



**GERDAU**

**CORSA**

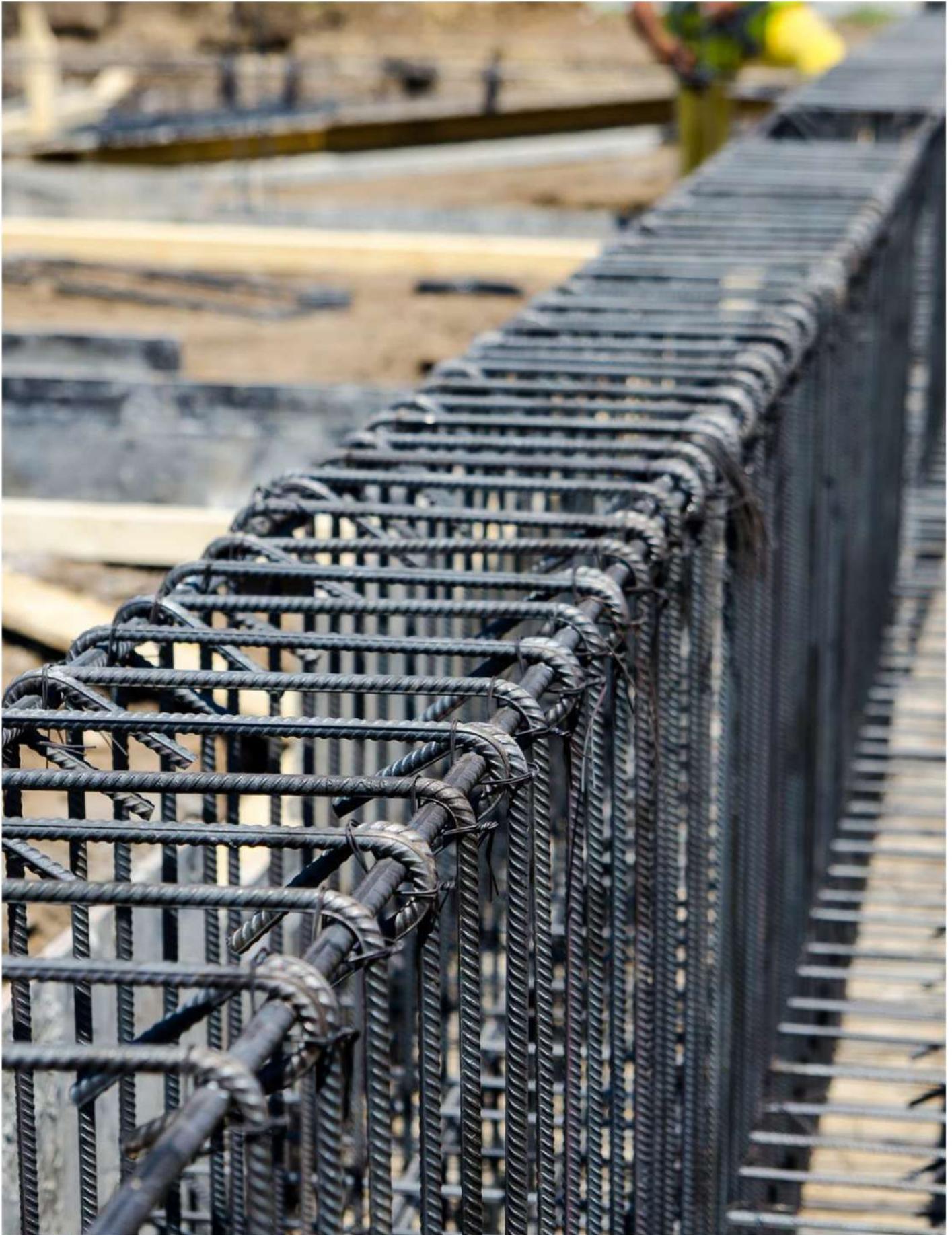
El futuro se moldea

INFORME DEL COMPORTAMIENTO  
DE VIGAS DE CONCRETO  
**CON ACERO DE ALTA RESISTENCIA**

**Dr. Eduardo Arellano**

**Gerdau Corsa. El futuro se moldea.**

[gerdaucorsa.com.mx](http://gerdaucorsa.com.mx)



# CONTENIDO

## 1. Introducción

## 2. Justificación

## 3. Objetivos

## 4. Protocolo de prueba

- 4.1. Historia de desplazamientos.
- 4.2. Espécimen de prueba.
- 4.3. Refuerzo por cortante.
- 4.4. Instrumentación.
- 4.5. Sobrerresistencia.

## 5. Propiedades mecánicas.

- 5.1. Histéresis.
- 5.2. Rigidez.
- 5.3. Energía Histerética.
- 5.4. Amortiguamiento viscoso.
- 5.5. Ductilidad.
- 5.6. Agrietamiento.
- 5.7. Deformación Unitaria.

## 6. Resistencia

- 6.1. Recubrimiento.
- 6.2. Momento resistente.
- 6.3. Ahorro.

