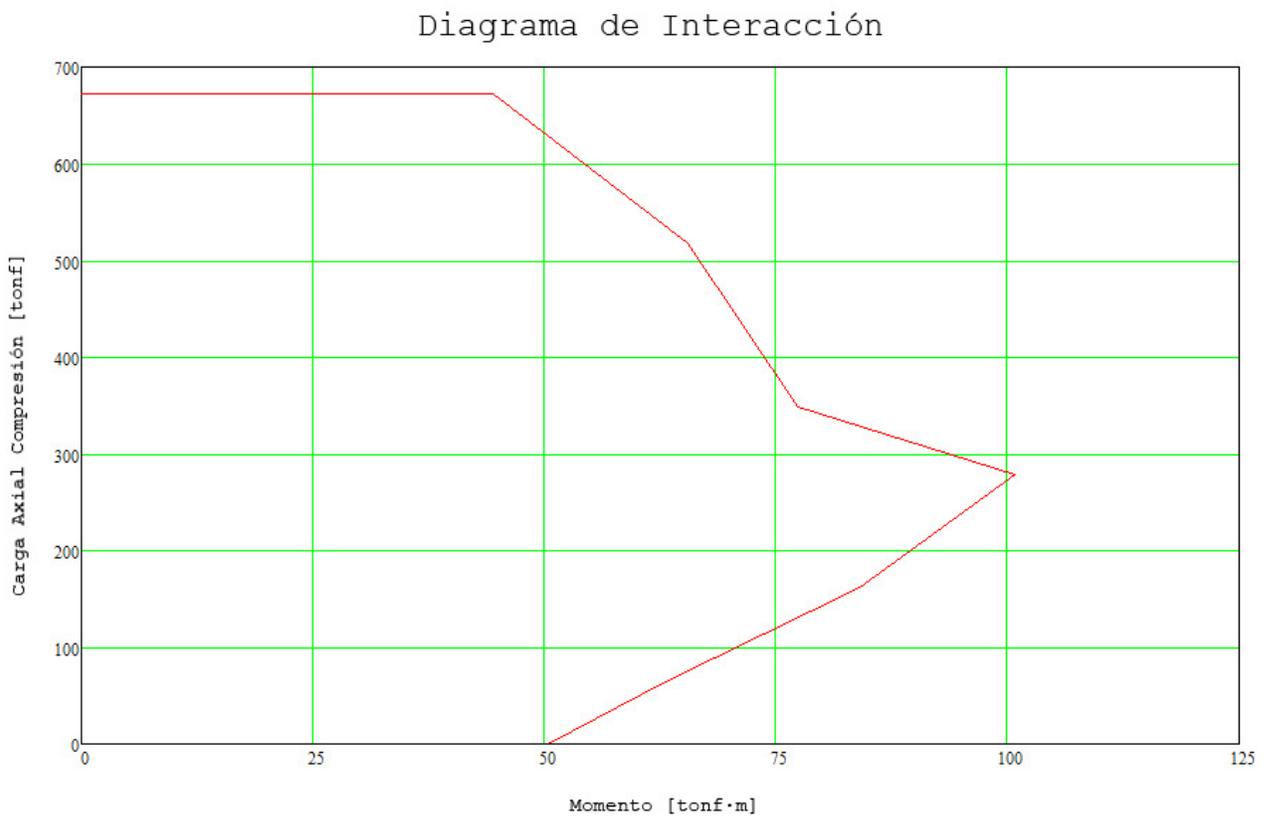
dicha columna es de  $65 \times 65 \text{ cm}$ , con una armadura longitudinal  $8\phi 32$ , y un recubrimiento de  $2 \text{ cm}$  (ver Figura 3.4). Se calculó su capacidad para las distintas combinaciones de esfuerzo axial y momento utilizando ACI 318 2005, obteniéndose un diagrama como el que se muestra en la Figura 3.5.



**Figura 3.3: Planta Edificio Hormigón Armado Modelo**



**Figura 3.4: Sección Transversal Pilar**



**Figura 3.5: Diagrama de Interacción para Pilar 65x65 de H.A. [18]**

En el diagrama de interacción para la columna de hormigón armado se observa que las capacidades de la máquina podrán llevarla a la falla para cualquier par que se encuentre bajo las  $250\text{tonf}$  de compresión axial.

### 3.2.2. Deformaciones máximas

En esta sección se determina el desplazamiento vertical y giro que deben tener las cabezas de la probeta, tal que se alcance a desarrollar los estados de falla. Para esto, se ha recurrido a tomar valores a partir de resultados experimentales de Hull [1], en donde se realizaron ocho ensayos de columnas tubulares rellenas con hormigón (CTF) de tipo viga-columna a flexo-compresión. Se observó que para rotaciones de  $0.08\text{rad}$  en las cabezas de las probetas, ya se han alcanzado a desarrollar las curvas *Momento-Curvatura* completas. Este giro exige que los actuadores laterales deban disponer de una carrera mayor de  $29\text{cm}$  cada uno.

Para los desplazamientos verticales, al igual que para las rotaciones, se tomarán valores de referencia a partir de los resultados experimentales de Hull [1]. Esta vez, se han observado los resultados de los cuatro ensayos para probetas CFT sometidas a compresión pura: para deformaciones unitarias  $\varepsilon = 0.025$  se alcanzan a desarrollar las curvas en los gráficos *carga vs  $\varepsilon$*  completas. Luego, para probetas de una altura de  $3,5\text{m}$  se necesitará un desplazamiento de la cabeza de la probeta de  $8.75\text{cm}$ .

### 3.2.3. Velocidades de aplicación de cargas

La prensa no tiene como objetivo medir efectos dinámicos, por lo que la acción de las fuerzas será aplicada lentamente. Así entonces se trata de ensayos cuasiestáticos.

Las velocidades de acción de las deformaciones impuestas por la prensa tienen un límite máximo que dependerá de la naturaleza de los materiales que constituyen la probeta. Dicho límite está dado por la presencia de efectos dinámicos que puedan afectar a ésta.

Para efectos prácticos, se tomará como límite la velocidad de aplicación de las cargas explicitada en norma chilena Nch1037.of1977 - *Ensayo de compresión de probetas cúbicas y cilíndricas de hormigón*. Dicha velocidad límite es

$3,5 \text{ kgf/cm}^2/\text{s}$  , y la probeta no debe alcanzar la rotura antes de los  $100 \text{ seg}$  .

Para el caso de la compresión la *prensa existente* puede mover el cabezal inferior a una velocidad entre  $1,39$  y  $13,65 \text{ mm/min}$  , lo que permite cumplir con los requisitos de la norma antes mencionada.

### 3.3. Materiales

Los elementos que componen el *marco de flexión* serán de acero estructural ASTM A36, cuyo límite de fluencia es  $F_y = 2.53[\text{tonf/cm}^2]$  , y su módulo de Young o de elasticidad es  $E = 2.100[\text{tonf/cm}^2]$  .

Los pernos con que se han diseñado todas las uniones del sistema son de acero de alta resistencia A325.

Las soldaduras utilizadas son con electrodo ER-70S-6 según clasificación AWS, cuya resistencia a la tracción es de  $480 \text{ MPa}$  , y límite de fluencia  $400 \text{ MPa}$  .

# Capítulo 4

---

## MODELO

### 4.1. Descripción del mecanismo

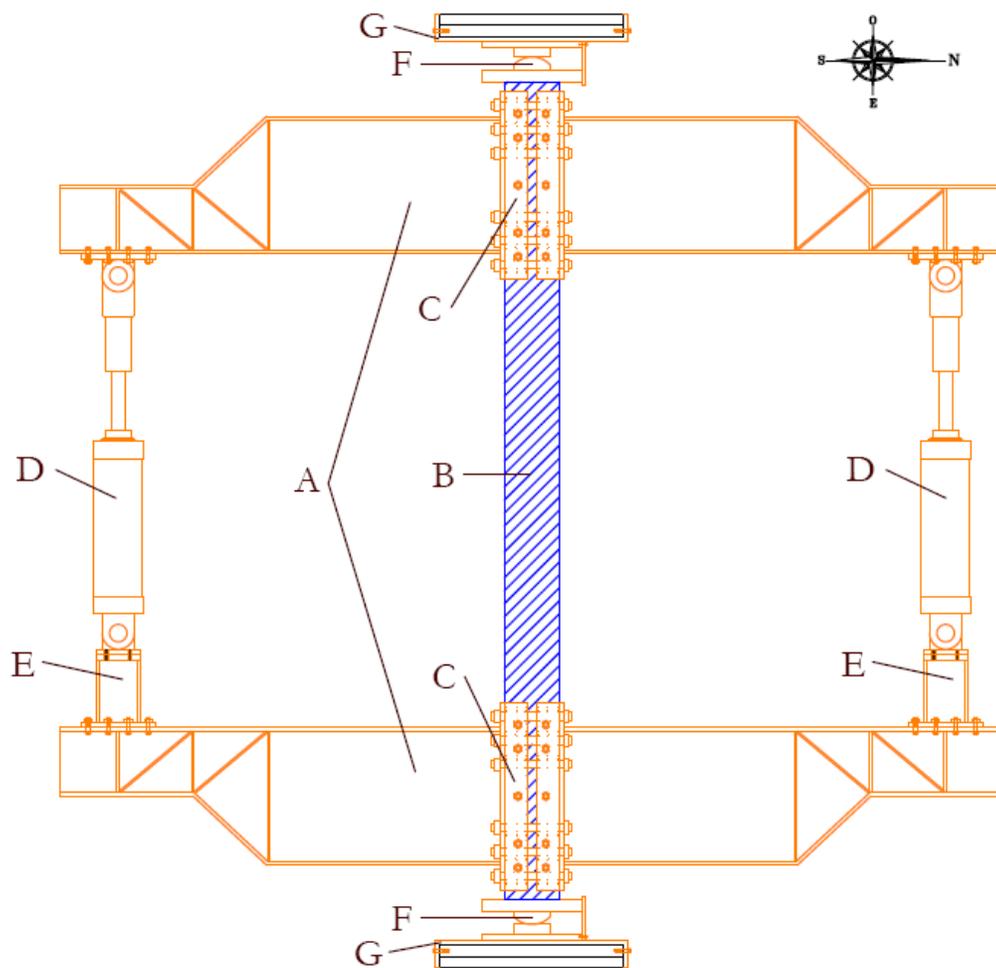
Como se ha visto en la sección 2.2, actualmente existe una prensa de ensaye en la cual será montado un sistema llamado *marco de flexión* encargado de agregar momento a los esfuerzos internos de la probeta. En este capítulo se describe el funcionamiento estructural, elementos, y conexiones entre elementos que pertenecen al *marco de flexión*.

La tarea fundamental del *marco de flexión* consiste en inducir momento puro en las probetas sin modificar el estado de carga axial proporcionado por la *prensa existente*. Esto se logra a través de imponer un giro en las cabezas de la probeta en forma controlada, sin producir translaciones en el sentido del eje de la probeta.

Se ha elaborado un diseño basado en la acción de dos actuadores hidráulicos de doble acción dispuestos en el eje vertical. Estos están conectados a dos vigas horizontales robustas que rotarán de acuerdo a la acción conjunta de los actuadores. Es decir, cuando un actuador se contrae, el otro se extiende de ma-

nera sincronizada, tal que las vigas sólo giren en torno a las cabezas de la probeta.

Cada viga horizontal está conectada, en su parte central, a una cabeza de la probeta (ver Figura 4.1). La función de estas vigas es transmitir un momento a las cabezas de la probeta utilizando las cargas puntuales ejercidas por los actuadores en sus extremos. Este sistema, viga-probeta-viga, es considerado como cuerpo rígido en el modelo, es decir, se desprecian los desplazamientos relativos entre sus elementos causados por las deformaciones.



**A) Vigas horizontales. B) Probeta. C) Sistema de confinamiento y conexión Viga-Probeta. D) Actuadores laterales. E) Extensiones de actuadores. F) Cabezas de rotación. G) Cama de prensa.**

**Figura 4.1: Esquema del marco de flexión**

El giro relativo entre las vigas horizontales se hace independiente de los cabezales de la *prensa existente* gracias a que se conectan mediante los *cabezales de rotación*, situados en el eje de acción de la carga axial, entre el cabezal de la prensa y la viga horizontal.

En la Figura 4.1 se muestra una elevación del *sistema de flexión* completo, donde se enumeran los principales elementos que lo componen. A continuación, se describe la funcionalidad de cada uno de estos elementos.

## 4.2. Elementos que componen el sistema estructural

### 4.2.1. Vigas horizontales (A)

Estos elementos son los de mayor peso en la estructura del *marco de flexión*. Son de acero A36 y tienen una luz desde probeta a actuador de  $1,8\text{ m}$ . Están constituidas por dos secciones tipo: en su parte central por un perfil  $IN60\times 152.0$ , y en el extremo donde se conecta con el actuador su sección se reduce a un  $HN30\times 92.2$  ‡.

Tienen la función, como ya se ha mencionado, de transformar las cargas que ejercen los actuadores laterales en el giro de las cabezas de la probeta.

En las reducciones de la sección transversal de los extremos, el diseño está dominado por el corte debido a la carga puntual ejercida por el actuador. El perfil dispuesto no es capaz de soportar tal corte, por lo que se ha dispuesto un arreglo de atiesadores, que actuando como un enrejado, otorga la capacidad resistente que falta.

Entre cada una de estas vigas y la probeta existe una placa llamada *placa de contacto viga-probeta*, la cual por un lado se encuentra soldada a la viga, y por el otro simplemente apoyada con la probeta. Para evitar la separación de dicha placa con la probeta se ha dispuesto de pasadores que amarran las dos *placas de contacto viga-probeta* entre sí, obligando el contacto de las cabezas probeta en sus caras Norte y Sur, con las respectivas placas.

---

‡ Perfiles obtenidos a partir de las memorias de cálculo, Anexo B.

Durante un ensayo, cuando se aplique el momento puro ejercido por las *vigas horizontales* las *placas de contacto viga-probeta* desarrollaran esfuerzos de compresión lateral (en eje Norte-Sur) localizados en las cabezas de la probeta. Estos esfuerzos pueden hacer llevar a la probeta a una falla local en las cabezas antes de que el ensayo haya llegado a su fin. Para evitar este problema se ha diseñado un sistema de confinamiento de las cabezas de la probetas en sus caras Este y Oeste.

#### 4.2.2. Sistema de confinamiento de las cabezas de la probeta (C)

Este sistema se ha dimensionado considerando el confinamiento necesario para que una probeta de hormigón armado H40 no tenga problemas de fallas locales en sus cabezas durante un ensayo completo. Se sabe, a través de ensayos triaxiales, que para un confinamiento del 10% de la resistencia nominal  $f'_c$  a la compresión, la capacidad a la compresión aumenta aproximadamente al doble [16]. Por otro lado, está la capacidad de las vigas horizontales, las cuales alcanzan a ejercer una compresión local máxima en la probeta de  $f_p$ , que debe ser del orden del  $f'_c$  del hormigón H40 si se trata de un diseño eficiente. En consecuencia, se ha diseñado dicho sistema tomando valor de tensión igual a  $10\% \cdot f_p$  en toda la superficie de las caras Este y Oeste de las cabezas de la probeta.

El sistema de confinamiento se ha diseñado mediante el uso de pernos que se unen a las *placas de contacto viga-probeta* y ajustan una placa dispuesta en las caras Este y Oeste de las cabezas de la probeta. El amarre de los pernos con las placas de contacto se diseñó considerando la capacidad de los pernos.

#### 4.2.3. Extensiones de actuadores laterales (E)

Estos elementos, como se puede observar en la Figura 4.1, cumplen la función de conectar el actuador con un extremo de la viga horizontal inferior. Los esfuerzos que se aplican sobre estos elementos dependen de la acción del actuador al cual están conectados. De esta forma, cuando el actuador se extiende, el elemento debe resistir un estado de compresión, corte, y momento. Y cuando el actuador se contrae, el elemento debe resistir tracción, corte, y momento. El corte y el momento aparecen debido a que cuando el sistema de flexión está trabajando, la rotación relativa entre las vigas transversales produce una des-

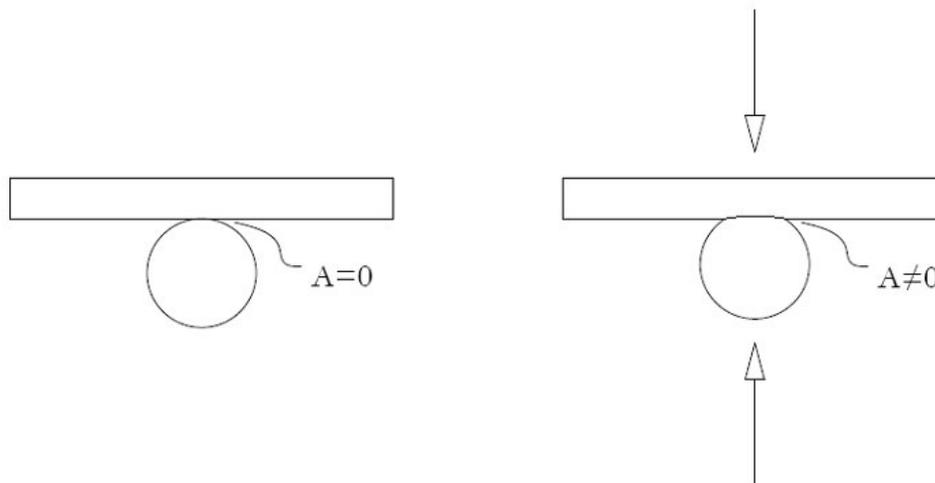
viación entre los ejes del actuador y su extensión.

Las extensiones se han diseñado en acero A36.