## 7. Conclusiones.

## 8. Bibliografía

## Apéndice: Construcción

### ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1: Gráfica esfuerzo vs. deformación unitaria del acero de refuerzo (Gerdau-Corsa)
- Figura 2. Espécimen de prueba.
- Figura 3. Viga sometida a flexión simple.
- Figura 4. Viga sometida a flexión simple.
- Figura 5. Historia de desplazamientos en el centro del claro.
- Figura 6. Nomenclatura de los especímenes.
- Figura 7. Especímenes de prueba.
- Figura 8. Refuerzo por cortante.
- Figura 9. Ubicación de los puntos donde se mide la deformación unitaria.
- Figura 10. Ubicación de los transductores de desplazamiento.
- Figura 11. Ubicación de las cargas.
- Figura 12. Sobrerresistencia.
- Figura 13. Puntos de control.
- Figura 14. Diagrama de histéresis espécimen 1.
- Figura 15. Diagrama de histéresis espécimen 2.
- Figura 16. Diagrama de histéresis espécimen 3.
- Figura 17. Diagrama de histéresis espécimen 4.
- Figura 18. Envolvente de histéresis de los especímenes.
- Figura 19. Rigidez pico a pico.
- Figura 20. Degradación de rigidez.
- Figura 21. Energía histerética.
- Figura 22. Energía histerética disipada por el primer ciclo.
- Figura 23. Energía histerética disipada por el segundo ciclo.
- Figura 24. Energía histerética acumulada.
- Figura 25. Definiciones de energía histerética y de deformación.
- Figura 26. Amortiguamiento viscoso.
- Figura 27. Comportamiento elastoplástico idealizado, (Pan, 1989)
- Figura 28. Agrietamiento del espécimen V01 al final del ensaye.
- Figura 29. Patrón de agrietamiento del espécimen V01.
- Figura 30. Detalle del desconchamiento y pandeo de barras del espécimen V01.

Figura 31. Agrietamiento del espécimen V02 al final del ensaye.

Figura 32. Patrón de agrietamiento del espécimen V02.

Figura 33. Agrietamiento del espécimen V03 al final del ensaye.

Figura 34. Patrón de agrietamiento del espécimen V03.

Figura 35. Agrietamiento del espécimen V04 al final del ensaye.

Figura 36. Patrón de agrietamiento del espécimen V04.

Figura 37. Recubrimiento considerando la corrugación.

(Dimensiones en cm).

Figura A1. Doblado del refuerzo.

Figura A2. Acero longitudinal.

Figura A3. Acero longitudinal.

Figura A4. Pulido de la superficie.

Figura A5. Strain gages colocados.

Figura A6. Cimbra de fibra de vidrio.

Figura A7. Colado y vibrado de especímenes.

Figura A8. Cilindros testigo curados igual que los especímenes.

Figura A9. Viga cuadrículada.

Figura A10. Transductor colocado sobre el acrílico.

Figura A11. Apoyo articulado.

Figura A12. Dispositivo de cargas.

### ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores del desplazamiento objetivo.

Tabla 2. Características de los especímenes de prueba.

Tabla 3. Esfuerzos de fluencia y ruptura.

Tabla 4. Resistencias esperadas y sobrerresistencia

Tabla 5. Ductilidad de los especímenes.

Tabla 6. Deformaciones unitarias máximas [1x10<sup>-6</sup> mm/mm].

Tabla 7. Deformaciones unitarias máximas y esfuerzos asociados.

Tabla 8. Resistencia con valores nominales.

Tabla 9. Resistencia con valores experimentales.

Tabla 10. Resistencia con valores experimentales de ruptura.

### ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Tensión del acero Grado 56.

Ecuación 2. Tensión del acero Grado 42.

Ecuación 3. Igualdad de la tensión.

Ecuación 4. Acero balanceado.

Ecuación 5. Sobrerresistencia.

Ecuación 6. Amortiguamiento viscoso.

Ecuación 7. Ductilidad.

Ecuación 8. Costo del acero Grado 42.

Ecuación 9. Costo del acero Grado 56.

Ecuación 10. Ahorro.

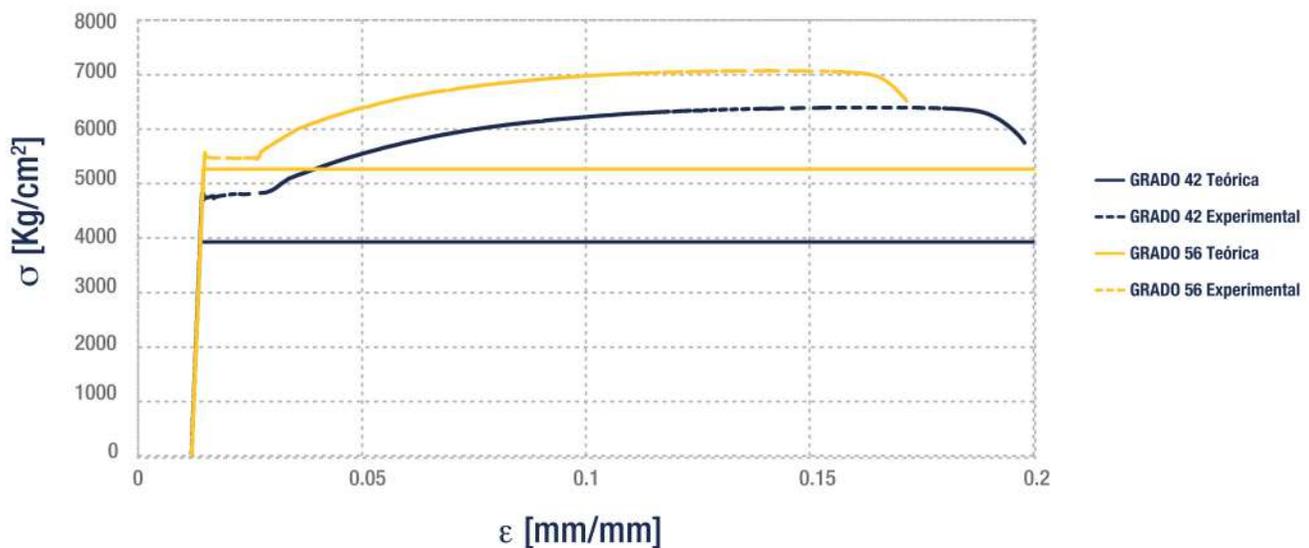
# 1. INTRODUCCIÓN

El uso de materiales de alta resistencia en la construcción de estructuras, permite ahorros en el peso de las estructuras y en general en el volumen de materiales a emplear.

Además de la resistencia, una característica importante de los materiales es la capacidad de deformación. En el pasado, los aceros de alta resistencia, tenían una reducción importante en la capacidad de deformación, sin embargo, con las nuevas tecnologías de fabricación, se puede obtener acero de refuerzo de alta resistencia sin que se reduzca en forma importante la capacidad de deformación.

En la figura 1, se muestran las gráficas esfuerzo vs. deformación unitaria del acero Grado 42 y el acero Grado 56 teóricas y experimentales de la marca Gerdau-Corsa. Cuando se analizan las gráficas teóricas, no hay diferencia en cuanto a la capacidad de deformación, pues se construyen usando un modelo elastoplástico perfecto, es decir, la deformación puede crecer de forma indefinida. Mientras que cuando se analizan las gráficas experimentales, puede observarse que la capacidad de deformación disminuye cuando aumenta la resistencia, pero la disminución no es significativa.

**Gráfica de esfuerzo vs. deformación unitaria del acero de esfuerzo**



Las pruebas experimentales se llevaron a cabo en varillas del #6. Para ese diámetro, la norma NMX-B-457-CANACERO-2013, establece que el porcentaje de alargamiento que deben cumplir es 14% para el Grado 42 y 12% para el Grado 56. En las pruebas que se llevaron a cabo en el Laboratorio de Estructuras de la UAM Azcapotzalco, se midió el porcentaje de alargamiento promedio y en los dos casos, superan el 15%.

Figura 1: Gráfica esfuerzo vs. deformación unitaria del acero de refuerzo (Gerdau-Corsa)



## 2. JUSTIFICACIÓN

Como el acero grado 56, cumple con la norma **NMX-B-457-CANACERO-2013**, puede usarse como acero de refuerzo.

Usar acero de refuerzo Grado 56 tiene varias ventajas estructurales entre las que se encuentran:

- **Uso eficiente de los materiales.**
- **Menor congestionamiento en la sección transversal.**
- **Ahorro de un 25% de acero de refuerzo.**
- **En combinación con concreto de alta resistencia, se tienen secciones más ligeras, lo que reduce las acciones a las que está sometida la estructura.**

Una de las ventajas que motivó este estudio, es que al no tener una reducción importante de la capacidad de deformación, las propiedades mecánicas de un elemento reforzado con 0.75As Grado 56 serán las mismas que un elemento reforzado con As Grado 42. Las propiedades mecánicas que se van a comparar son, la resistencia, la rigidez, la disipación de energía, ductilidad, amortiguamiento y deformación de falla.

## 3. OBJETIVOS

Estudiar el comportamiento de vigas de concreto reforzadas con acero Grado 56 y compararlas con vigas reforzadas con acero Grado 42.

Determinar si puede obtenerse el mismo nivel de seguridad en vigas reforzadas con 0.75As Grado 56 que las reforzadas con As Grado 42.

Comparar la resistencia teórica de vigas reforzadas con aceros Grados 56 y 42 y compararlas con la resistencia obtenida experimentalmente. Comparar también con las propiedades mencionadas en la sección 2.



## 4. PROTOCOLO DE PRUEBA

Para el estudio experimental de las vigas de concreto se estudiaron las características del laboratorio de estructuras de la UAM-Azcapotzalco y se propuso un espécimen de pruebas consistente de una viga de concreto de 4.5 m de largo con una sección transversal de 0.25x0.50 m como la mostrada en la figura 2.



*Figura 2. Especimen de prueba.*

El experimento consiste en someter las vigas a flexión simple, para lograrlo, a las vigas simplemente apoyadas, se les aplican cargas puntuales en los tercios como se muestra en la figura 3. Si se observa el diagrama de momentos de

la figura 3, en el centro del claro, el momento flexionante es constante y con un valor  $M = PL/6$  y como la fuerza cortante es cero, se dice que el segmento está en flexión simple.