#### 4.2.4. Cabezal de rotación (F)

Los cabezales de rotación son elementos a través de los cuales se transmite la acción de carga axial inducida por la *prensa existente* a la probeta, y permite la rotación de este último en forma libre, es decir actúa como una conexión rotulada en una dirección. Se ubican en los extremos superior e inferior del *marco de flexión* como se puede observar en la Figura 4.1 (F). Funcionan en base al contacto de una superficie cilíndrica con un plano llamado plato de contacto. Dicha superficie cilíndrica se dispone en el sentido del eje de rotación (dirección este-oeste); tiene un radio de curvatura de  $110\text{ mm}$ , lo que permite que el giro se establezca en el centro del extremo de la probeta.

Un aspecto importante a considerar a la hora de dimensionar estos elementos es la concentración de tensiones que se presentan. Si bien teóricamente la superficie de contacto entre la superficie cilíndrica y el plato de contacto es una línea recta de área cero, en la práctica no lo es. Se genera una superficie de contacto distinta de cero debido a la deformación de los elementos ante la sollicitación. En la Figura 4.2, a modo de ejemplo, se muestra el caso de un cilindro contra una placa: en el lado izquierdo el área de contacto es nula, puesto que no hay fuerza en el contacto; en el lado aparecen dos fuerzas que comprimen los dos elementos entre sí, lo que causa que estos se deformen y el área de contacto deje de ser nula.

**Figura 4.2: Superficie de contacto**

#### 4.2.5. Cama de prensa ( $G$ )

Estos elementos cumplen dos funciones básicas: distribuye la zona de esfuerzos concentrados provenientes del plato de contacto; y obliga a que la ubicación del plato de contacto sea la adecuada, es decir, que se mantenga fija y alineada con el eje de la *prensa existente*, mientras se posiciona la probeta.

### 4.3. Uniones de Elementos

La totalidad de las uniones de elementos han sido diseñadas bajo los requerimientos de la norma norteamericana del AISC, del 2005 [2]. En algunos casos se ha recurrido a la utilización del Manual de la AISC para elementos de acero estructural [12].

De manera general, se ha dispuesto para todas las conexiones entre elementos de acero estructural uniones soldadas tipo filete (se especifican en sección 3.3), con la excepción de las que es necesario su desconexión ya sea por propósitos de montaje, o bien para cambiar piezas que no son útiles en todos los ensayos. En estos casos se utilizan pernos de alta resistencia A325.

A continuación se describe el funcionamiento y mecanismo estructural de las uniones más importantes del sistema.

#### 4.3.1. Conexión marco de flexión probeta

Se unen tres elementos: probeta, y vigas horizontales norte y sur. Las vigas horizontales se amarran entre si mediante pasadores hilados de acero A325 y diámetro nominal 7/8", que conectan las placas verticales que confinan la cabeza de la probeta por el lado norte y sur. Estos pasadores son tensados a la tensión mínima especificada en la respectiva memoria de cálculo en el anexo B.

En el diseño de esta conexión se han considerado los siguientes puntos: (1) La transmisión de esfuerzos a la probeta no induce tensiones que puedan producir daños en esta. (2) La conexión tolera probetas de distintos tamaños de sección transversal, y diversos materiales. (3) Es fácil de montar y desmontar. (4) No es costosa.

Para el diseño de las placas que tienen contacto con la probeta, se han construido dos modelos de elementos finitos: representa la zona de contacto de mayor tensión con la probeta; y donde la acción de tracción de los pernos es máxima.

##### 4.3.1.1. Modelo de placa en zona de contacto con probeta

En este modelo se consideró en dos lados apoyos simples y el lado largo empotrado, ver Figura 4.3 A. Los lados simplemente apoyados fueron considerados así debido a que, a pesar de que la placa presenta continuidad hacia los pernos, en dichos lados la placa podrá girar. Y en cambio, el lado largo se verá imposibilitado de girar debido a la presencia del perfil soldado a la placa que llega en forma perpendicular.

El régimen de carga es una carga distribuída en forma de trapecoide (ver Figura 4.3 B) que representa las tensiones que existen entre la placa y la probeta.

Los resultados útiles para el diseño de la placa se muestran en la Figura 4.3 C, en donde se aprecia que las zonas que presentan mayores momentos están en la vecindad del lado empotrado en su parte central.

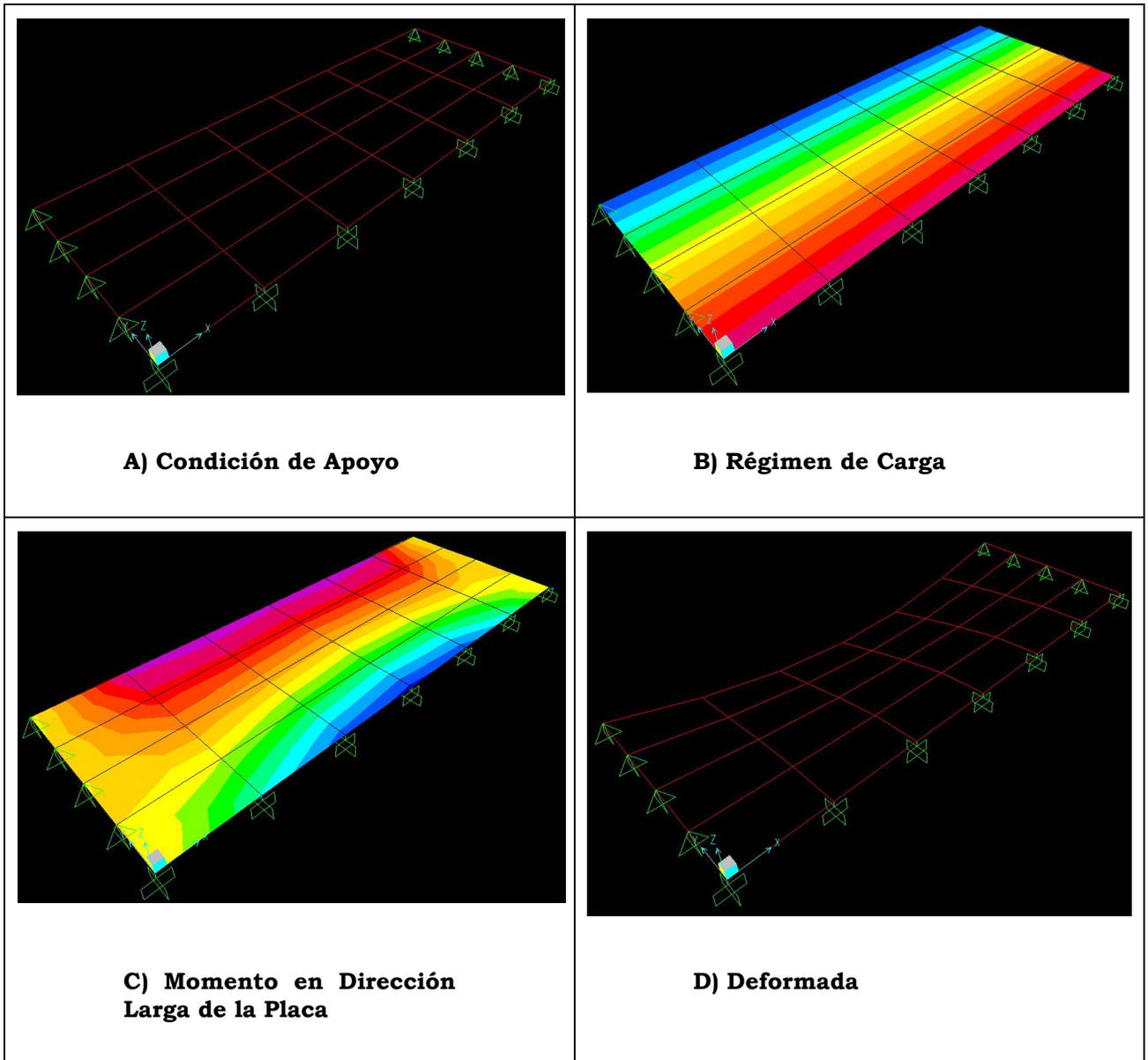
##### 4.3.1.2. Modelo de placa en zona del perno mayormente solicitado

Se modeló la parte de la placa que actúa como un voladizo cargado en forma puntual por el perno, se consideró que dicho perno opera a toda su capacidad (49 tonf). La condición de apoyo de la placa y la carga puntual se muestran en

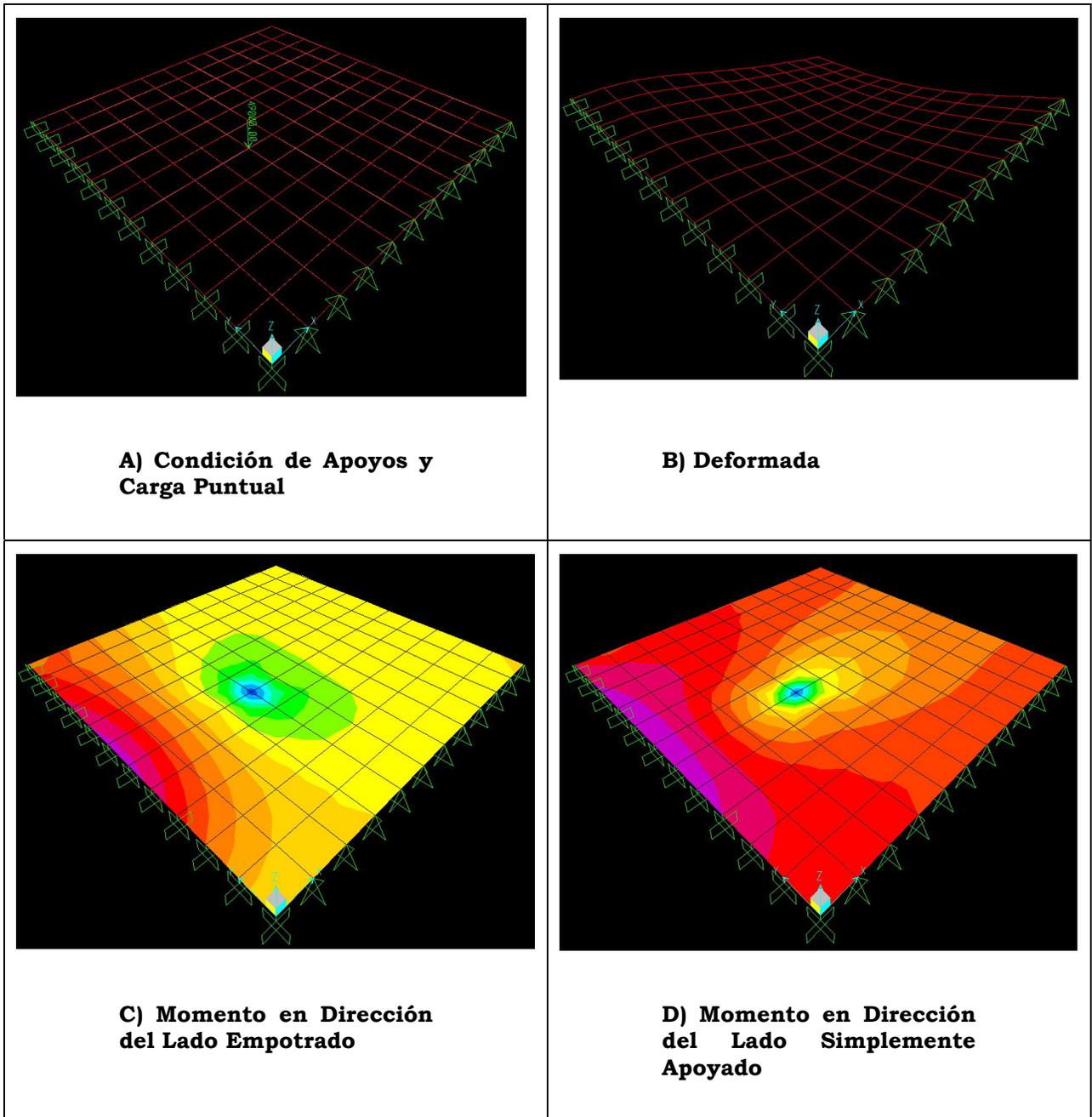
la Figura 4.4 A.

Los resultados útiles para el diseño de la placa son los que se muestran en la Figura 4.4 C, en donde se despreja la concentración de tensiones en la vecindad de la carga puntual y se toma el momento máximo registrado en la cercanía del lado empotrado.

Finalmente, puesto que ambos modelos representan la misma placa en distintas zonas, se ha tomado para su diseño el mayor de los momentos arrojados por ambos modelos:  $17,095 \text{ tonf} \cdot \text{m} / \text{m}$ . El diseño se realiza en el anexo B parte B.1.



**Figura 4.3: Modelo de Placa en Zona en Contacto con Probeta**



**Figura 4.4: Modelo de Placa en Zona de Perno con Mayor Solicitación**

#### *4.3.2. Conexión viga horizontal – extensiones de actuadores laterales*

En esta unión existen tres casos que pueden ser críticos: (1) El marco de flexión se encuentra en su máxima rotación, mientras los actuadores laterales están ejerciendo su máxima fuerza, en un lado fuerza de tracción, (2) y en el otro de compresión. (3) El marco de flexión tiene rotación nula, y los actuadores ejercen su fuerza máxima. En este caso dominará en la unión el lado que esté traccionado.

En los dos primeros casos se trata de una unión sometida a esfuerzos axiales, momento y corte; para el tercer caso es sólo fuerza axial.

# Capítulo 5

---

## SISTEMA DE CONTROL

### 5.1. Introducción al sistema de control y adquisición de datos

Para llevar a cabo el proceso de medición de las variables físicas necesarias durante un ensayo de flexo-compresión, es insoslayable disponer de un sistema de adquisición de datos adecuado, y de un sistema de control que permita manejar los actuadores hidráulicos en todo instante. Estos dos sistemas trabajan en forma independiente, es decir operan en base a dos computadores, cada uno con una tarjeta de adquisición de señales diferente, conectado a sensores distintos. Así, se pueden clasificar dos grupos de sensores: los destinados al sistema de control, y los que se encargan de medir las magnitudes físicas necesarias para los objetivos de los ensayos.

Esta memoria se limita al diseño del sistema de control, dejando el sistema de adquisición de datos como tarea para el personal del laboratorio. No obstante, en un sistema de control es necesario un sistema de adquisición y registro de datos como se detallará más adelante en el presente capítulo.

### 5.1.1. Adquisición y distribución de señales

En la sección 2.3 de este documento se han descrito los distintos sensores que se utilizan en el sistema de adquisición de datos. Se puede notar que todos los sensores (strain gauges, lvdt's, rvdt's, celdas de carga, y sensor de presión) son de tipo analógico, lo que delimita en algunos aspectos la arquitectura del sistema de adquisición y distribución de señales. Así, la arquitectura mostrada en la Figura 2.8 se modifica eliminando la parte en que se comunica a través de dispositivos digitales, puesto que sólo existen del tipo análogo en el sistema.

La mayor parte de los dispositivos mostrados en la Figura 2.8 vienen integrados en el hardware de la tarjeta que se utiliza para la adquisición de datos y control.

El sistema de adquisición de datos que se utiliza en el sistema de control se compone por una tarjeta PCI<sup>§</sup> de interconexión de datos, un programa DAQ de adquisición de datos, y un software *LabVIEW* que controla los sistemas DAQ y NI-DAQmx. A continuación se realiza una descripción de la primera de estas componentes, las dos restantes se describen en la sección 5.2 del presente capítulo.

#### 5.1.1.1. Tarjeta PCI – NI 6229 de National Instrument

Este es un elemento hardware que está definido por sus siglas en inglés como Componente periférico de interconexión. Fue desarrollado por NI y permite ser instalado en ordenadores PCs y estaciones de trabajo con una transferencia de 132 *Mbytes/s*. En la Tabla 5.1, se presentan las principales características técnicas de la tarjeta utilizada en el computador del sistema de control.

---

<sup>§</sup> Peripheral Component Interconnection.