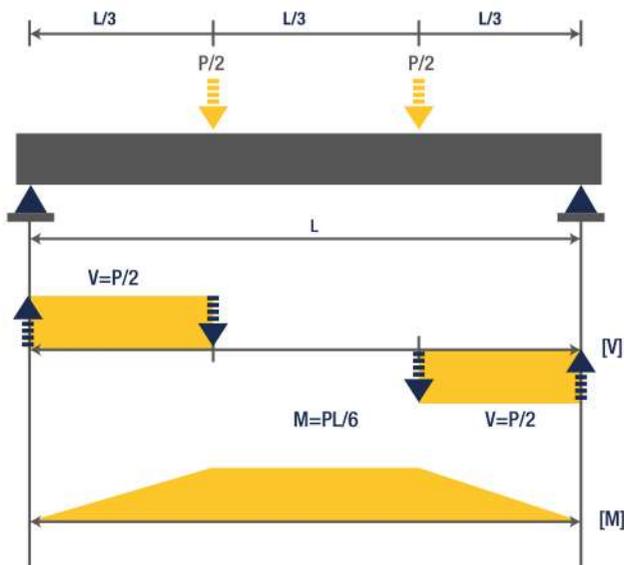


Figura 3. Viga sometida a flexión simple.

El experimento se controla por desplazamientos, para hacerlo, se define como nodo de control al nodo del centro del claro (ver figura 4).



Figura 4. Viga sometida a flexión simple.

### 4.1. HISTORIA DE DESPLAZAMIENTOS

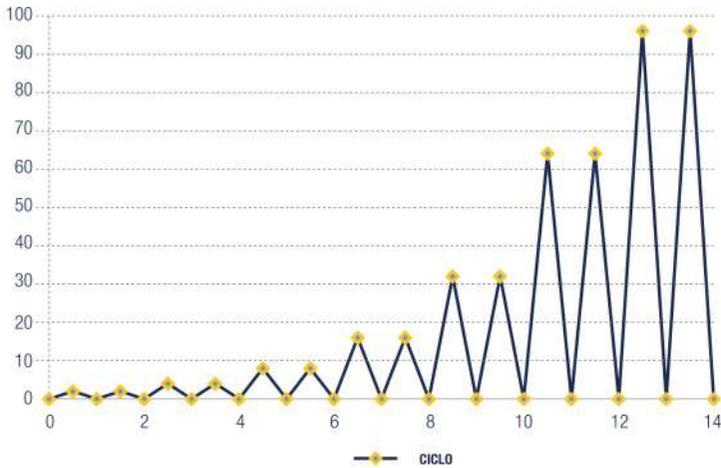
En la tabla 1, se muestran los valores de los desplazamientos objetivo en cada incremento de deflexión del nodo de control. Es importante mencionar que las vigas se diseñaron para resistir momentos positivos (que imponen una concavidad hacia arriba), de manera que los incrementos del desplazamiento se hacen en medios ciclos. La dirección positiva de los desplazamientos, está dirigida hacia abajo.

INCREMENTO	Δ OBJETIVO
1	2
2	4
3	8
4	16
5	32
6	64
7	96

Tabla 1: Valores del desplazamiento objetivo.



## HISTORIA DE DESPLAZAMIENTO



Para cada valor del desplazamiento objetivo, se hacen dos ciclos, el primero y el ciclo de repetición, una representación gráfica de los valores del desplazamiento objetivo se muestra en la figura 5.

Figura 5. Historia de desplazamientos en el centro del claro.

## 4.2. ESPÉCIMEN DE PRUEBA

Se proponen 4 especímenes de prueba con diferentes armados. Como el acero Grado 56 tiene un esfuerzo de fluencia de  $f_y=5600 \text{ kg/cm}^2$  que es  $4/3$  el esfuerzo de fluencia del acero Grado 42  $f_y=4200 \text{ kg/cm}^2$ , la hipótesis que se desea probar es que **“Una viga con 3 varillas de acero Grado 56, tiene la misma resistencia que una viga con 4 varillas Grado 42”**.

Si definimos  $A$  como el área de una varilla,  $f_{y56}$  como el esfuerzo de fluencia del acero Grado 56,  $f_{y42}$  como el esfuerzo de fluencia del acero Grado 42, y recordamos que el esfuerzo de fluencia del acero Grado 56 es  $4/3$  del acero Grado 42, tenemos.

$$T_{56} = 3Af_{y56} = 3A \left[ \left( \frac{4}{3} \right) f_{y42} \right] = 4Af_{y42} \quad \text{Ec. (1)}$$

$$T_{42} = 4Af_{y42} \quad \text{Ec. (2)}$$

$$T_{56} = T_{42} \quad \text{Ec. (3)}$$

Al analizar las ecuaciones 1 a 3, se comprueba que si el acero fluye, la fuerza de tensión de una viga con 3 varillas de acero Grado 56 será la misma que una viga con 4 varillas de acero Grado 42.

Para que el acero fluya, se propone el empleo de secciones subreforzadas, es decir el área de acero suministrada es menor que el área de acero balanceada (ver ec. 4).

$$Asb = \frac{6000\beta_1 f_c''}{6000 + f_y} f_y bd \quad \text{Ec. (4)}$$

donde  $f_c''$  es igual a  $0.85 f_c'$

La nomenclatura de los especímenes de prueba se muestra en la figura 6.