**Tabla 5.1: Características de Tarjeta PCI NI-6229**

Tarjeta PCI-NI6229	
Entradas analógicas	32 Resolución: 16 bits Frecuencia de muestreo: 250 kS/s Rango de entrada: $\pm 0,2$ a $\pm 10V$
Salidas analógicas	4 Resolución: 16 bits Frecuencia de escritura: 833 kS/s Rango de salida: $\pm 10V$
I/O Digitales	48
Triggers	Digital

Esta tarjeta ejecuta tareas de multiplexor, conversión análoga-digital y digital-análoga en hardware, por lo que, según sea el caso, se conecta directamente a la tarjeta la salida análoga de los sensores

## 5.2. Software de control

### 5.2.1. Alcance y objetivos

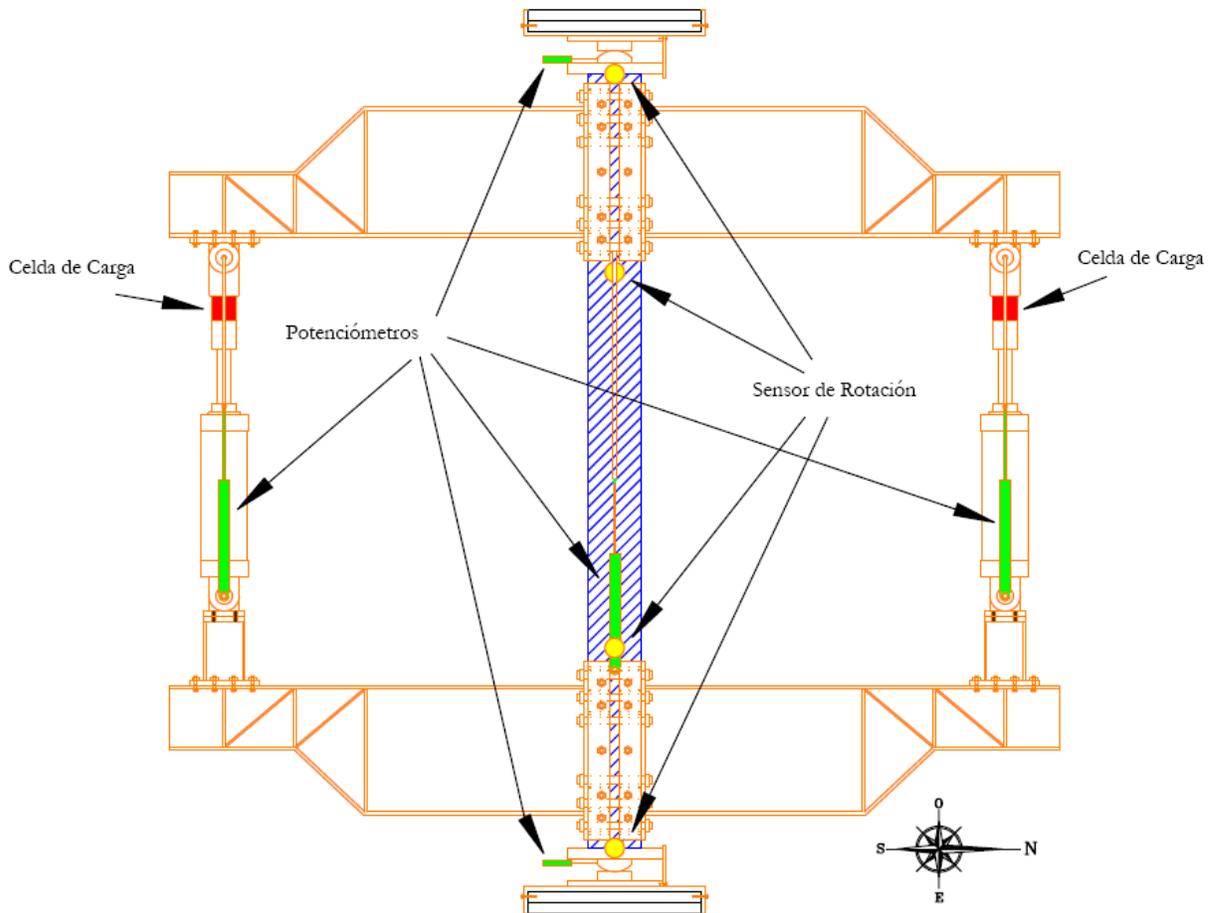
El sistema de control opera desde un computador dotado del hardware necesario para ejecutar tareas de control sobre los actuadores hidráulicos, y a través de estos intervenir en el sistema físico. Para ejercer tal tarea el software debe disponer de información acerca de los cambios de las magnitudes físicas durante los ensayos en todo instante. Esto se realiza por medio de la comunicación existente entre el computador y los sensores. Con estas disposiciones el software desempeña las siguientes tareas durante un ensayo:

1. Maneja la tarjeta de adquisición de datos, estableciendo las frecuencias de comunicación y conteo.
2. Modifica e interpreta las señales de entrada, provenientes de los sensores, para hacerlas legibles y representativas de magnitudes físicas reales.
3. Detecta estados críticos en el sistema, con el fin de evitar situaciones que puedan poner en riesgo al usuario y al medio que lo rodea.
4. Mantiene comunicado al usuario con el estado actual del ensayo.

5. Genera informe de ejecución de ensayo, es decir, crea un archivo en donde se almacena, para todos los instantes posibles, la información que comunican los sensores.

La información con que cuenta el programa de control se capta a través de los transductores destinados a ello. En la Figura 5.1 se muestra un esquema del sistema de ensayo con la ubicación de los sensores pertenecientes al sistema de control, a excepción del transductor de presión que se encuentra en el cilindro hidráulico perteneciente a la prensa existente.

Así, dichos sensores son: el sensor de presión encargado de monitorear la presión ( $P$ ) del fluido hidráulico del actuador existente perteneciente a la prensa; dos celdas de carga que miden los esfuerzos axiales ( $F_A$  y  $F_B$ ) inducidos por los actuadores laterales pertenecientes al marco de flexión; cinco LVDT's: dos situados paralelos a los actuadores laterales que miden su extensión o retracción ( $L_A$  y  $L_B$ ), uno paralelo a la probeta encargado de medir la distancia entre las vigas horizontales ( $LP$ ), y dos situados en los cabezales de rotación superior e inferior (estos miden cualquier posible desviación de los cabezales con respecto al eje de acción de fuerza de la prensa); y finalmente, cuatro sensores de rotación: dos situados en la probeta con el objeto de medir directamente la rotación de la probeta, y dos situados en los cabezales de rotación ( $\theta_1$  y  $\theta_2$ ).



**Figura 5.1: Esquema de sensores pertenecientes al sistema de control**

Las señales proporcionadas por el grupo de sensores antes descritos son trabajadas por el programa con el objeto de visualizar los distintos estados que alcanza el sistema durante un ensayo, es decir, ordena, clasifica, opera, y compara las distintas variables de entrada. En la Tabla 5.4 se muestran dichas variables, y la relación que se hace entre ellas.

### 5.2.2. Estructura del software

Como se ha mencionado anteriormente en este capítulo, existen dos programas que controla el programa LabVIEW: el DAQ y el NI-DAQmx. Ambos son utilizados para el control del sistema y en la adquisición de datos.

#### 5.2.2.1. Programa NI-DAQmx 7 de National Instruments

Es un software diseñado para controlar y administrar el hardware instalado en

el computador. Permite, básicamente, realizar la adquisición de datos. El programa tiene dos funciones:

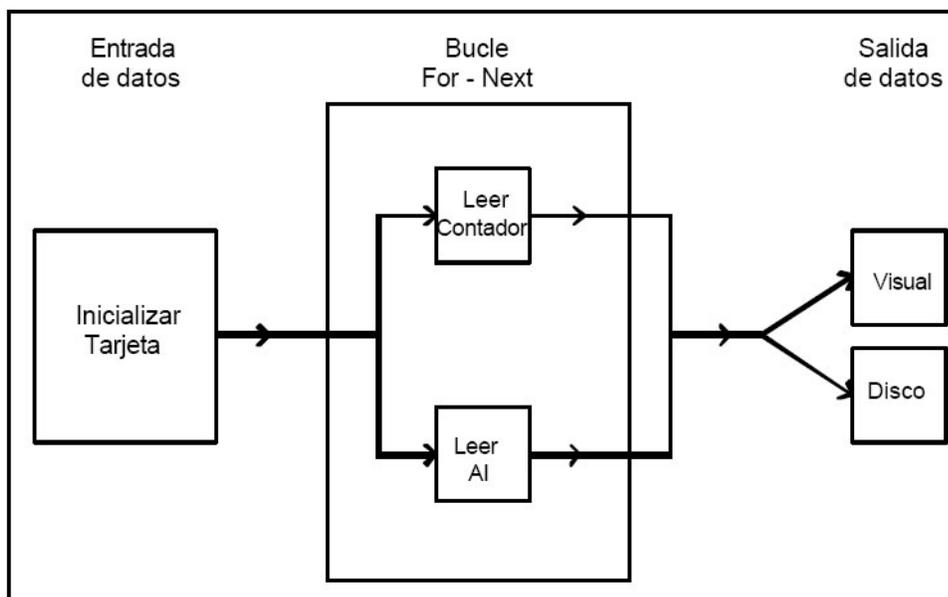
1. Adquirir y medir señales eléctricas provenientes de los sensores, ajustándolos e introduciéndolos en su interior para ser procesados por el computador.
2. Adquirir y medir el mismo tipo de señales eléctricas A/D (Analógico a Digital) y/o DIO de dispositivos conectados dentro del computador y, posiblemente, generar señales de control con D/A (Digital a Analógico) y/o DIO (Entrada / Salida digital) a dispositivos dentro del computador. Una de las ventajas de este sistema instalado es que permite sincronizar diferentes funciones de medición a un trigger común o a un evento de tiempo. Esta última ventaja permite sincronizar todas las mediciones en tiempo real.

#### 5.2.2.2. Programa LabVIEW (*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*)

LabVIEW es un lenguaje de programación de nivel superior a C y Basic. La principal diferencia entre LabVIEW y los softwares mencionados, es que éstos hacen uso de textos basados en lenguajes para crear sus códigos de líneas o códigos fuentes, mientras que LabVIEW usa un lenguaje de programación gráfica *G* para crear formas de diagramas de bloque como códigos fuentes. LabVIEW está completamente habilitado para la comunicación con el hardware de la tarjeta de National Instruments para la adquisición de datos.

En la Figura 5.2, se representa un esquema del diagrama de flujo de los datos procesados por el programa “Control.vi” elaborado en el ambiente de programación del software LabVIEW. El programa ordena la inicialización de la tarjeta con los datos de entrada, procesa la información por medio de un bucle For-Next el cual, de forma iterativa y, simultáneamente, cuenta las señales AI generadas por los distintos transductores. El programa genera dos tipos de salida, una visual a través del Front Panel, y otra salida hacia un archivo Excel ordenado de forma matricial con los datos de tiempo, posición, rotación, y presión. Una ventaja del programa es que permite establecer los tiempos de muestreo y visualizar en tiempo real la posición de los cilindros.

En el Anexo D, se presenta el código fuente del programa elaborado en LabVIEW, así como también la interfase Front Panel que permite la interacción visual del usuario con el programa desde la pantalla del monitor.



**Figura 5.2: Diagrama de flujo realizado con el programa LabVIEW [6]**

Para el funcionamiento adecuado del software de control, la instrumentación debe ser conectada a la tarjeta de adquisición de datos de acuerdo a la siguiente disposición:

**Tabla 5.2: Disposición de instrumentación en la tarjeta de adquisición de datos**

Canal	Instrumento
0	Sensor de Presión
1	Celda de carga A
2	Celda de carga B
3	LVDT Cabezal superior
4	LVDT Cabezal inferior
5	LVDT Probeta
6	LVDT Actuador A
7	LVDT Actuador B
8	RVDT 1
9	RVDT 2
10	RVDT 3
11	RVDT 4

Donde la Celda de carga A y el LVDT Actuador A es la instrumentación ubicada en el actuador que se contrae durante el ensayo; la Celda de carga B y el LVDT Actuador B es la instrumentación ubicada en el actuador que se extiende durante el ensayo; el LVDT Probeta es el potenciómetro dispuesto en la probeta en forma paralela a su eje; y los RVDTs 1, 2, 3 y 4 van ordenados desde el ubicado en la parte superior hasta el de la inferior respectivamente.

Las salidas de la tarjeta de adquisición también tienen elementos asignados en forma previa, y deben conectarse como se muestra en la siguiente tabla.

**Tabla 5.3: Disposición de elementos en las salidas de la tarjeta de adquisición de datos**

Canal	Instrumento
0	Válvula Servoasistida A
1	Válvula Servoasistida B

### 5.2.3. Metodología para el procesamiento de datos

Como se ha visto anteriormente, el programa tiene en su estructura: *datos de entrada* proporcionados por los sensores, y por el usuario, que ingresa parámetros necesarios para la correcta ejecución del ensayo, como por ejemplo velocidad de aplicación de fuerza, velocidades de desplazamiento, etc; *datos de salida* estos corresponden a variables que son de interés para los fines del ensayo, y registros necesarios para asegurar la estabilidad y correcta ejecución de cada ensayo.

Los datos adquiridos y ordenados en forma matricial por el programa LabVIEW, para todo ensayo, generan gráficos que describen la evolución de los esfuerzos de momento a los que está sometida la probeta, esto es: ángulo relativo entre las cabezas versus momento, y deformación en eje axial versus momento.

#### 5.2.3.1. Procesamiento de datos

Dicho programa hace una comparación, para todo instante de tiempo, del estado actual con el estado inmediatamente anterior generando así velocidades instantáneas de rotación y de desplazamiento.

Las correcciones de la posición de los actuadores se efectúan en base a una

comparación entre lo requerido por el usuario, y el estado que arroja la lectura de los LVDT's situados paralelos a los actuadores. Este mecanismo de corrección está integrado en el programa LabVIEW como una caja llamada  $P$ , corrección proporcional a la magnitud del error.

En la Tabla 5.4 se presenta un resumen de las variables que el programa lee o genera a partir de los sensores, para luego hacer comparaciones ya sea entre ellas mismas, o bien con los parámetros deseados por el usuario. En las columnas tituladas "Relacionadas" se ven cuadrados rellenos y vacíos, esto quiere decir por ejemplo, que para la primera columna el software compara las variables  $x_A$ ,  $x_B$ ,  $\theta$ ,  $\theta_S$  y  $\theta_I$ .

**Tabla 5.4: Variables de control y su interrelación**

VARIABLES DE CONTROL						
Tipo de Variable	Lugar de medición	Var. Análisis				
Desplazamiento (LVDT)	Axial Probeta	$x$				
		$dx/dt$				
	Actuador A	$x_A$				
	Actuador B	$x_B$				
	Cabezal de Rot. S	$x_S$				
	Cabezal de Rot. I	$x_I$				
Rotación (RVDT)	Probeta	$\theta$				
		$\omega$				
	Cabezal de Rot. S	$\theta_S$				
	Cabezal de Rot. I	$\theta_I$				
Fuerza (Celda de Carga)	Actuador A	$F_A$				
	Actuador B	$F_B$				
Presión (Sensor de Presión)	Actuador Existente	$F_E$				
		$dF_E/dt$				

La primera relación mostrada en la tabla tiene que ver con la compatibilidad que debe registrarse entre los ángulos presentes en la probeta y cabezales de rotación (ubicados en las cabezas de la probeta), y la extensión de los actuadores laterales. Para un giro arbitrario  $\theta$  de las vigas horizontales con respecto a la horizontal se obtiene, mediante relaciones geométricas, las extensiones o retracciones de los actuadores laterales como se muestra en las ecuaciones (5.1)

y (5.2).

$$L_A = \frac{L_e \cdot \text{sen}(\theta)}{\text{sen} \left( \arctg \left( \frac{L_e \cdot \text{sen}(\theta)}{2 \cdot \text{sen}(\theta) \cdot \left( \frac{LP}{2 \cdot \text{sen}(\theta)} + L1 \right) - L_e \cdot \text{cos}(\theta)} \right) \right)} \quad (5.1)$$

$$L_B = \frac{L_e \cdot \text{sen}(\theta)}{\text{sen} \left( \arctg \left( \frac{L_e \cdot \text{sen}(\theta)}{2 \cdot \text{sen}(\theta) \cdot \left( \frac{LP}{2 \cdot \text{sen}(\theta)} - L1 \right) - L_e \cdot \text{cos}(\theta)} \right) \right)} \quad (5.2)$$

Donde  $L_A$  y  $L_B$  corresponden a la longitud total del actuador que se retrae y la del que se extiende, respectivamente;  $L_e$  es la longitud de las extensiones de los actuadores;  $LP$  es la distancia entre la viga horizontal superior e inferior; y  $L1$  es la distancia entre el eje longitudinal de la probeta y el eje de los actuadores. Para que el programa pueda ejecutar la comparación entre las extensiones de los actuadores proporcionadas por las señales provenientes de los LVDT's y las de los sensores de rotación, el usuario debe ingresar las dimensiones de la probeta que se ensaya. Luego, el programa opera de la siguiente forma: sensor de rotación superior e inferior arrojan  $\theta_1$  y  $\theta_2 \rightarrow \theta = \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \rightarrow$  mediante las expresiones (5.1) y (5.2) se obtiene  $L_A$  y  $L_B \rightarrow$  se calculan las longitudes de los actuadores mediante la información de los LVDT's como la suma de la longitud del actuador en comienzo del ensayo y la distancia acumulada registrada por dichos sensores obteniéndose  $L'_A$  y  $L'_B \rightarrow$  finalmente se aplica el criterio para comparar las diferencias:  $L_C \geq |L_A| - |L'_A|$  y  $L_C \geq |L_B| - |L'_B|$ , donde  $L_C$  es el parámetro del error admisible.

$L_C$  se obtuvo a partir de tolerar  $\pm 1 \text{tonf}$  como error en los actuadores laterales. La incompatibilidad entre  $\theta$  y  $L_A$  o  $L_B$  significa una deformación en la viga horizontal. Luego, considerando la rigidez de dicha viga como

$E \cdot I_x = 2,838 \times 10^4 \text{ tonf} \cdot \text{m}^2$ , se calculó que para un  $\Delta\theta = 0,00004 \text{ rad}$  o bien un  $\Delta L = 0,072 \text{ mm}$  la carga en el actuador varía en  $1 \text{ tonf}$ . De esta manera  $L_c = \Delta L = 0,072 \text{ mm}$ .

La segunda de las relaciones establece comparación entre los ángulos que describen la rotación de cada uno de los cabezales de rotación con respecto a la posición inicial. En todo momento los ángulos del cabezal superior ( $\theta_1$ ) e inferior ( $\theta_2$ ) deben ser similares y de signo contrario, de no ser así, se infiere la existencia de una anomalía en la ejecución del ensayo y merece la detención inmediata de éste. De igual forma que en las comparaciones anteriores, el criterio es una diferencia entre valores absolutos:  $\theta_c \geq |\theta_1| - |\theta_2|$ , donde  $\theta_c$  es el parámetro del criterio y tiene un valor  $\theta_c = 0,00001 \text{ rad}$ . Este error admisible se estimó a partir de aceptar un esfuerzo en la probeta de  $\pm 1 \text{ tonf} \cdot \text{m}$ . Luego considerando un probeta de hormigón armado de sección transversal de  $65 \times 65 \text{ cm}$ , hormigón con un  $f'_c = 30 \text{ MPa}$ , y una altura de 3,5 de probeta. Se calculó  $\theta_c$  a partir de (5.3).

$$\theta = \frac{L \cdot \Delta M}{4EI} \quad (5.3)$$

Donde  $EI$  es la rigidez de la columna a la flexión,  $L$  la luz libre entre vigas horizontales, y  $\Delta M$  el diferencial de momento admitido en la probeta ( $\pm 1 \text{ tonf} \cdot \text{m}$ ).

Las fuerzas que se obtienen a partir de las celdas de carga ubicadas en los actuadores deben ser iguales pero con signo contrario, para todo instante de tiempo  $t$  (tercera relación en la Tabla 5.4). Para este caso se define  $\Delta F_c \geq |F'_A| - |F'_B|$  cuya magnitud es igual al 0.4% de la carga axial a la cual es sometida la probeta ( $P$ ). Este valor de error admisible se calculó a partir de aceptar un 0.4% de error en la carga axial de la probeta, puesto que  $\Delta P = |F'_A| - |F'_B|$ .

Los cabezales de rotación no deben, en ningún instante durante un ensayo, registrar movimientos traslacionales. En el caso que los hubiese se considera como un estado extremadamente peligroso, puesto que significa que la resis-

tencia a la compresión de la probeta no está en el eje axial de carga de la prensa. Es por esto que se han dispuesto dos sensores LVDT en los cabezales de rotación. En el caso que estos registren desplazamientos mayores a  $0,5mm$ , el sistema se detendrá en forma instantánea. Este valor de desplazamiento permitido no es definitivo, puesto que queda bien determinado en función del diseño final del cabezal de rotación.

**Tabla 5.5: Resumen de manejo de variables por programa LabVIEW**

<i>Descripción</i>	<i>Variables proporcionadas por Sensores</i>	<i>Variables proporcionadas por Usuario</i>	<i>Criterio de comparación</i>	<i>Parámetro de criterio</i>
Se comparan los giros de vigas transversales con los cambios de extensión de los actuadores laterales.	$\theta_1, \theta_2, L_A, L_B, L'_A, L'_B$	Ancho de probeta en dirección resistente al momento.	$L_C \geq \ L_A\  - \ L'_A\ ,$ $L_C \geq \ L_B\  - \ L'_B\ $	$L_C = 0,072 \text{ mm}$
Se comparan los giros de vigas horizontales entre sí.	$\theta_1, \theta_2$		$\theta_C \geq \ \theta_1\  - \ \theta_2\ $	$\theta_C = 0,00001 \text{ rad}$
Se comparan las fuerzas que ejercen los actuadores laterales.	$F'_A, F'_B$		$\Delta F_C \geq \ F'_A\  - \ F'_B\ $	$\Delta F_C = 0,4\% \cdot P$
Se registran movimientos traslacionales en cabezales de rotación.	$L_{CabSup}, L_{CabInf}$		$\varepsilon_{Cab} \geq  L_{CabSup} ,$ $\varepsilon_{Cab} \geq  L_{CabInf} $	$\varepsilon_{Cab} = 0,5 \text{ mm}$

### 5.3. Calibración del sistema de control P

Los sistema de control  $P$  necesitan de una constante llamada ganancia ( $K_p$ ), la cual se pondera por el error registrado en un instante  $t$ . Es muy importante el valor de dicha constante, puesto que si es muy pequeño, el sistema se demorará muchos tiempo en suprimir el error, y si es muy grande, el sistema puede comenzar a oscilar sin encontrar convergencia.

En la práctica existen muchos métodos para encontrar valores aceptables de las ganancias de sistemas P, PI, y PID. Algunos son rutinas que permiten sintonía automática del sistema (ver [3] y [5]), otros más simples, se basan en establecer valores aproximados de las ganancias a partir de variables dinámicas propias del sistema físico.

En esta parte se recomienda utilizar un método desarrollado por Ziegler y Nichols expuesto por K. Åström [4] llamado *Método de la respuesta de frecuencia*. Dicho método permite obtener un valor aproximado de  $K_p$  a partir de dos constantes dinámicas: la ganancia crítica  $K_C$ , y el período crítico  $T_C$ . Ambas constantes son encontradas en la realización de un experimento: en un proceso cerrado con control proporcional, se incrementa la ganancia hasta que el sistema realimentado oscila. En ese instante la ganancia y el período son los críticos ( $K_C$  y  $T_C$ ). Luego, un valor aproximado de la ganancia es  $K_p = 0,5 \cdot K_C$ .

Esto es sólo un valor aproximado, el valor final debe ser encontrado mediante una búsqueda con pruebas experimentales.

### 5.4. Operación del Sistema

La operación durante un ensayo se ejecuta a través del computador de control, que maneja el sistema mediante un panel frontal que se muestra en el Anexo C.

A continuación se presenta el procedimiento para un ensayo:

1. Se ingresan parámetros de canales:
  - a. En canales de entrada se debe colocar "Dev1/ai0:11" en la casilla.

- b. En canales de salida se debe colocar “Dev1/ao0” y “Dev1/ao1” en los canales de salida Actuador A y Actuador B respectivamente.
2. Se ingresan los parámetros de calibración para toda la instrumentación en las casillas dentro del cuadro llamado “Calibración de Instrumentación”.
3. Se ingresan los parámetros geométricos en el recuadro con su nombre.
4. Se escribe un nombre para el archivo de salida en su respectivo recuadro.
5. Se elige un programa experimental seleccionando una pestaña en el recuadro derecho del panel.
6. Ingresar las ganancias respectivas en dicho panel.
7. Verificar que estén en cero los valores de las casillas “Ángulo SETPOINT 1” y “Ángulo SETPOINT 2” para el caso del programa de ángulo controlado, y “Momento SETPOINT 1” y “Momento SETPOINT 2” para el caso del programa de momento controlado.
8. Hacer correr el programa.
9. Verificar lecturas de fuerza, posición y ángulo en el panel.

Para el programa de Momento Controlado seguir al paso 10, para el caso en que se esté ejecutando el programa Ángulo Controlado ir al paso 11.

10. Avance discretizado del experimento:
  - a. Escribir un tiempo distinto de cero en la casilla “Tiempo para alcanzar Momento SETPOINT 2 [min]”
  - b. Escribir el momento que se desea alcanzar en la casilla “Momento SETPOINT 2 [tonf·m]”
  - c. Subir el interruptor llamado “Aplicar Carga” para dar comienzo a la acción del marco de flexión. Se prende la luz verde a su lado
  - d. Esperar a que se apague la luz verde. Esto indica que se ha alcan-

zado el SETPOINT 2 y se detiene el incremento de carga.

- e. Copiar el contenido de la casilla “Momento SETPOINT 2 [tonf·m]” en “Momento SETPOINT 1 [tonf·m].
  - f. Apagar el interruptor.
  - g. Volver al paso 10 a.
11. Avance discretizado del experimento:
- a. Escribir un tiempo distinto de cero en la casilla “Tiempo para alcanzar Ángulo SETPOINT 2 [min]”
  - b. Escribir el momento que se desea alcanzar en la casilla “Ángulo SETPOINT 2 [tonf·m]”
  - c. Subir el interruptor llamado “Aplicar Carga” para dar comienzo a la acción del marco de flexión. Se prende la luz verde a su lado
  - d. Esperar a que se apague la luz verde. Esto indica que se ha alcanzado el SETPOINT 2 y se detiene el incremento de carga.
  - e. Copiar el contenido de la casilla “Ángulo SETPOINT 2 [tonf·m]” en “Ángulo SETPOINT 1 [tonf·m].
  - f. Apagar el interruptor.
  - g. Volver al paso 10 a.
12. Para dar fin a la ejecución se debe apretar el botón “DETENER”

# Capítulo 6

---

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

### 6.1. Discusión

Tomando en cuenta que este tipo de sistemas de ensayo existen en otros lugares del planeta, es pertinente efectuar una comparación entre los resultados del diseño de este trabajo con los otros sistemas. A partir de ahí se podrán proponer posibles mejoras o bien, identificar posibles errores de diseño.

En forma particular, el diseño estructural se ha basado en el sistema de ensayo utilizado por Hull [1]. Si bien, el sistema utilizado por Hull fue diseñado para magnitudes de carga diferentes, el patrón de esfuerzos producidos en la probeta (compresión axial y momento) son similares, por lo que se espera que las proporciones entre los elementos resultantes del diseño sean similares entre el sistema utilizado por Hull y el de este trabajo. Es decir, ambos sistemas guardan proporciones similares entre sus elementos constituyentes.

Los protocolos de ensayo y montaje expuestos en este trabajo, si bien pretenden ser procedimientos suficientes para la correcta ejecución de ensayos, de ninguna forma son definitivos. En efecto, bajo la visión de una mejora continua, estos

procedimientos están sujetos a modificaciones con miras a incrementar la eficiencia en la ejecución, y la seguridad del usuario.

## 6.2. Conclusión

En términos generales el diseño estructural del marco de flexión y elementos constituyentes del sistema es satisfactorio si se compara con el sistema de ensayo utilizado por Hull [1]. Es decir, el diseño final presenta proporciones entre sus elementos similares a los del sistema de ensayo dicho anteriormente.

La placa que se utiliza en la conexión entre las vigas horizontales y la probeta es, según el diseño, de  $55\text{mm}$ , lo cual es quizás muy grande, y puede ser reducido considerando perfiles más grandes en las vigas horizontales, o bien aumentando el número de pasadores en dicha conexión. La utilización de atiesadores por sí sola no permite la reducción del espesor de la placa, puesto que, considerando las distancias mínimas límites que permite el manual de construcción para acero del AISC [12] entre los pasadores y los elementos soldados a la placa, el espesor de esta no puede ser menor a los  $55\text{mm}$ .

El desarrollo de las características demandadas por los futuros usuarios fue objetivo de este trabajo, y se ha dado por satisfecho a través de las características que presenta el software de control, y de la simplicidad del montaje de todo el sistema.

El software de control tiene redundancia en la detección de estados límites que puedan poner en peligro al usuario y su entorno, por lo que dispone de un nivel de seguridad aceptable.

La interfaz con el usuario, si bien es simple, aún se puede simplificar más agregando botones que le permitan ejecutar ordenes que hasta ahora son efectuadas copiando valores de unas casillas a otras.

## 6.3. Limitaciones

### 6.3.1. Limitaciones de software

El software de control es del tipo “P”, lo cual tiene diferencias con respecto a sistemas de control más sofisticados como los “PI” y “PID”, cuyos comportamientos muestran convergencias más rápidas. Se ha optado por un sistema “P” por ser más sencillo, y porque la necesidad de sistemas más rápidos no es relevante puesto que son ensayos cuasiestáticos. En el futuro, si se desea poder ejecutar ensayos dinámicos mediante el sistema diseñado en este trabajo, se deberá modificar el software de control integrando a éste la parte integral y derivativa. Además, se deberá considerar un posible cambio de los actuadores, puesto que no todos los actuadores pueden desarrollar respuestas dinámicas.

### 6.3.2. Limitaciones de diseño

Todo el sistema de flexión sin incluir la probeta tiene un peso de  $2,950 \text{ tonf}$ , luego si se considera una probeta de hormigón armado de sección transversal de  $0,65 \times 0,65 \text{ m}$  y de altura  $3,5 \text{ m}$  de peso  $3,697 \text{ tonf}$ , el sistema en su conjunto pesa  $6,647 \text{ tonf}$  lo que supera la capacidad del puente grúa, que puede levantar hasta  $5 \text{ tonf}$ . Por esta razón se sugiere modificar, o bien cambiar el puente grúa existente por uno con capacidad de levante de  $8 \text{ tonf}$  o más.

La capacidad del sistema ( $P = 250 \text{ tonf}$ ;  $M = 150 \text{ tonf} \cdot \text{m}$ ) no permite llevar a la falla a cualquier columna de edificio de 6 pisos. En general, este tipo de columnas presentan capacidades a la compresión pura mayores a  $350 \text{ tonf}$  por lo que el sistema está limitado a encontrar la falla de las probetas en esfuerzos con grandes excentricidades ( $e = M/P$ ). Si bien la capacidad de carga axial del sistema de  $250 \text{ tonf}$  no es una limitante real, puesto que la capacidad de la prensa es de  $500 \text{ tonf}$ , se han limitado los programas de ensayo a un máximo de  $250 \text{ tonf}$  por razones de seguridad.

El diseño de los cabezales de rotación superior e inferior no se ha desarrollado en este trabajo por ser insoslayable el uso de elementos de aceros de alta resistencia debido a la concentración de tensiones.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Bradford K. Hull. Tesis de magíster. “*Experimental Behavior of High Strength Concrete Filled Tube Columns*”. Lehigh University, USA, 10 de Junio, 1998.
- [2] Load and Resistance Factor Design Specification for Structural Steel Building (LRFD) de American institute of Steel Construction Inc. (AISC). USA, Chicago, Illinois, revisión marzo de 2005.
- [3] Cheng-Ching Yu. “Autotuning Of PID Controllers”, 1999. Editorial Springer-Verlag.
- [4] K. Aström, T. Hägglund. “*PID Controllers: Theory, Design, and Tuning*”. 1995, segunda edición. De la Instrument Society of America.
- [5] Claudia A. Ostermann Wagner. Memoria. “Análisis Experimental de Técnicas de Sintonía Automática de Controladores PID”. Universidad de Chile, 1993.
- [6] Ricardo J. Rivera Medina. Tesis de Doctorado. “*Análisis Teórico Experimental Sobre Sincronización de Actuadores Oleohidráulicos*”. Universidad Politécnica de Cataluña, 2004.
- [7] Arthur H. Nilson. “*Diseño de Estructuras de Concreto*” 1999, duodécima edición. Editorial McGraw Hill.
- [8] “Transactions: in measurement and control. Volume 2: Data acquisition” 1998, Omega.com®.
- [9] “Transactions: in measurement and control. Volume 3: Force-related measurement” 1998, Omega.com®.
- [10] Requisitos de reglamento para concreto estructural y comentario, ACI 318S-05. American Concrete Institute. 2005.

- [11] Norma chilena Nch1037of1977 Hormigón - Ensayo de compresión de probetas cúbicas y cilíndricas.
- [12] American Institute of Steel Construction (AISC), “Steel Construction Manual”, treceava edición, 2005.
- [13] Ramón Pallás Areny. *“Adquisición y distribución de señales”* 2005, primera edición. Editorial Marcombo.
- [14] American Institute of Steel Construction (AISC), “Steel Design Guide - Extended End-Plate Moment Connections” 2003, segunda edición.
- [15] American Institute of Steel Construction (AISC), “Steel Design Guide - Column Base Plates” 1990, primera edición.
- [16] F. E. Richard, A. Brandtzaeg, y R. L. Brown, “A study of the Failure of Concrete under Combined Compressive Stresses, Bulletin 185, University of Illinois Engineering Experiment Station, Urbana, Ill., Noviembre 1928.
- [17] Rodrigo A. Valenzuela Quintana, Trabajo de Título “Aplicación de Columnas Compuestas del Tipo CTF al Diseño Sísmico de Edificios en Chile”, Universidad de Chile, Santiago, Chile. Mayo 2007.
- [18] Alfonso Larraín Vial, Fernando Yañez Uribe, Cristian Verdugo Arnold, “Manual de Cálculo de Hormigón Armado en Base a Código ACI 318-05”, segunda edición, agosto 2006. Gerdau Aza.

---

# ANEXOS

---

ANEXO A – PROCEDIMIENTO DE MONTAJE

ANEXO B – MEMORIAS DE CÁLCULO

ANEXO C – CÓDIGO DEL SOFTWARE

---

# ANEXO A

## PROCEDIMIENTO DE MONTAJE

---

El procedimiento de montaje para un ensayo convencional de una probeta a flexo-compresión se realiza de acuerdo a este anexo.

1. Medir las dimensiones de la probeta.
2. Marcar la ubicación de las vigas horizontales en la probeta.
3. Conectar las extensiones de los actuadores laterales a las vigas horizontales.
4. Adherir las camas de apoyo de los cabezales superior e inferior.
5. Montar vigas horizontales superiores e inferiores. Tener especial cuidado de respetar la posición de éstas, verificando con las marcas previamente hechas en la probeta.
6. Luego, se montan los actuadores laterales a sus respectivas extensiones. La válvula que controla los actuadores debe permitir el paso libre de fluido a éstos, tal que se puedan extender libremente.
7. Se instrumenta la probeta\*\*.
8. En la prensa se ubica el cabezal superior dejando una distancia entre cabezales mayor que la medida entre los extremos superior e inferior del sistema de flexión completo. Considerando que la posición del actuador esté abajo.
9. Se monta el sistema de flexión en la prensa, tomándolo con el puente grúa desde los ganchos de la viga transversal superior.

---

\*\* Los procedimientos de instrumentación dependerán del tipo de instrumentos que se ocupen, y es tarea del usuario hacerlo mediante un procedimiento adecuado. No obstante, en la sección 2.3 *Instrumentos de medición* se detallan algunos de estos procedimientos.

- 10.El sistema de flexión se alinea con la prensa, y se fija su posición mediante una compresión de  $2\ tonf$  inducida por la prensa.
- 11.Se verifica la posición y alineamiento del sistema de flexión con respecto a la prensa.
- 12.Se disponen las placas del sistema de confinamiento en las conexiones probeta-vigas horizontales. Y se les ajusta mediante los pernos de confinamiento.
- 13.Se monta la instrumentación que no ha podido ser colocada antes del montaje del sistema de flexión.
- 14.Se corroboran en el computador de monitoreo los valores de desplazamientos, rotaciones, fuerzas, etc.
- 15.Se da comienzo al programa de ensayo.