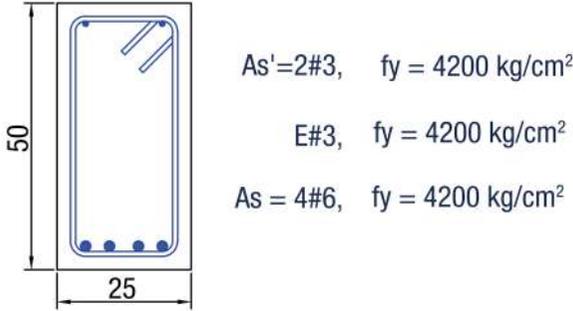


Figura 6. Nomenclatura de los especímenes.

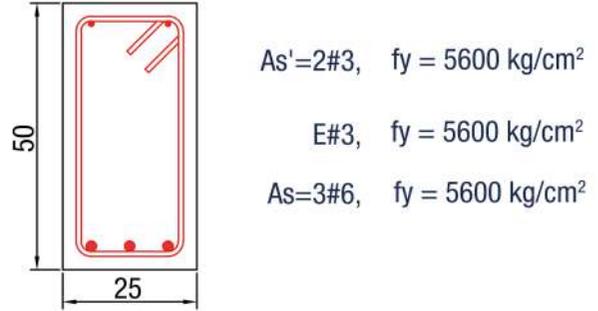
En la tabla 2 se muestran los armados de los 4 especímenes de prueba.

Especímen	Acero longitudinal	Estribos
V01-L4G42-EG42	4 varillas #6, Grado 42	#3 Grado 42
V02-L3G56-EG56	3 varillas #6, Grado 56	#3 Grado 56
V03-L4G56-EG56	4 varillas #6, Grado 56	#3 Grado 56
V04-L3G56-EG42	3 varillas #6, Grado 56	#3 Grado 42

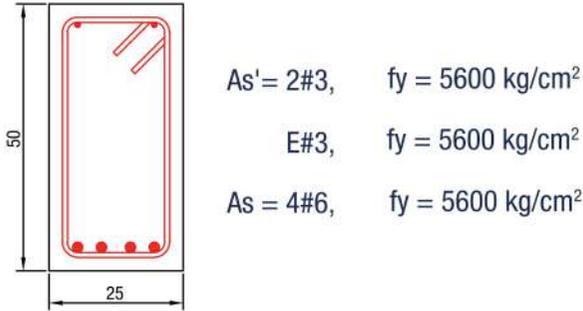
Tabla 2. Características de los especímenes de prueba.



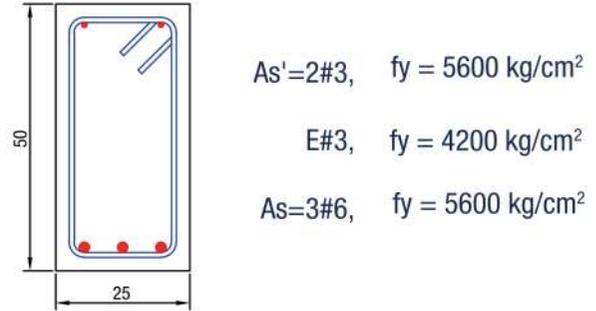
Especímen 1 V01-L4G42-EG42



Especímen 2 V02-L3G56-EG56



Especímen 3 V03-L4G56-EG56



Especímen 4 V04-L4G56-EG42

Figura 7. Especímenes de prueba.

### 4.3 REFUERZO POR CORTANTE

Debido a que el objetivo de la investigación es estudiar la falla por flexión de las vigas de concreto, se diseñaron para evitar la falla prematura por fuerza cortante, es decir se determinó la fuerza cortante máxima con el espécimen V03 que es el espécimen más reforzado por flexión. Tomando en consideración que la NTC-2017 indica que cuando se use acero de refuerzo con  $f_y$  mayor a  $4200 \text{ kg/cm}^2$  como refuerzo por cortante, se use el valor de  $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$  para los cálculos. Todos los especímenes se construyeron con la misma separación del refuerzo cortante (ver figura 8).