---

# ANEXO B

## MEMORIAS DE CÁLCULO

---

### B.1. DISEÑO DE ELEMENTOS

### Diseño de Vigas Horizontales

$$\text{Acero ASTM A36} \quad E := 2100 \frac{\text{tonf}}{\text{cm}^2} \quad F_y := 2.53 \frac{\text{tonf}}{\text{cm}^2}$$

#### Solicitaciones

Mayoración de cargas de acuerdo a LRFD:  $1.2D + 1.6L$

Peso propio (vigas inferiores):  $D := 2\text{tonf}$

Carga de actuador hidráulico lateral:  $P_{ahl} := 40\text{tonf}$

Así, el momento actuante en la viga es:

$$M_{\max} := 1.6 \cdot P_{ahl} \cdot 1.8\text{m} \quad M_{\max} = 115.2\text{tonf} \cdot \text{m} \quad M(x) := P_{ahl} \cdot (1.8\text{m} - x)$$

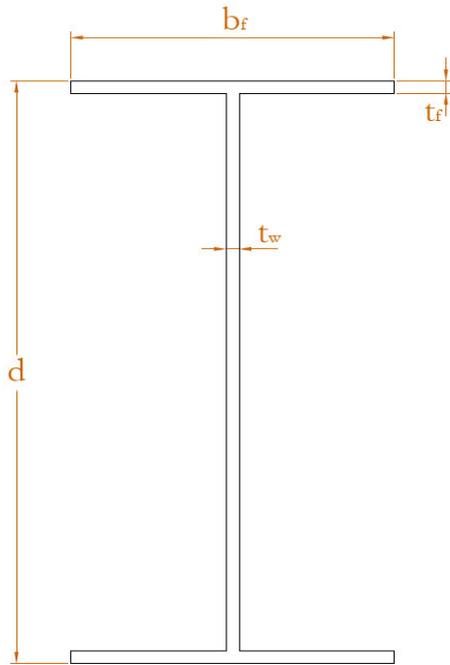
$$M_u := M_{\max}$$

LRFD:

$$\text{Momento:} \quad \phi_b := 0.9$$

$$\text{Corte:} \quad \phi_v := 0.9$$

$$\text{Compresión:} \quad \phi_c := 0.9$$

**Geometría de sección Transversal: IN60X152,0**

$$t_f := 25\text{mm}$$

$$b_f := 300\text{mm}$$

$$d := 600\text{mm}$$

$$t_w := 8\text{mm}$$

$$s_{\min} := 8\text{mm} \quad L_b := 2 \cdot 1800\text{mm} = 3.6\text{m}$$

$$A_g := (d - 2t_f)t_w + 2b_f t_f$$

$$A_g = 194 \cdot \text{cm}^2$$

$$I_x := \frac{t_w \cdot (d - 2t_f)^3}{12} + 2 \cdot \left[ \frac{b_f t_f^3}{12} + b_f t_f \left( \frac{d - t_f}{2} \right)^2 \right]$$

$$I_x = 1.352 \times 10^5 \cdot \text{cm}^4$$

$$S_x := \frac{2I_x}{d}$$

$$S_x = 4.505 \times 10^3 \cdot \text{cm}^3$$

$$r_x := \sqrt{\frac{I_x}{A_g}}$$

$$r_x = 26.395 \cdot \text{cm}$$

$$I_y := (d - 2t_f) \cdot \frac{t_w^3}{12} + 2t_f \cdot \frac{b_f^3}{12}$$

$$I_y = 1.125 \times 10^4 \cdot \text{cm}^4$$

$$S_y := \frac{2I_y}{d}$$

$$S_y = 375.078 \cdot \text{cm}^3$$

$$r_y := \sqrt{\frac{I_y}{A_g}}$$

$$r_y = 7.616 \cdot \text{cm}$$

$$h := d - 2(t_f - s_{\min})$$

$$h = 56.6 \cdot \text{cm}$$

$$I_{yc} := \frac{b_f^3 \cdot t_f}{12} \quad \alpha := 0.5 \quad I_{yc} = 5.625 \times 10^3 \cdot \text{cm}^4$$

$$C_w := h^2 \cdot I_{yc} \cdot \alpha \quad C_w = 9.01 \times 10^6 \cdot \text{cm}^6$$

$$J := \frac{1}{3} \cdot (d - 2t_f) \cdot t_w^3 + 2t_f^3 \cdot b_f \quad J = 321.887 \cdot \text{cm}^4$$

$$Z_x := b_f \cdot t_f (h + t_f) + \frac{h^2 \cdot t_w}{4} \quad Z_x = 5.073 \times 10^3 \cdot \text{cm}^3$$

## Verificación de capacidad al momento

(i) Límites de esbeltez

$$k_c := \frac{4}{\sqrt{\frac{h}{t_w}}} = 0.476 \quad F_L := 0.7 \cdot F_y \quad \lambda_f := \frac{b_f}{2t_f} = 6 \quad \lambda_w := \frac{h}{t_w} = 70.75$$

$$\text{Compacidad\_Ala} := \begin{cases} \text{"Ala Compacta"} & \text{if } \lambda_f \leq 0.38 \cdot \sqrt{\frac{E}{F_y}} = \text{"Ala Compacta"} \\ \text{"Ala Esbelta"} & \text{if } \lambda_f > 0.95 \sqrt{\frac{k_c \cdot E}{F_L}} \\ \text{"Ala No Compacta"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Compacidad\_Alma} := \begin{cases} \text{"Alma Compacta"} & \text{if } \lambda_w \leq 3.76 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = \text{"Alma Compacta"} \\ \text{"Alma Esbelta"} & \text{if } \lambda_w > 5.70 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \\ \text{"Alma No Compacta"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

(ii)  $L_p$  y  $L_r$

$$L_p := 1.76 r_y \cdot \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad L_p = 3.862 \text{ m} \quad > \quad L_b = 3.6 \text{ m}$$

$L_r$  no se aplica

*(iii) Resistencia nominal**(a) Fluencia*

$$M_p := F_y \cdot Z_x \quad M_p = 128.352 \cdot \text{tonf} \cdot \text{m}$$

$$(b) \text{ Volcamiento} \quad L_p = 3.862 \text{ m} > L_b = 3.6 \text{ m} \Rightarrow \text{No hay Volcamiento}$$

$$M_n := M_p$$

$$FU_m := \frac{M_u}{\phi_b \cdot M_n} \quad FU_m = 0.997 \quad \text{OK}$$

## Verificación de capacidad al corte

$$\text{Solicitud:} \quad V_u := 1.6P_{ahl}$$

$$\frac{h}{t_w} = 70.75 < 260 \Rightarrow k_v := 5$$

$$C_v := \begin{cases} 1 & \text{if } \frac{h}{t_w} \leq 1.10 \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{F_y}} \\ \frac{1.51 \cdot E \cdot k_v}{F_y \cdot \left(\frac{h}{t_w}\right)^2} & \text{if } \frac{h}{t_w} > 1.37 \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{F_y}} \\ \frac{1.10 \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{F_y}}}{\frac{h}{t_w}} & \text{otherwise} \end{cases} \quad C_v = 1$$

$$A_w := d \cdot t_w \quad A_w = 48 \cdot \text{cm}^2$$

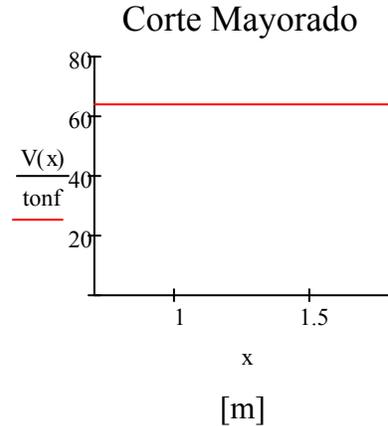
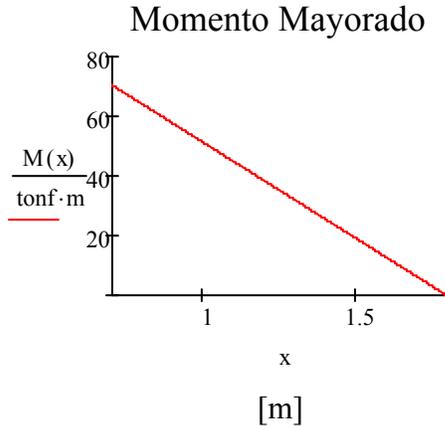
$$V_n := 0.6F_y \cdot A_w \cdot C_v \quad V_n = 72.864 \cdot \text{tonf}$$

$$FU_v := \frac{V_u}{\phi_v \cdot V_n} \quad FU_v = 0.976 \quad \text{OK}$$

## Reducción de sección en extremo de viga

Momento:  $M(x) := 1.6P_{ahl} \cdot (1.8m - x)$

Corte:  $V(x) := 1.6P_{ahl}$



Se verifica perfil en extremo.

Acero A36

$$M_u := 0$$

$$1.6P_{ahl} = 64 \text{ tonf}$$

### Geometría de sección Transversal: HN30X92,2

$$t_f := 16\text{mm} \quad b_f := 300\text{mm} \quad d := 300\text{mm} \quad t_w := 8\text{mm} \quad s_{\min} := 6\text{mm} \quad L_b := 1800\text{mm}$$

*Verificación de capacidad al corte*

Solicitud:  $V_u := 1.6P_{ahl}$   $\phi_v := 0.9$

Con atiesadores.  $a := 50\text{mm}$

$$k_v := \begin{cases} 5 & \text{if } \frac{a}{h} > 3.0 \vee \frac{a}{h} > \left[ \frac{260}{\left( \frac{h}{t_w} \right)} \right]^2 \\ 5 + \frac{5}{\left( \frac{a}{h} \right)^2} & \text{otherwise} \end{cases} = 161.8$$

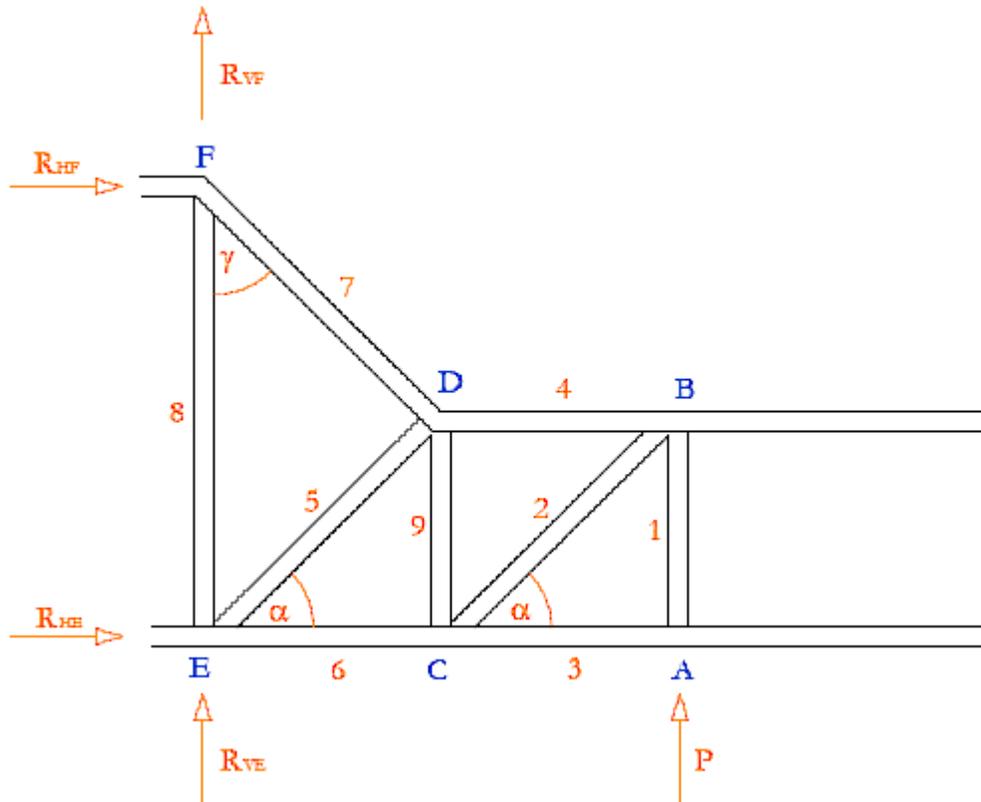
$$C_v := \begin{cases} 1 & \text{if } \frac{h}{t_w} \leq 1.10 \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{F_y}} \\ \frac{1.51 \cdot E \cdot k_v}{F_y \cdot \left(\frac{h}{t_w}\right)^2} & \text{if } \frac{h}{t_w} > 1.37 \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{F_y}} \\ \frac{1.10 \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{F_y}}}{\frac{h}{t_w}} & \text{otherwise} \end{cases} \quad C_v = 1$$

$$A_w := d \cdot t_w = 24 \text{ cm}^2 \quad V_n := 0.6 F_y \cdot A_w \cdot C_v = 36.432 \text{ tonf}$$

$$FU_v := \frac{V_u}{\phi_v \cdot V_n} \quad FU_v = 1.952 \quad \text{NO CUMPLE}$$

La falta de capacidad resistente del extremo será suplida por un sistema de atiesadores que actuarán como un sistema enrejado que se calcula a continuación.

## Enrejado de extremo de viga



Datos de entrada:

$$L_8 := 600\text{mm} - 25\text{mm} = 575\text{mm} \quad L_1 := d - t_f = 284\text{mm} \quad \alpha := 41\text{deg}$$

Espesor de atiesadores:  $e := 8\text{mm}$

Fuerza de actuador:  $P := 0.5 \cdot (1.640\text{tonf} - V_n)$  El factor 0.5 es por que el enrejado se dispone a ambos lados del alma, es decir, cada uno recibe la mitad de la carga.  
 $P = 13.784\text{tonf}$

Cálculos:

Longitudes y ángulos.

$$L_2 := \frac{L_1}{\sin(\alpha)} = 432.888\text{mm} \quad L_3 := L_2 \cdot \cos(\alpha) = 326.705\text{mm} \quad L_4 := L_3 \quad L_5 := L_2$$

$$L_6 := L_3 \quad L_9 := L_1 \quad \gamma := \operatorname{atan}\left(\frac{L_6}{L_8 - L_1}\right) = 48.308 \text{ deg}$$

$$L_7 := \frac{L_8 - L_1}{\cos(\gamma)} = 437.512 \text{ mm} \quad \beta := 90 \text{ deg} - \alpha = 49 \text{ deg}$$

*Esfuerzos*

Nodo F:  $R_{VF} := 0 \quad R_{HF} := \frac{2L_1 \cdot P}{L_8} = 13.616 \text{ tonf}$

Nodo E:  $R_{VE} := -P = -13.784 \text{ tonf} \quad R_{HE} := -R_{HF} = -13.616 \text{ tonf}$

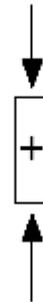
$$P_1 := P \quad P_2 := \frac{-P_1}{\cos(\beta)} \quad P_3 := 0 \quad P_4 := -P_2 \cdot \sin(\beta) \quad P_6 := P_2 \cdot \cos(\alpha)$$

$$P_5 := \frac{R_{HE} - P_6}{\cos(\alpha)} \quad P_7 := \frac{R_{HF}}{\sin(\gamma)} \quad P_8 := -P_7 \cdot \cos(\gamma) \quad P_9 := -P_2 \cdot \sin(\alpha)$$

*Resumen:*

$L_1 = 284 \text{ mm}$	$P_1 = 13.784 \text{ tonf}$
$L_2 = 432.888 \text{ mm}$	$P_2 = -21.01 \text{ tonf}$
$L_3 = 326.705 \text{ mm}$	$P_3 = 0$
$L_4 = 326.705 \text{ mm}$	$P_4 = 15.857 \text{ tonf}$
$L_5 = 432.888 \text{ mm}$	$P_5 = 2.969 \text{ tonf}$
$L_6 = 326.705 \text{ mm}$	$P_6 = -15.857 \text{ tonf}$
$L_7 = 437.512 \text{ mm}$	$P_7 = 18.234 \text{ tonf}$
$L_8 = 575 \text{ mm}$	$P_8 = -12.128 \text{ tonf}$
$L_9 = 284 \text{ mm}$	$P_9 = 13.784 \text{ tonf}$

Convención de  
signos



## Capacidad resistente de enrejado

Verificación de tramo -7-

Compresión

El factor de largo efectivo de los atiesadores es:  
Es conservador puesto que estos elementos son soldados  
en sus extremos y en uno de sus lados va soldado al alma  
del perfil.