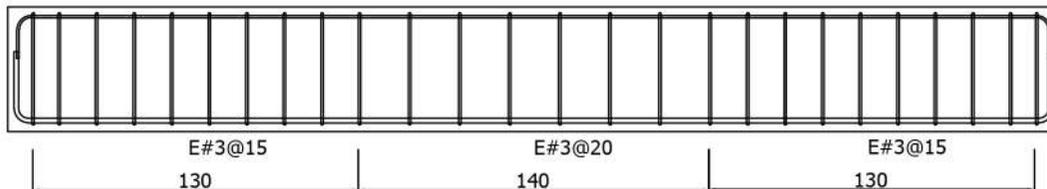


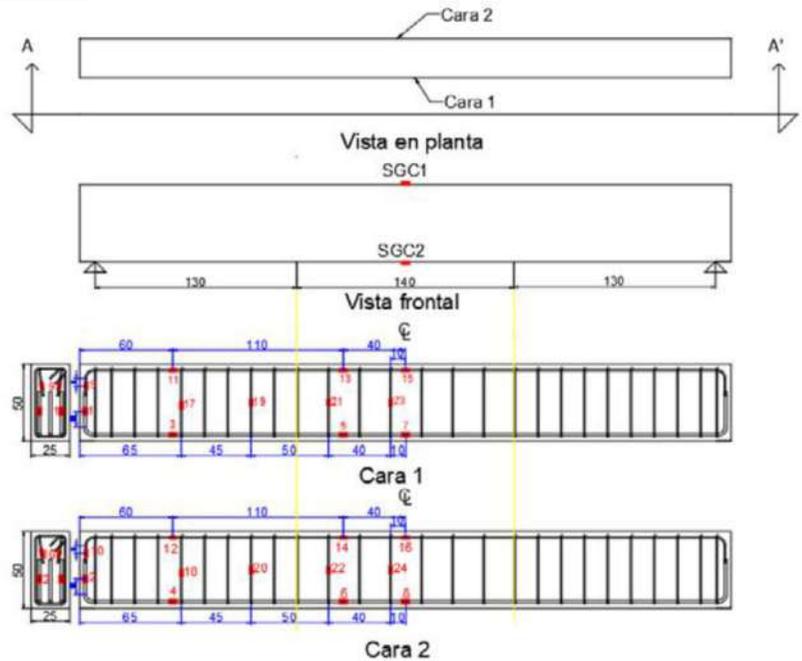
Figura 8. Refuerzo por cortante.



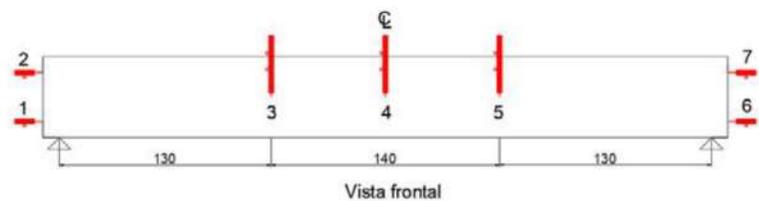
## 4.4. INSTRUMENTACIÓN

Las vigas se instrumentaron con 24 galgas extensométricas (strain gages) en el acero de refuerzo y con 2 en la superficie del concreto. En la figura 9 se muestra una imagen de la ubicación del acero de los strain gages. Se colocaron 16 galgas en el acero longitudinal y 8 en el acero de refuerzo. Solamente se instrumentó la mitad de las vigas debido a la simetría en cargas, geometría y armados. Se usaron los strain gages 5 a 8 para determinar si el acero de refuerzo fluye.

*Figura 9. Ubicación de los puntos donde se mide la deformación unitaria.*

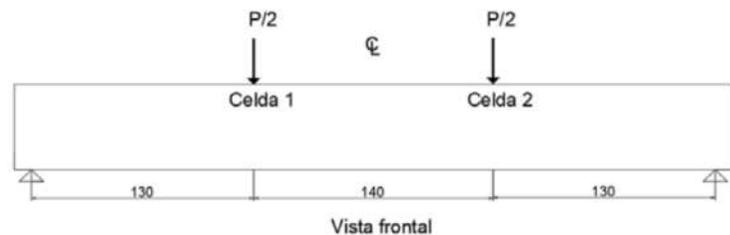


Además de la instrumentación interna se colocó instrumentación externa para medir el desplazamiento en el centro del claro (nodo de control), el desplazamiento en los puntos de aplicación de las cargas y en los extremos de las vigas para medir la rotación de la sección transversal (ver figura 10).



*Figura 10. Ubicación de los transductores de desplazamiento.*

Las cargas se aplicaron mediante dos cilindros de doble acción de 30 toneladas y para determinar el valor de las fuerzas aplicadas, se emplearon dos celdas de carga de 50 toneladas (ver figura 11).



*Figura 11. Ubicación de las cargas.*

## 4.5 RESISTENCIAS ESPERADAS Y SOBRRRESISTENCIA.

La resistencia a la fluencia esperada de una sección transversal puede determinarse a partir de la resistencia a la tensión esperada  $R_y F_y$ , donde  $F_y$  es la resistencia a la tensión mínima especificada por la norma y  $R_y$  es la relación de la fluencia esperada (experimental) entre la resistencia a tensión mínima especificada del material. En la tabla 3, se muestran los valores mínimos de fluencia de acuerdo a las normas vigentes.

	NMX-B-506-CANACERO-2011		NMX-B-457-CANACERO-2013	
	Grado 42	Grado 52	Grado 42	Grado 56
Límite de fluencia mínimo $F_y$ (kg/cm <sup>2</sup> )	4200	5200	4200	5600
Límite de fluencia máximo $F_y$ (kg/cm <sup>2</sup> )	NA	NA	5500	6880
Resistencia a la ruptura mínima $F_u$ (kg/cm <sup>2</sup> )	6300	7200	5600	7030

La resistencia a la ruptura esperada de una sección transversal puede determinarse a partir de la resistencia a la ruptura esperada  $R_u F_u$ , donde  $F_u$  es la resistencia a la ruptura mínima especificada por la norma y  $R_u$  es la relación de la resistencia a la ruptura esperada (experimental) entre la resistencia a la ruptura mínima especificada por la norma para el material. En la tabla 3, se muestran los valores mínimos del esfuerzo de ruptura de acuerdo a las normas vigentes.

Tabla 3. Esfuerzos de fluencia y ruptura.

Se denomina sobrerresistencia a la diferencia que existe entre la resistencia a la ruptura y la resistencia de fluencia calculadas en forma experimental. Una forma de medir la sobrerresistencia es con la ecuación 5.

Para las varillas ensayadas, se observó que los valores de los coeficientes cambian en función de la resistencia del material y también del diámetro como se muestra en la tabla 4. Los valores mostrados en la tabla 4 son los promedios.

$$R_{SR} = \frac{f_{uExperimental}}{f_{yExperimental}} \quad \text{Ec. (5)}$$

	Grado 42			Grado 56		
	Ry	Ru	RSR	Ry	Ru	RSR
Varilla #3	1.24	1.09	1.32	1.08	1.08	1.26
Varilla #6	1.22	1.11	1.36	1.04	1.08	1.31

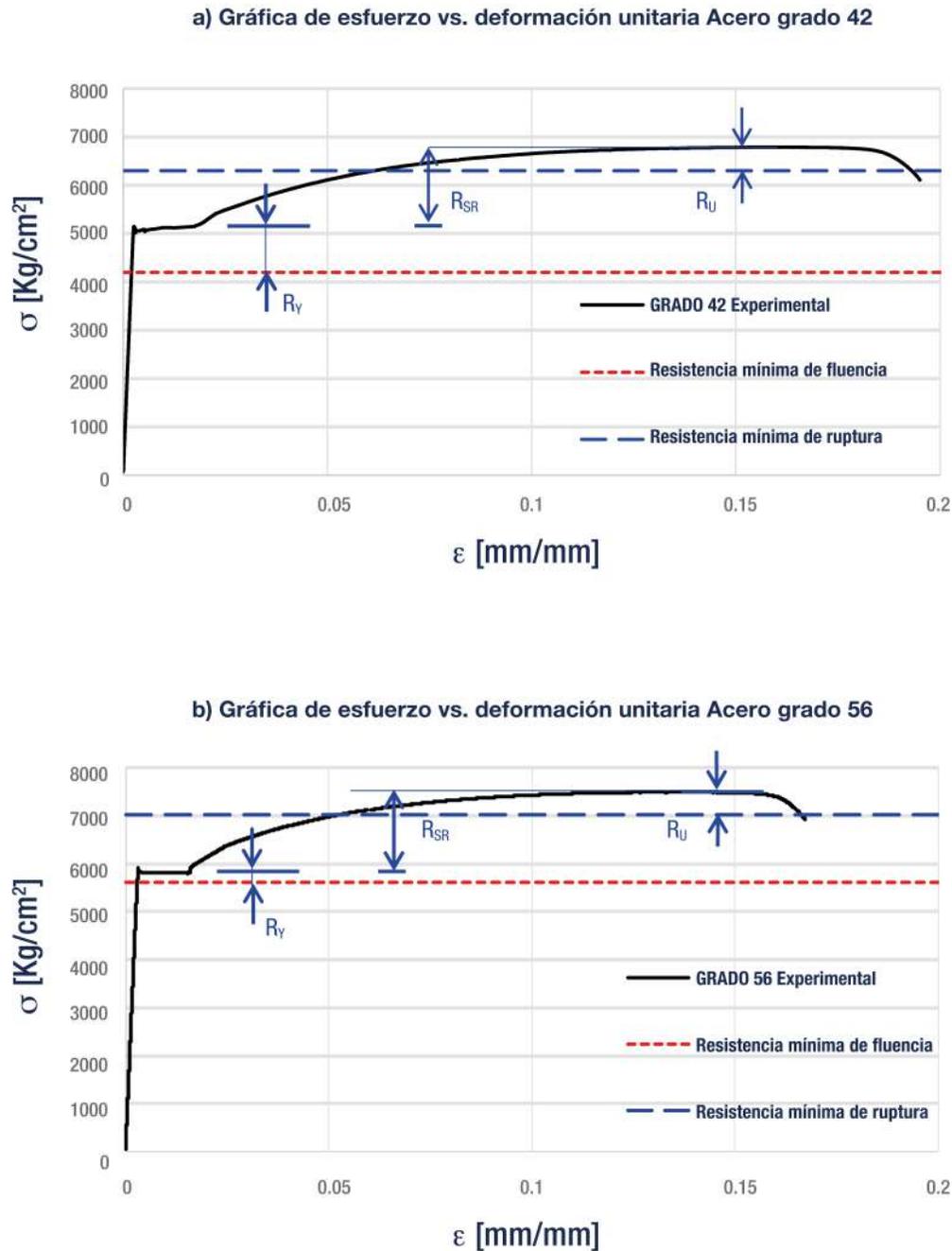
Tabla 4. Resistencias esperadas y sobrerresistencia.



De la tabla 4, puede observarse que los valores de  $R_y$  en el Grado 42 son mayores que en el Grado 56. Esta relación es consistente con los valores reportados en la literatura, pues a medida que aumenta la resistencia, los parámetros disminuyen. Los tres parámetros  $R_y$ ,  $R_u$  y  $R_{SR}$  mantienen el

mismo comportamiento.

En la figura 12, se muestran las gráficas para el Grado 42 y Grado 56, así como los valores esquemáticos de los límites.



## 5. PROPIEDADES MECÁNICAS

### 5.1 HISTÉRESIS

El ciclo de histéresis es una representación de la fuerza aplicada versus el desplazamiento correspondiente en el nodo de control. En el caso de las vigas, es el desplazamiento del centro del claro cuando se aplican dos cargas en los tercios (ver figura 13). La fuerza  $P$  es la suma de las fuerzas aplicadas por los cilindros hidráulicos. En este estudio,

para determinar si las vigas tienen la resistencia adecuada, se usan las propiedades del acero y concreto obtenidas experimentalmente. Para determinar la capacidad teórica, se utilizan las Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto 2017.

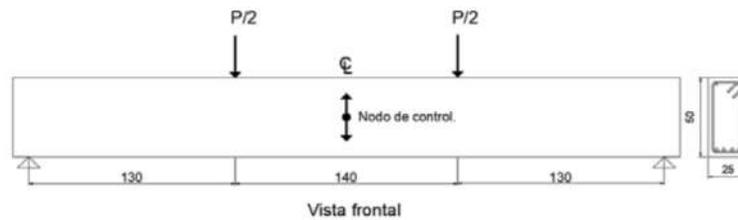


Figura 13. Puntos de control.

En las figuras 14 a 16 se muestran las gráficas de histéresis de los especímenes. Se graficaron en la misma escala. Para cada desplazamiento objetivo se hicieron 2 ciclos. En las gráficas de histéresis, el primer ciclo se graficó con línea sólida de color negro y el ciclo de repetición con línea punteada de color rojo. Para cada espécimen se muestra la resistencia nominal en flexión de la sección transversal calculada con las propiedades nominales del concreto y el acero y también se muestra la resistencia a flexión experimental. En todos los casos, la resistencia experimental es mayor que la resistencia teórica.

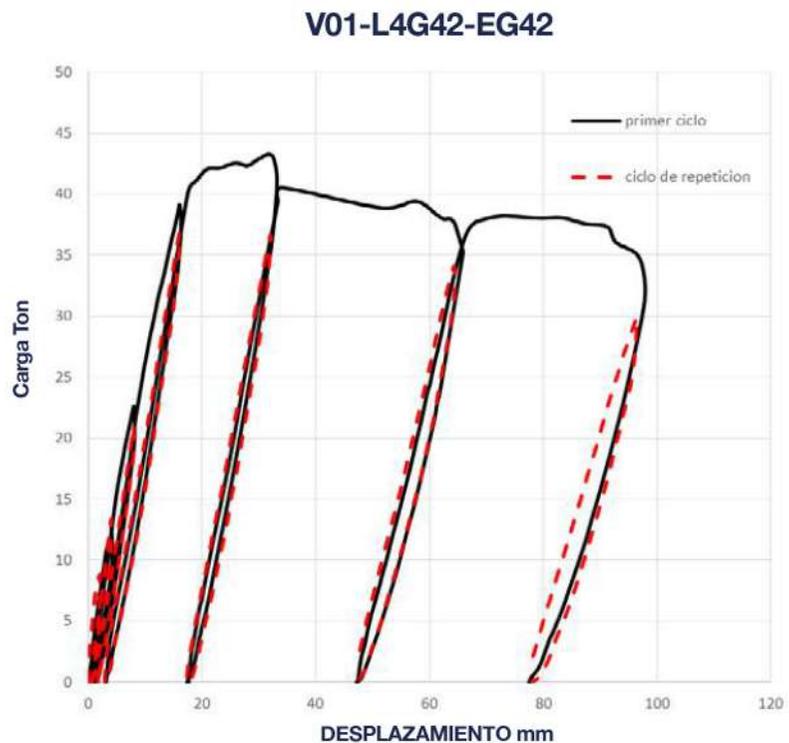


Figura 14. Diagrama de histéresis espécimen 1,  
 $M_n=20.04 \text{ ton}\cdot\text{m}$ ,  $M_{exp}=28.04 \text{ ton}\cdot\text{m}$ .



V02-L3G56-EG56

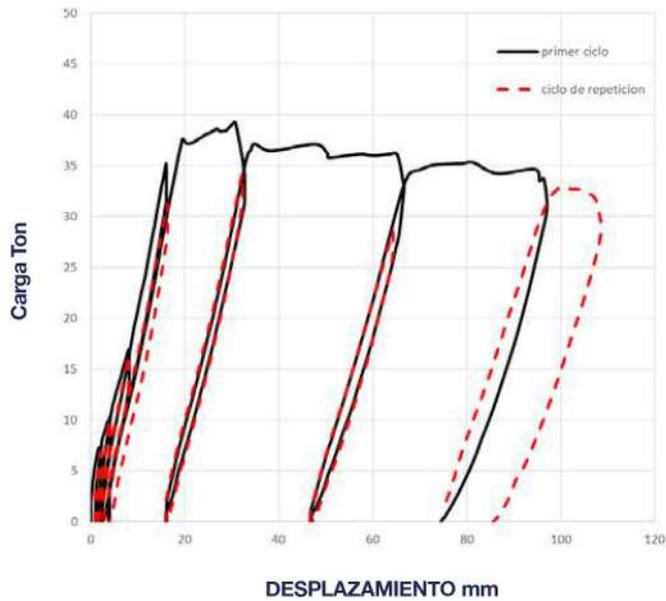


Figura 15. Diagrama de histéresis espécimen 2,  
 $M_n=20.04 \text{ ton}\cdot\text{m}$ ,  $M_{exp}=25.39 \text{ ton}\cdot\text{m}$ .

V03-L4G56-EG56