$$K := 0.65$$



$$L := L_7 \quad A_g := t_f \cdot \frac{b_f}{2} = 24 \text{ cm}^2 \quad r := \frac{t_f}{\sqrt{12}} = 4.619 \text{ mm}$$

$$F_e := \frac{\pi^2 \cdot E}{\left(\frac{K \cdot L}{r}\right)^2} = 5.467 \frac{\text{tonf}}{\text{cm}^2} \quad F_{cr} := \begin{cases} \left[ \left( \frac{F_y}{F_e} \right) \right] \cdot F_y & \text{if } F_e \geq 0.44 F_y \\ 0.877 F_e & \text{otherwise} \end{cases} = 2.085 \frac{\text{tonf}}{\text{cm}^2}$$

$$P_{n7} := \begin{cases} (F_y \cdot A_g) & \text{if } \frac{K \cdot L}{r} \leq 25 \\ F_{cr} \cdot A_g & \text{otherwise} \end{cases} = 50.028 \text{ tonf}$$

$$FU_7 := \frac{P_7}{\phi_c \cdot P_{n7}} = 0.405 < 1.0 \quad \text{OK}$$

Verificación de atiesador -2-

Compresión

$$K := 0.65 \quad L := L_2 \quad A_g := e \cdot \frac{b_f}{2} = 15 \text{ cm}^2 \quad r := \frac{e}{\sqrt{12}} = 2.887 \text{ mm}$$

$$F_e := \frac{\pi^2 \cdot E}{\left(\frac{K \cdot L}{r}\right)^2} = 2.182 \frac{\text{tonf}}{\text{cm}^2} \quad F_{cr} := \begin{cases} \left[ \left( \frac{F_y}{F_e} \right) \right] \cdot F_y & \text{if } F_e \geq 0.44 F_y \\ 0.877 F_e & \text{otherwise} \end{cases} = 1.557 \frac{\text{tonf}}{\text{cm}^2}$$

$$P_{n2} := \begin{cases} (F_y \cdot A_g) & \text{if } \frac{K \cdot L}{r} \leq 25 \\ F_{cr} \cdot A_g & \text{otherwise} \end{cases} = 23.356 \text{ tonf}$$

$$FU_2 := \frac{-P_2}{\phi_c \cdot P_{n2}} = 1 < 1.0 \quad \text{OK}$$

Verificación de atiesador -8-

Compresión

$$K := 0.65 \quad L := L_8 \quad A_g := e \cdot \frac{b_f}{2} = 15 \cdot \text{cm}^2 \quad r := \frac{e}{\sqrt{12}} = 2.887 \text{ mm}$$

$$F_e := \frac{\pi^2 \cdot E}{\left(\frac{K \cdot L}{r}\right)^2} = 1.236 \frac{\text{tonf}}{\text{cm}^2} \quad F_{cr} := \begin{cases} \left[ \left( \frac{F_y}{F_e} \right) \right] \cdot F_y & \text{if } F_e \geq 0.44 F_y \\ 0.877 F_e & \text{otherwise} \end{cases} = 1.074 \frac{\text{tonf}}{\text{cm}^2}$$

$$P_{n8} := \begin{cases} (F_y \cdot A_g) & \text{if } \frac{K \cdot L}{r} \leq 25 \\ F_{cr} \cdot A_g & \text{otherwise} \end{cases} = 16.116 \text{ tonf}$$

$$F_{U8} := \frac{-P_8}{\phi_c \cdot P_{n8}} = 0.836 < 1.0 \quad \text{OK}$$

## Cálculo de atiesadores por compresión en extremo

Se recibe la carga en perfil HN30X92,2

$$P_u := 1.6 P_{ahl} = 64 \text{ tonf}$$

### 1.- Flexión local del ala

$$\phi_1 := 0.9 \quad P_{n1} := 6.25 t_f^2 \cdot F_y \quad P_{n1} = 40.48 \text{ tonf}$$

### 2.- Fluencia local del alma

$$\phi_2 := 1.0 \quad k := t_f + s_{\min} \quad k = 2.2 \text{ cm} \quad N := 30 \text{ cm}$$

$$P_{n2} := (2.5k + N) \cdot F_y \cdot t_w \quad P_{n2} = 71.852 \text{ tonf}$$

### 3.- Arrugamiento del alma

$$\phi_3 := 0.75 \quad P_{n3} := 0.80 t_w^2 \cdot \left[ 1 + 3 \cdot \left( \frac{N}{d} \right) \cdot \left( \frac{t_w}{t_f} \right)^{1.5} \right] \cdot \sqrt{\frac{E \cdot F_y \cdot t_f}{t_w}} \quad P_{n3} = 108.758 \text{ tonf}$$

**4.- Pandeo lateral del alma**

$$\phi_4 := 0.85 \quad l := 1.8\text{m} \quad \frac{\left(\frac{h}{t_w}\right)}{\left(\frac{l}{b_f}\right)} = 5.833 > 1.17 \Rightarrow \text{No se aplica}$$

Luego el atiesador -1- debe suplir además de la carga por el enrejado, lo siguiente:

$$P_{\text{ati}} := \frac{(P_u - P_{n1})}{2} = 11.76\text{tonf}$$

entonces el atiesador -1- debe resistir:  $P_{u1} := P_{\text{ati}} + P_1 = 25.544\text{tonf}$

Verificación de atiesador -1-  $e := 14\text{mm}$

Compresión

$$K := 0.65 \quad L := L_8 \quad A_g := e \cdot \frac{b_f}{2} = 21 \cdot \text{cm}^2 \quad r := \frac{e}{\sqrt{12}} = 4.041 \cdot \text{mm}$$

$$F_e := \frac{\pi^2 \cdot E}{\left(\frac{K \cdot L}{r}\right)^2} = 2.423 \frac{\text{tonf}}{\text{cm}^2} \quad F_{\text{cr}} := \begin{cases} \left[ \left( \frac{F_y}{F_e} \right) \cdot F_y \right] & \text{if } F_e \geq 0.44F_y \\ 0.877F_e & \text{otherwise} \end{cases} = 1.634 \frac{\text{tonf}}{\text{cm}^2}$$

$$P_{n1} := \begin{cases} (F_y \cdot A_g) & \text{if } \frac{K \cdot L}{r} \leq 25 \\ F_{\text{cr}} \cdot A_g & \text{otherwise} \end{cases} = 34.322\text{tonf}$$

$$FU_1 := \frac{P_{u1}}{\phi_c \cdot P_{n1}} = 0.827 < 1.0 \quad \text{OK}$$

## Verificación del perfil HN30X92,2 al Momento en punto CD

$$M_u := 1.6 \cdot P_{ahl} \cdot L_3 = 20.909 \text{ tonf} \cdot \text{m}$$

### Límites de esbeltez

$$k_c := \frac{4}{\sqrt{\frac{h}{t_w}}} = 0.676 \quad F_L := 0.7 \cdot F_y \quad \lambda_f := \frac{b_f}{2t_f} = 9.375 \quad \lambda_w := \frac{h}{t_w} = 35$$

$$\text{Compacidad\_Ala} := \begin{cases} \text{"Ala Compacta"} & \text{if } \lambda_f \leq 0.38 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = \text{"Ala Compacta"} \\ \text{"Ala Esbelta"} & \text{if } \lambda_f > 0.95 \sqrt{\frac{k_c \cdot E}{F_L}} \\ \text{"Ala No Compacta"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Compacidad\_Alma} := \begin{cases} \text{"Alma Compacta"} & \text{if } \lambda_w \leq 3.76 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = \text{"Alma Compacta"} \\ \text{"Alma Esbelta"} & \text{if } \lambda_w > 5.70 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \\ \text{"Alma No Compacta"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

### Lp y Lr

$$L_p := 1.76 \alpha_y \cdot \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad L_p = 3.971 \text{ m} > L_b := 1.8 \text{ m}$$

Lr no se aplica

### Resistencia nominal

#### Fluencia

$$M_p := F_y \cdot Z_x \quad M_p = 39.913 \text{ tonf} \cdot \text{m}$$

$$\text{Volcamiento} \quad L_p = 3.971 \text{ m} > L_b = 1.8 \text{ m} \Rightarrow \text{No hay Volcamiento}$$

$$M_n := M_p$$

$$FU_m := \frac{M_u}{\phi_b \cdot M_n} \quad FU_m = 0.582 < 1.0 \quad \text{OK}$$

## Diseño de Placa de Viga Horizontal

Acero ASTM A36

$$E := 2100 \frac{\text{tonf}}{\text{cm}^2}$$

$$F_y := 2.53 \frac{\text{tonf}}{\text{cm}^2}$$

$$N := 820 \text{ mm}$$

$$r_3 := \frac{N}{2} - 62 \text{ mm} = 348 \text{ mm}$$

$$r_2 := r_3 - 105 \text{ mm} = 243 \text{ mm}$$

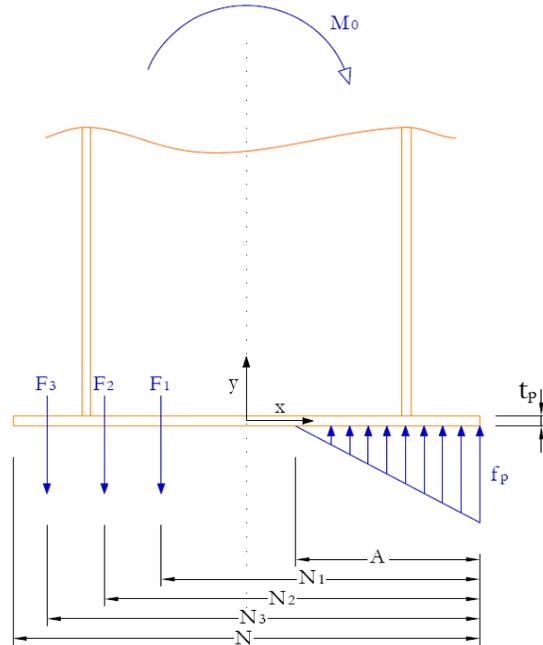
$$r_1 := r_2 - 105 \text{ mm} = 138 \text{ mm}$$

$$M_u := 1.6 \cdot 0.5 \cdot 150 \text{ tonf} \cdot \text{m} = 120 \text{ tonf} \cdot \text{m}$$

$$N_1 := r_1 + \frac{N}{2} = 548 \text{ mm}$$

$$N_2 := r_2 + \frac{N}{2} = 653 \text{ mm}$$

$$N_3 := r_3 + \frac{N}{2} = 758 \text{ mm}$$

Ancho de placa:  $B := 500 \text{ mm}$ Ancho de probeta:  $B' := 320 \text{ mm}$ Valores iniciales:  $F_3 := 49 \text{ tonf}$      $A := 400 \text{ mm}$ 

$$A := \text{root} \left[ \begin{array}{l} -M_u + 2F_3 \cdot \left( N_3 - \frac{N}{2} \right) + 2F_3 \cdot \left( \frac{N_2 - A}{N_3 - A} \right) \cdot \left( N_2 - \frac{N}{2} \right) \dots \\ + 2F_3 \cdot \left( \frac{N_1 - A}{N_3 - A} \right) \cdot \left( N_1 - \frac{N}{2} \right) + 2F_3 \cdot \left( \frac{N_1 + N_2 + N_3 - 3A}{N_3 - A} \right) \cdot \left( \frac{N}{2} - \frac{A}{3} \right) \end{array} , A \right]$$

$$A = 364.844 \text{ mm}$$

$$F_1 := F_3 \cdot \left( \frac{N_1 - A}{N_3 - A} \right) = 22.827 \text{ tonf}$$

$$F_2 := F_3 \cdot \left( \frac{N_2 - A}{N_3 - A} \right) = 35.914 \text{ tonf}$$

$$f_p := \frac{4}{A \cdot B'} \cdot (F_1 + F_2 + F_3) = 334.872 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

### *Diseño de espesor de placa (elementos finitos)*

Se ha construido un modelo de elementos finitos para la obtención de esfuerzos internos en la placa inducidos por: el perno mayormente traccionado; y por el contacto con la probeta.

Espesor de placa:  $t_p := 55\text{mm}$

### *Por perno en la esquina traccionada*

Momento máximo en placa:  $M_{\max} := \frac{0.359}{0.021} \cdot \frac{\text{tonf} \cdot \text{m}}{\text{m}} = 17.095 \frac{\text{tonf} \cdot \text{m}}{\text{m}}$

Capacidad:  $\phi_b := 0.9$   $M_n := F_y \cdot \left( \frac{t_p^2}{4} \right) = 19.133 \frac{\text{tonf} \cdot \text{m}}{\text{m}}$

$$\phi_b \cdot M_n = 17.22 \frac{\text{tonf} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

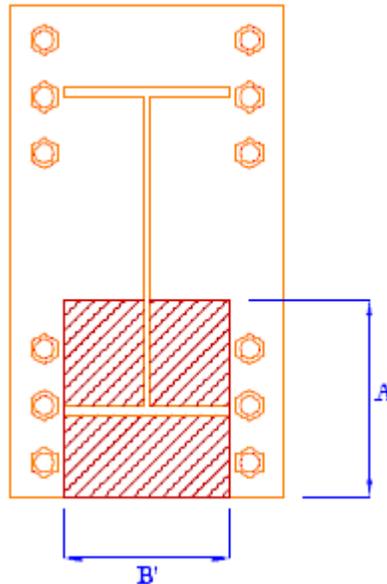
$$\frac{M_{\max}}{\phi_b \cdot M_n} = 0.993 \quad \text{OK}$$

### *Por compresión de probeta en el extremo*

Momento máximo en placa:

$$M_{\max} := \frac{0.877}{0.0535} \frac{\text{tonf} \cdot \text{m}}{\text{m}} = 16.393 \text{tonf}$$

$$\frac{M_{\max}}{\phi_b \cdot M_n} = 0.952 \quad \text{OK}$$



### Distancias mínimas

Ancho de soldadura filete:  $a_e := 18\text{mm}$

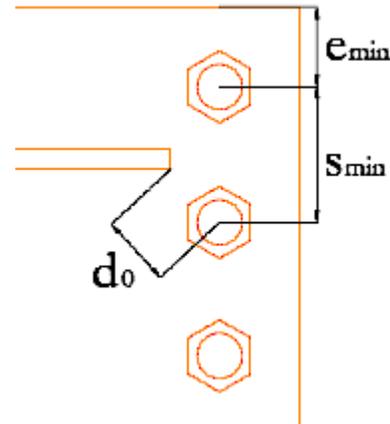
Distancia mínima desde filete al eje del perno:

$$C_3 := 1 \frac{3}{8} \cdot \text{in} = 34.925\text{mm}$$

Distancia mínima para  $d_0$ :  $d_0 := a_e + C_3 = 52.925\text{mm}$

Separación entre pernos:  $s_{\min} := 105\text{mm}$

Distancia al borde:  $e_{\min} := 62\text{mm}$



## Diseño de Sistema de Confinamiento para probeta en eje Este - Oeste

### Cálculo de pernos para el confinamiento de probeta

Fuerza total de confinamiento en una cara:

Ancho de probeta  $h := 40\text{cm}$

Área que confinan los pernos más solicitado

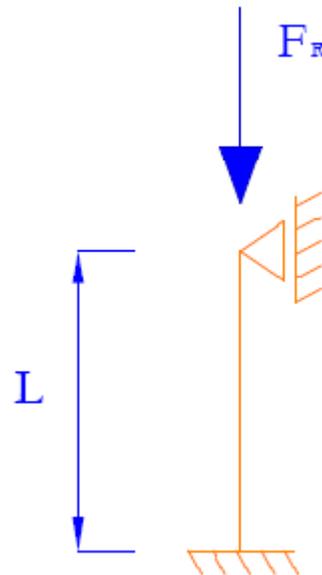
$$AA := 40\text{cm} \cdot A \cdot 0.5 = 729.688\text{cm}^2$$

Fuerza total en dicha área

$$P_{\text{tot}} := AA \cdot 10\% \cdot f_p = 28.73\text{ tonf}$$

Número de pernos en una cara:  $n := 2$

$$P_u := \frac{P_{\text{tot}}}{n} = 14.365\text{ tonf}$$



Pernos A325:

$$\text{Límite elástico: } F_{y.A325} := 81000 \frac{\text{lbf}}{\text{in}^2} = 6.278 \frac{\text{tonf}}{\text{cm}^2}$$

$$\text{Diámetro nominal: } D := \frac{7}{8} \cdot \text{in} = 22.225 \text{ mm}$$

$$\text{Diámetro mínimo (en zona de hilo): } D_k := 0.739 \text{ in} = 18.771 \text{ mm}$$

$$K := 0.8 \quad L := 70 \text{ mm} \quad r_y := \frac{D_k}{2} = 9.385 \text{ mm} \quad A_g := 0.462 \text{ in}^2 = 2.981 \text{ cm}^2$$

$$F_e := \frac{\pi^2 \cdot E}{\left(\frac{K \cdot L}{r_y}\right)^2} = 582.156 \frac{\text{tonf}}{\text{cm}^2}$$

$$F_{cr} := \begin{cases} \left[ \left( \frac{F_{y.A325}}{F_e} \right) \cdot F_{y.A325} \right] & \text{if } F_e \geq 0.44 F_{y.A325} \\ 0.877 F_e & \text{otherwise} \end{cases} = 6.249 \frac{\text{tonf}}{\text{cm}^2}$$

$$P_n := \begin{cases} (F_{y.A325} \cdot A_g) & \text{if } \frac{K \cdot L}{r_y} \leq 25 \\ F_{cr} \cdot A_g & \text{otherwise} \end{cases} = 18.711 \text{ tonf}$$

$$\text{Capacidad de perno: } \phi_c := 0.9 \quad \phi_c \cdot P_n = 16.84 \text{ tonf}$$

$$FU_c := \frac{P_u}{\phi_c \cdot P_n} = 0.853 \quad \text{OK}$$

## Extensiones de actuadores laterales

### Solicitaciones

Existen tres casos críticos:

- Rotación es máxima, y fuerza de actuador es máxima en compresión.
- Rotación es máxima, y fuerza de actuador es máxima en tracción.
- Rotación nula, y fuerza máxima en compresión.

$$P_{ahl} := 40 \text{ tonf} \quad P_u := 1.6P_{ahl} = 64 \text{ tonf}$$

$$\text{Longitud de actuador:} \quad L_{a_{\min}} := 40 \text{ cm} + 30 \text{ cm} + 20 \text{ cm} = 90 \text{ cm}$$

$$L_{a_{\max}} := L_{a_{\min}} + 30 \text{ cm} = 120 \text{ cm}$$

$$\text{Longitud de la extensión:} \quad L_{ex} := 3.5 \text{ m} - L_{a_{\min}} - 2 \cdot 75 \text{ cm} = 110 \text{ cm}$$

#### Caso a) Compresión

Ángulo de acción de la carga:

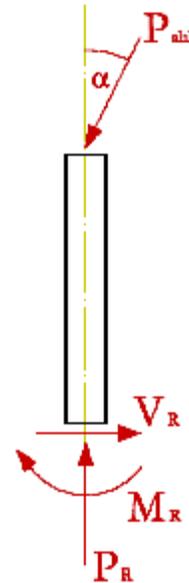
$$\alpha_a := 4.326 \text{ deg}$$

Por equilibrio de fuerzas:

$$P_{Ra} := P_u \cdot \cos(\alpha_a) = 63.818 \text{ tonf}$$

$$M_{Ra} := P_u \cdot \sin(\alpha_a) \cdot L_{ex} = 5.31 \text{ tonf} \cdot \text{m}$$

$$V_{Ra} := P_u \cdot \sin(\alpha_a) = 4.828 \text{ tonf}$$



#### Caso b) Tracción

$$\alpha_b := 6.593 \text{ deg}$$

$$P_{Rb} := P_u \cdot \cos(\alpha_b) = 63.577 \text{ tonf}$$

$$M_{Rb} := P_u \cdot \sin(\alpha_b) \cdot L_{ex} = 8.083 \text{ tonf} \cdot \text{m}$$

$$V_{Rb} := P_u \cdot \sin(\alpha_b) = 7.348 \text{ tonf}$$

**Caso c)** Compresión pura

$$P_{Rc} := P_u = 64 \text{ tonf}$$

**Cálculo**

$$\text{Acero A36} \quad E := 2100 \frac{\text{tonf}}{\text{cm}^2} \quad F_y := 2.53 \frac{\text{tonf}}{\text{cm}^2}$$

Geometría de sección Transversal: IN25X43,4

$$t_f := 14 \text{ mm} \quad b_f := 150 \text{ mm} \quad d := 250 \text{ mm} \quad t_w := 6 \text{ mm} \quad s_{\min} := 6 \text{ mm}$$

**Límites de esbeltez**

$$k_c := \frac{4}{\sqrt{\frac{h}{t_w}}} = 0.641 \quad F_L := 0.7 \cdot F_y \quad \lambda_f := \frac{b_f}{2t_f} = 5.357 \quad \lambda_w := \frac{h}{t_w} = 39$$

$$\text{Compacidad\_Ala} := \begin{cases} \text{"Ala Compacta"} & \text{if } \lambda_f \leq 0.38 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = \text{"Ala Compacta"} \\ \text{"Ala Esbelta"} & \text{if } \lambda_f > 0.95 \sqrt{\frac{k_c \cdot E}{F_L}} \\ \text{"Ala No Compacta"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Compacidad\_Alma} := \begin{cases} \text{"Alma Compacta"} & \text{if } \lambda_w \leq 3.76 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = \text{"Alma Compacta"} \\ \text{"Alma Esbelta"} & \text{if } \lambda_w > 5.70 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \\ \text{"Alma No Compacta"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

**FLEXIÓN*****L<sub>p</sub> y L<sub>r</sub>***

$$L_b := 2L_{ex} = 2.2\text{m}$$

$$L_p := 1.76\alpha_y \cdot \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad L_p = 1.914\text{m} < L_b = 2.2\text{m}$$

$$r_{ts} := \sqrt{\frac{\sqrt{I_y \cdot C_w}}{S_x}} = 4.242\text{cm}$$

Doble simetría en doble T  $c := 1$

$$h_0 := d - t_f = 23.6\text{cm}$$

$$L_T := 1.95r_{ts} \cdot \frac{E}{0.7F_y} \cdot \sqrt{\frac{J \cdot c}{S_x \cdot h_0}} \cdot \sqrt{1 + \sqrt{1 + 6.76 \left( \frac{0.7F_y}{E} \cdot \frac{S_x \cdot h_0}{J \cdot c} \right)^2}} = 7.376\text{m}$$

***Resistencia nominal******Fluencia***

$$M_p := F_y \cdot Z_x \quad M_p = 15.254\text{tonf} \cdot \text{m}$$

***Volcamiento***

$$M(x) := P_{Ra} \cdot (L_{ex} - x) \quad M_{\max} := M(0) = 70.199\text{tonf} \cdot \text{m}$$

$$M_A := M\left(\frac{L_{ex}}{4}\right) = 52.65\text{tonf} \cdot \text{m} \quad M_B := M\left(\frac{L_{ex}}{2}\right) = 35.1\text{tonf} \cdot \text{m}$$

$$M_C := M\left(\frac{3L_{ex}}{4}\right) = 17.55\text{tonf} \cdot \text{m}$$

Doble simetría  $\Rightarrow R_m := 1.0$

$$C_b := \frac{12.5M_{\max}}{2.5M_{\max} + 3M_A + 4M_B + 3M_C} \cdot R_m = 1.667$$

$$L_p = 1.914\text{m} < L_b = 2.2\text{m} < L_r = 7.376\text{m}$$

$$M_{n\_volc} := C_b \cdot \left[ M_p - (M_p - 0.7F_y \cdot S_x) \cdot \left( \frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right) \right] = 24.883 \text{tonf} \cdot \text{m}$$

$$M_n := \min(M_{n\_volc}, M_p) = 15.254 \text{tonf} \cdot \text{m}$$

### COMPRESIÓN

$$K := 2.10 \quad L := L_{ex} = 1.1\text{m}$$

$$F_e := \frac{\pi^2 \cdot E}{\left( \frac{K \cdot L}{r_y} \right)^2} = 5.532 \frac{\text{tonf}}{\text{cm}^2} \quad F_{cr} := \begin{cases} \left[ \left( \frac{F_y}{F_e} \right) \right] \\ \left[ \left( 0.658 \frac{F_e}{F_y} \right) \cdot F_y \right] & \text{if } F_e \geq 0.44F_y \\ 0.87F_e & \text{otherwise} \end{cases} = 2.089 \frac{\text{tonf}}{\text{cm}^2}$$

$$P_n := \begin{cases} (F_y \cdot A_g) & \text{if } \frac{K \cdot L}{r_y} \leq 25 \\ F_{cr} \cdot A_g & \text{otherwise} \end{cases} = 115.577 \text{tonf}$$

### TRACCIÓN

$$T_n := F_y \cdot A_g = 139.96 \text{tonf}$$

## CORTE

$$\frac{h}{t_w} = 39 < 260 \Rightarrow k_v := 5$$

$$C_v := \begin{cases} 1 & \text{if } \frac{h}{t_w} \leq 1.10 \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{F_y}} \\ \frac{1.51 \cdot E \cdot k_v}{F_y \cdot \left(\frac{h}{t_w}\right)^2} & \text{if } \frac{h}{t_w} > 1.37 \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{F_y}} \\ \frac{1.10 \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{F_y}}}{\frac{h}{t_w}} & \text{otherwise} \end{cases} \quad C_v = 1$$

$$A_w := d \cdot t_w = 15 \cdot \text{cm}^2$$

$$V_n := 0.6 F_y \cdot A_w \cdot C_v = 22.77 \text{ tonf}$$

## Chequeo

$$\text{LRFD: } \phi_b := 0.9 \quad \phi_v := 0.9 \quad \phi_c := 0.9 \quad \phi_t := 0.9$$

**Para caso a)**

$$M_u := M_{Ra} = 5.31 \text{ tonf} \cdot \text{m} \quad P_u := P_{Ra} = 63.818 \text{ tonf} \quad V_u := V_{Ra} = 4.828 \text{ tonf}$$

$$\text{Momento: } F_{U_m} := \frac{M_u}{\phi_b \cdot M_n} = 0.387 < 1.0 \quad \text{OK}$$

$$\text{Tracción: } F_{U_c} := \frac{P_u}{\phi_c \cdot P_n} = 0.614 < 1.0 \quad \text{OK}$$

$$\text{Corte: } F_{U_v} := \frac{V_u}{\phi_v \cdot V_n} = 0.236 < 1.0 \quad \text{OK}$$

## Interacción momento-compresión

$$FU_{mc} := \frac{P_u}{\phi_c \cdot P_n} + \left( \frac{M_u}{\phi_b \cdot M_n} \right)^2 = 0.763 < 1.0 \quad \text{OK}$$

**Para caso b)**

$$M_u := M_{Rb} = 8.083 \text{ tonf} \cdot \text{m} \quad T_u := P_{Rb} = 63.577 \text{ tonf} \quad V_u := V_{Rb} = 7.348 \text{ tonf}$$

$$\text{Momento:} \quad FU_m := \frac{M_u}{\phi_b \cdot M_n} = 0.589 < 1.0 \quad \text{OK}$$

$$\text{Tracción:} \quad FU_t := \frac{T_u}{\phi_t \cdot T_n} = 0.505 < 1.0 \quad \text{OK}$$

$$\text{Corte:} \quad FU_v := \frac{V_u}{\phi_v \cdot V_n} = 0.359 < 1.0 \quad \text{OK}$$

## Interacción momento-tracción

$$FU_{mt} := \begin{cases} \frac{T_u}{\phi_t \cdot T_n} + \frac{8}{9} \cdot \left( \frac{M_u}{\phi_b \cdot M_n} \right) & \text{if } \frac{T_u}{\phi_t \cdot T_n} \geq 0.2 \\ \left( \frac{T_u}{2\phi_t \cdot T_n} + \frac{M_u}{\phi_b \cdot M_n} \right) & \text{if } \frac{T_u}{\phi_t \cdot T_n} < 0.2 \end{cases} = 1.028 < 1.05 \quad \text{OK}$$

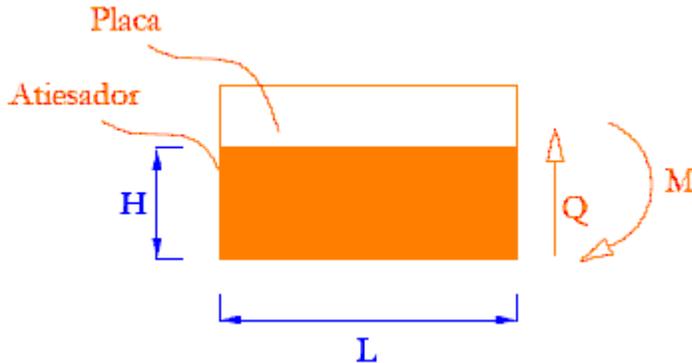
**Para caso c)**

$$T_u := P_{Rc} \quad T_u = 64 \text{ tonf}$$

$$FU_t := \frac{T_u}{\phi_t \cdot T_n} = 0.508 < 1.0 \quad \text{OK}$$

### Cálculo de atiesadores para sistema de confinamiento

Mediante el programa SAP2000 se han obtenido los siguientes esfuerzos en el atiesador más solicitado.



$$M = 0.505 \text{ tonf} \cdot \text{m}$$

$$Q := 15.675 \text{ tonf}$$

$$H := 53.5 \text{ mm}$$

$$L := 98.1 \text{ mm}$$

$$t := 30 \text{ mm}$$

$$E = 2.1 \times 10^3 \cdot \frac{\text{tonf}}{\text{cm}^2} \quad F_y = 2.53 \cdot \frac{\text{tonf}}{\text{cm}^2}$$

#### Verificación en el área gruesa del atiesador

$$L_b := 2 \cdot L = 196.2 \text{ mm}$$

$$d := H = 53.5 \text{ mm}$$

$$\text{Fluencia.} \quad \frac{L_b \cdot d}{t^2} = 11.663 < \frac{0.08 E}{F_y} = 66.403$$

$$M_n := F_y \cdot \frac{t \cdot d^2}{4} = 0.543 \text{ tonf} \cdot \text{m}$$

$$\text{LRFD:} \quad \phi := 0.9 \quad \text{FU} := \frac{M}{\phi \cdot M_n} = 1.033 < 1.05 \quad \text{OK}$$

### Verificación soldadura en corte

Se conecta mediante electrodo ER-70S-6 (INDURA 70 S-6). Con soldadura tipo filete de penetración parcial.

Solicitud:  $Q = 15.675 \text{ tonf}$

Resistencia soldadura  
INDURA 70S-6:  $f_{y.w} := 400 \text{ MPa} = 4.496 \frac{\text{tonf}}{\text{cm}^2}$

$$f_{u.w} := 480 \text{ MPa} = 5.395 \frac{\text{tonf}}{\text{cm}^2} \quad F_w := 0.6 \cdot f_{u.w} = 3.237 \frac{\text{tonf}}{\text{cm}^2}$$

Espesor mínimo de soldadura según AISC 2005:  $a_{emin} := 8 \text{ mm}$

Espesor de soldadura:  $a_e := 9 \text{ mm}$

Garganta de soldadura:  $t_e := \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot a_e$   $t_e = 6.364 \text{ mm}$

Largo de soldadura:  $l_w := 2 \cdot H$   $l_w = 107 \text{ mm}$

Área de soldadura:  $A_w := t_e \cdot l_w$   $A_w = 6.809 \text{ cm}^2$

Resistencia nominal de soldadura:  $R_w := A_w \cdot F_w = 22.044 \text{ tonf}$

LRFD:  $\phi := 0.75$   $\frac{Q}{\phi \cdot R_w} = 0.948 < 1.0$  OK

### Verificación soldadura en tracción

Espesor de soldadura:  $a_e := 8 \text{ mm}$

Garganta de soldadura:  $t_e := \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot a_e$   $t_e = 5.657 \text{ mm}$

Largo de soldadura:  $l_w := 2 \cdot L$   $l_w = 196.2 \text{ mm}$

Área de soldadura:  $A_w := t_e \cdot l_w$   $A_w = 11.099 \text{ cm}^2$

Resistencia nominal de soldadura:  $R_w := A_w \cdot F_w = 35.929 \text{ tonf}$

LRFD:  $\phi := 0.8$   $\frac{Q}{\phi \cdot R_w} = 0.545 < 1.0$  OK

## B.2. CONEXIONES

### Conexión Viga horizontal - Placa

Se conecta el perfil IN60x152,0 a la placa de 55mm de espesor mediante electrodo ER-70S-6 (INDURA 70 S-6). Con soldadura tipo filete de penetración parcial.

*Solicitud en conexión:*

Corte.  $Q := 1.640 \text{ tonf} = 64 \cdot \text{tonf}$

Fuerza axial en alas. 
$$P_{\text{sold}} := \frac{M_0}{2 \cdot \left( \frac{d}{2} - \frac{t_f}{2} \right)} = 208.696 \text{ tonf}$$

*Propiedades de materiales y requerimientos.*

Metal base A36:  $F_y := 2.53 \frac{\text{tonf}}{\text{cm}^2}$        $F_u := 4.06 \frac{\text{tonf}}{\text{cm}^2}$

Resistencia soldadura  
INDURA 70S-6:  $f_{y.w} := 400 \text{ MPa} = 4.496 \frac{\text{tonf}}{\text{cm}^2}$

$f_{u.w} := 480 \text{ MPa} = 5.395 \frac{\text{tonf}}{\text{cm}^2}$        $F_w := 0.6 f_{u.w} = 3.237 \frac{\text{tonf}}{\text{cm}^2}$

Espesor mínimo y máximo de soldadura según AISC 2005

Ala:  $t_f = 25 \text{ mm} \Rightarrow a_{\text{emin.ala}} := 8 \text{ mm} \quad ; \quad a_{\text{emax.ala}} := t_f - 2 \text{ mm} = 23 \text{ mm}$

Alma:  $t_w = 8 \text{ mm} \Rightarrow a_{\text{emin.alma}} := 5 \text{ mm} \quad ; \quad a_{\text{emax.alma}} := t_w - 2 \text{ mm} = 6 \text{ mm}$

*Soldadura de alas y placa*

Garganta de soldadura:  $a_{\text{e.ala}} := 18 \text{ mm} \Rightarrow t_{\text{e.ala}} := 0.707 a_{\text{e.ala}} = 12.726 \text{ mm}$

Largo de soldadura en ala:  $l_{w.ala} := 2 \cdot b_f - t_w + 2 \cdot t_f = 642 \text{ mm}$

Área de soldadura:  $A_w := t_{\text{e.ala}} \cdot l_{w.ala} = 81.701 \text{ cm}^2$

En metal base:  $A_{\text{mb}} := 25 \text{ mm} b_f + (d - 2 \cdot t_f) \cdot t_w \cdot 0.5 = 97 \cdot \text{cm}^2$

Resistencia nominal de soldadura:  $R_w := A_w \cdot F_w = 264.486 \text{ tonf}$

Resistencia nominal metal base:  $R_{mb} := A_{mb} \cdot F_y = 245.41 \text{ tonf}$

Resistencia de diseño:  $\phi_w := 0.8 \quad \phi_{mb} := 0.9$

$$\phi R_n := \min(\phi_w \cdot R_w, \phi_{mb} \cdot R_{mb}) = 211.589 \text{ tonf}$$

$$\frac{P_{\text{sold}}}{\phi R_n} = 0.986 \quad \text{OK}$$

### Soldadura de alma y placa

El corte lo toma el alma:  $a_{e.\text{alma}} := 5 \text{ mm} \Rightarrow t_{e.\text{alma}} := 0.707 a_{e.\text{alma}} = 3.535 \text{ mm}$

Largo de soldadura alma:  $l_{w.\text{alma}} := 2(d - 2t_f) = 1.1 \times 10^3 \cdot \text{mm}$

Área de soldadura:  $A_w := t_{e.\text{alma}} \cdot l_{w.\text{alma}} = 38.885 \text{ cm}^2$

En metal base:  $l_{mb} := \frac{l_{w.\text{alma}}}{2} = 550 \text{ mm} \quad e_{\min} := 8 \text{ mm} \quad A_{mb} := l_{mb} \cdot e_{\min} = 44 \text{ cm}^2$

Resistencia nominal de soldadura:  $R_w := A_w \cdot F_w = 125.88 \text{ tonf}$

Resistencia nominal metal base: (a)  $\phi R_{n.a} := 1.0 \cdot 0.60 F_y \cdot A_{mb} = 66.792 \text{ tonf}$

(b)  $\phi R_{n.b} := 0.75 \cdot 0.6 F_u \cdot A_{mb} = 80.388 \text{ tonf}$

$$\Rightarrow \phi R_{mb} := \min(\phi R_{n.a}, \phi R_{n.b}) = 66.792 \text{ tonf}$$

Resistencia de diseño:  $\phi R_n := \min(\phi_w \cdot R_w, \phi R_{mb}) = 66.792 \text{ tonf}$

$$\frac{Q}{\phi R_n} = 0.958 \quad \text{OK}$$

## Conexión Actuador - Viga horizontal

Tracción  $T := 1.640 \text{ tonf} = 64 \text{ tonf}$

Pernos **A325**  $n := 4$   $d_p := \frac{7}{8} \cdot \text{in} = 22.225 \text{ mm}$   $A_b := \frac{\pi \cdot d_p^2}{4} = 3.879 \text{ cm}^2$

$$f_t := \frac{T}{n \cdot A_b} = 366.913 \text{ MPa}$$

$$\frac{f_t}{\phi \cdot F_{nt}} = 0.789 < 1 \quad \text{OK}$$

*Distancia mínima a los bordes*

$$D_{\min} := 1 \frac{1}{8} \cdot \text{in} = 28.575 \text{ mm}$$

*Pretensión*

$$T_0 := 19 \text{ kip} = 9.5 \text{ tonf}$$

## Diseño de conexión extensión actuador - viga horizontal

### *Solicitaciones en conexión*

Existen dos casos críticos:

- a) Rotación es máxima, y fuerza de actuador es máxima en tracción.
- b) Rotación nula, y fuerza máxima en tracción.

$$P_{ahl} := 40 \text{ tonf} \quad P_u := 1.6P_{ahl} = 64 \text{ tonf}$$

$$\text{Longitud de actuador:} \quad L_{a_{\min}} := 40 \text{ cm} + 30 \text{ cm} + 20 \text{ cm} = 90 \text{ cm}$$

$$L_{a_{\max}} := L_{a_{\min}} + 30 \text{ cm} = 120 \text{ cm}$$

$$\text{Longitud de la extensión:} \quad L_{ex} := 3.5 \text{ m} - L_{a_{\min}} - 2.75 \text{ cm} = 110 \text{ cm}$$

#### **Caso a)** Tracción y momento

$$\alpha_a := 6.593 \text{ deg}$$

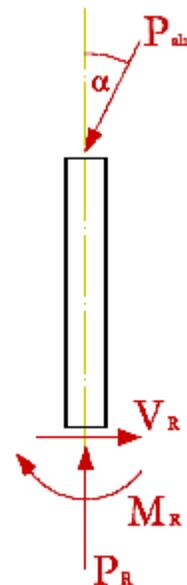
$$P_{Ra} := P_u \cdot \cos(\alpha_a) = 63.577 \text{ tonf}$$

$$M_{Ra} := P_u \cdot \sin(\alpha_a) \cdot L_{ex} = 8.083 \text{ tonf} \cdot \text{m}$$

$$V_{Ra} := P_u \cdot \sin(\alpha_a) = 7.348 \text{ tonf}$$

#### **Caso b)** Tracción pura

$$P_{Rb} := P_u = 64 \text{ tonf}$$



### *Dimensiones mínimas para pernos de 1/2:*

Tamaño de agujero:  $D_{\text{agujero}} := \frac{9}{16} \cdot \text{in} = 14.287 \text{ mm}$

Distancia mínima al borde:  $d_{\text{borde}} := \frac{7}{8} \cdot \text{in} = 22.225 \text{ mm}$

Distancia mínima entre pernos:  $d_{\text{ep}} := \frac{3}{2} \cdot \text{in} = 38.1 \text{ mm}$

Distancia mínima a soldadura:  $d_{\text{sold}} := \frac{11}{16} \cdot \text{in} = 17.462 \text{ mm}$

### *Diseño de Pernos*

Esfuerzos en pernos traccionados para el caso a)

Pernos A325, resistencia nominal:  $F_{\text{nt}} := 620 \text{ MPa}$   $F_{\text{nv}} := 330 \text{ MPa}$

Área bruta de pernos:  $d := \frac{1}{2} \cdot \text{in}$   $A_{\text{b}} := \frac{d^2 \cdot \pi}{4}$   $A_{\text{b}} = 1.267 \cdot \text{cm}^2$

Número de pernos en conexión:  $n := 4$

LRFD:  $\phi := 0.75$

Capacidad de perno en tensión:  $R_{\text{nt}} := F_{\text{nt}} \cdot A_{\text{b}} = 8.828 \text{ tonf}$

Válido para caso b)  $FU_{\text{b}} := \frac{P_{\text{Rb}}}{\phi \cdot n \cdot R_{\text{nt}}}$   $FU_{\text{b}} = 2.416$  OK

Capacidad de perno en corte:  $R_{\text{nv}} := F_{\text{nv}} \cdot A_{\text{b}} = 4.699 \text{ tonf}$

Capacidad de perno en acción combinada de tracción y corte en conexión de momento (válido para caso a)):

$$f_v := \frac{V_{Ra}}{n \cdot A_b} \quad f_v = 129.015 \text{ MPa}$$

$$F'_{nt} := \begin{cases} \left( 1.3 \cdot F_{nt} - \frac{F_{nt}}{\phi \cdot F_{nv}} \cdot f_v \right) & \text{if } 1.3 \cdot F_{nt} - \frac{F_{nt}}{\phi \cdot F_{nv}} \cdot f_v \leq F_{nt} \\ F_{nt} & \text{otherwise} \end{cases} \quad F'_{nt} = 482.811 \text{ MPa}$$

$$R_n := F'_{nt} \cdot A_b \quad R_n = 6.875 \text{ tonf}$$

$$FU_a := \frac{P_{Ra}}{\phi \cdot R_n} \quad FU_b = 2.416$$

### Diseño de placa

Acero ASTM A36

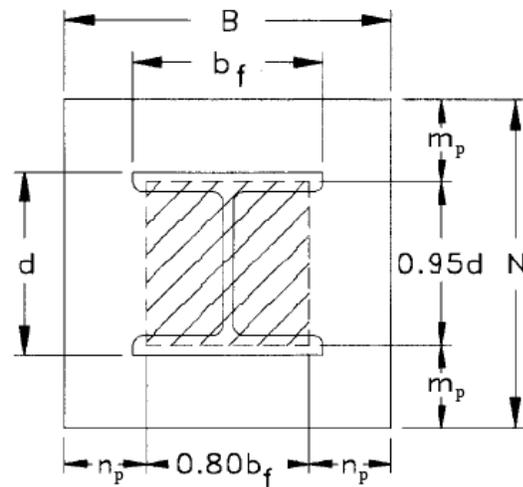
$$F_y := 2.53 \frac{\text{tonf}}{\text{cm}^2}$$

$$\text{Capacidad de perno: } R_{nt} = 8.828 \text{ tonf}$$

Ancho crítico:

$$B_{cr} := 53.7 \text{ mm}$$

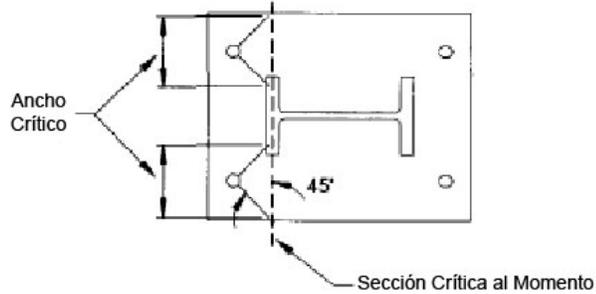
$$m_p := 51.52 \text{ mm}$$



$$M_{plu} := \frac{2 \cdot R_{nt} \cdot (m_p - 22.225 \text{ mm})}{2 \cdot B_{cr}}$$

$$t_p := \sqrt{\frac{4 \cdot M_{plu}}{0.9 \cdot F_y}}$$

$$t_p = 29.084 \text{ mm}$$



### Soldadura perfil IN25X43,4 - Placa

Se conecta mediante electrodo ER-70S-6 (INDURA 70 S-6). Con soldadura tipo filete de penetración parcial.

Dimensiones del perfil:

$$t_f := 14 \text{ mm} \quad b_f := 150 \text{ mm} \quad d := 250 \text{ mm} \quad t_w := 6 \text{ mm} \quad s_{\min} := 6 \text{ mm}$$

### Solicitud en conexión:

Corte.  $Q := V_{Ra} = 7.348 \text{ tonf}$

Fuerza axial en alas debido a momento y la tracción en el perfil:  $P_{\text{sold}} := 53.53 \text{ tonf}$

### Propiedades de materiales y requerimientos.

Metal base A36:  $F_y := 2.53 \frac{\text{tonf}}{\text{cm}^2}$   $F_u := 4.06 \frac{\text{tonf}}{\text{cm}^2}$

Resistencia soldadura INDURA 70S-6:  $f_{y,w} := 400 \text{ MPa} = 4.496 \frac{\text{tonf}}{\text{cm}^2}$

$$f_{u,w} := 480 \text{ MPa} = 5.395 \frac{\text{tonf}}{\text{cm}^2} \quad F_w := 0.6 \cdot f_{u,w} = 3.237 \frac{\text{tonf}}{\text{cm}^2}$$

Espesor mínimo y máximo de soldadura según AISC 2005

Ala:  $t_f = 14 \text{ mm} \Rightarrow a_{\text{emin.ala}} := 6 \text{ mm} ; a_{\text{emax.ala}} := t_f - 2 \text{ mm} = 12 \text{ mm}$

Alma:  $t_w = 6 \text{ mm} \Rightarrow a_{\text{emin.alma}} := 5 \text{ mm} ; a_{\text{emax.alma}} := t_w = 6 \text{ mm}$

### ***Soldadura entre ala traccionada y placa***

Garganta de soldadura:  $a_{e.ala} := 9\text{mm} \quad \Rightarrow \quad t_{e.ala} := 0.707 \cdot a_{e.ala} = 6.363\text{mm}$

Largo de soldadura en ala:  $l_{w.ala} := 2 \cdot b_f - t_w + 2 \cdot t_f = 322\text{mm}$

Área de soldadura:  $A_w := t_{e.ala} \cdot l_{w.ala} = 20.489\text{cm}^2$

En metal base:  $A_{mb} := 25\text{mm} \cdot b_f + (d - 2 \cdot t_f) \cdot t_w \cdot 0.5 = 44.16\text{cm}^2$

Resistencia nominal de soldadura:  $R_w := A_w \cdot F_w = 66.328\text{tonf}$

Resistencia nominal metal base:  $R_{mb} := A_{mb} \cdot F_y = 111.725\text{tonf}$

Resistencia de diseño:  $\phi_w := 0.8 \quad \phi_{mb} := 0.9$

$$\phi R_n := \min(\phi_w \cdot R_w, \phi_{mb} \cdot R_{mb}) = 53.062\text{tonf}$$

$$\frac{P_{\text{sold}}}{\phi R_n} = 1.009 \quad \text{OK}$$

### Soldadura de alma y placa

El corte lo toma el alma:  $a_{e.alma} := 5\text{mm} \Rightarrow t_{e.alma} := 0.707 \cdot a_{e.alma} = 3.535\text{mm}$

Largo de soldadura alma:  $l_{w.alma} := 2(d - 2t_f) = 444\text{mm}$

Área de soldadura:  $A_w := t_{e.alma} \cdot l_{w.alma} = 15.695\text{cm}^2$

En metal base:  $l_{mb} := \frac{l_{w.alma}}{2} = 222\text{mm}$        $e_{\min} := 8\text{mm}$        $A_{mb} := l_{mb} \cdot e_{\min} = 17.76\text{cm}^2$

Resistencia nominal de soldadura:  $R_w := A_w \cdot F_w = 50.81\text{tonf}$

Resistencia nominal metal base: (a)  $\phi R_{n.a} := 1.0 \cdot 0.60 \cdot F_y \cdot A_{mb} = 26.96\text{tonf}$

(b)  $\phi R_{n.b} := 0.75 \cdot 0.6 \cdot F_u \cdot A_{mb} = 32.448\text{tonf}$

$\Rightarrow \phi R_{mb} := \min(\phi R_{n.a}, \phi R_{n.b}) = 26.96\text{tonf}$

Resistencia de diseño:  $\phi R_n := \min(\phi_w \cdot R_w, \phi R_{mb}) = 26.96\text{tonf}$

$\frac{Q}{\phi R_n} = 0.273$       OK

---

ANEXO C

CÓDIGO DEL SOFTWARE

---

### Parámetros de Canales

**Canales de Entrada**

% Dev1/aio: 11

Input Minimum Value: -10,00

Input Maximum Value: 10,00

**Canales de Salida**

Canal de Salida Actuador A

% Dev1/so0

Canal de Salida Actuador B

% Dev1/so1

Valor de Salida Mínimo: -10,00

Valor de Salida Máximo: 10,00

### Calibración de Instrumentación

$[a + b \cdot x]$

Canal 0	a	b
Canal 1	0	0
Canal 2	0	0
Canal 3	0	0
Canal 4	0	0
Canal 5	0	0
Canal 6	0	0
Canal 7	0	0
Canal 8	0	0
Canal 9	0	0
Canal 10	0	0
Canal 11	0	0

### Parámetros Geométricos

Distancia entre Vigas [m]: 0

Altura extensiones de actuadores laterales [m]: 0

Ancho de probeta en dirección de giro [m]: 0

Nombre de archivo de salida: B test.lvm

DETENER

### Momento Controlado

Ganancia lado A (AC): 1

Ganancia lado B (AC): 1

Aplicar carga:

Ángulo SETPOINT 1 [grados]: 0

Ángulo SETPOINT 2 [grados]: 0

Tiempo para alcanzar ángulo SETPOINT 2 [minutos]: 0

### Tab Control

Fuerza Axial [tonf]: 0

Fuerza Actuador A [tonf]: -40

Posición Actuador A: 0

Fuerza Actuador B [tonf]: -40

Posición Actuador B: 0

### Waveform Graph

Plot 0

### XY Graph

Plot 0

**Parámetros de Canales**

**Canales de Entrada**

Dev1/a0:11  
 Input Minimum Value: -10,00  
 Input Maximum Value: 10,00

**Canales de Salida**

Canal de Salida Actuador A: Dev1/ao0  
 Canal de Salida Actuador B: Dev1/ao1  
 Valor de Salida Mínimo: -10,00  
 Valor de Salida Máximo: 10,00

**Timing Parameters**

Sample Rate: 1000,00  
 Convert Rate: 6-4000,00  
 Convert Rate Setting: Custom  
 Maximum

**Calibración de Instrumentación**

$[ a + b \cdot x ]$

Canal 0: a=0, b=0  
 Canal 1: a=0, b=0  
 Canal 2: a=0, b=0  
 Canal 3: a=0, b=0  
 Canal 4: a=0, b=0  
 Canal 5: a=0, b=0  
 Canal 6: a=0, b=0  
 Canal 7: a=0, b=0  
 Canal 8: a=0, b=0  
 Canal 9: a=0, b=0  
 Canal 10: a=0, b=0  
 Canal 11: a=0, b=0

**Parámetros Geométricos**

Distancia entre Vigas [m]: 0  
 Altura extensiones de actuadores laterales [m]: 0  
 Ancho de probeta en dirección de giro [m]: 0

Nombre de archivo de salida: g\_test.lvm

**DETERENER**

**Ángulo Controlado** Momento Controlado

Ganancia lado A (MC): 1  
 Ganancia lado B (MC): 1

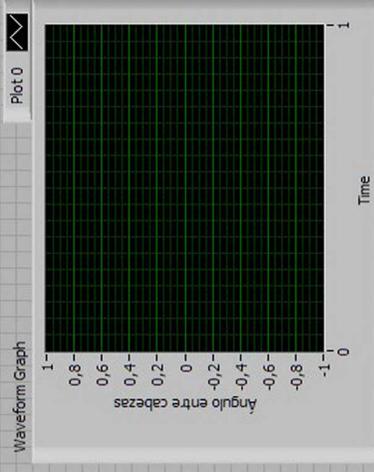
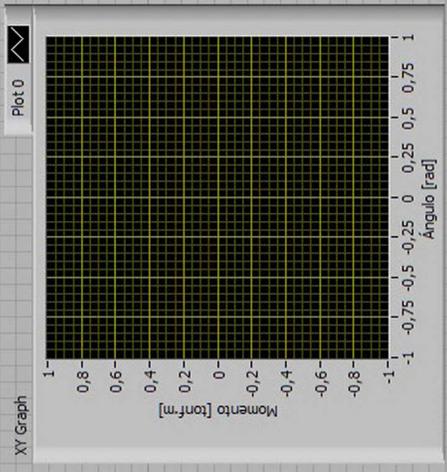
Aplicar Carga

Momento SETPOINT 1 [tonf·m]: 0  
 Momento SETPOINT 2 [tonf·m]: 0  
 Tiempo para alcanzar Momento SETPOINT 2 [min]: 0

Tab Control

Fuerza Axial [tonf]: 0  
 Fuerza Actuador A [tonf]: -40  
 Posición Actuador A: 0

Ángulo [rad]: 0  
 Fuerza Actuador B [tonf]: -40  
 Posición Actuador B: 0



PROYECTO

**Software de Control**

CONTENIDO  
 CONTROL VI

FECHA: JULIO 2008  
 LAMINA N°: 3

Beauchef 850, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile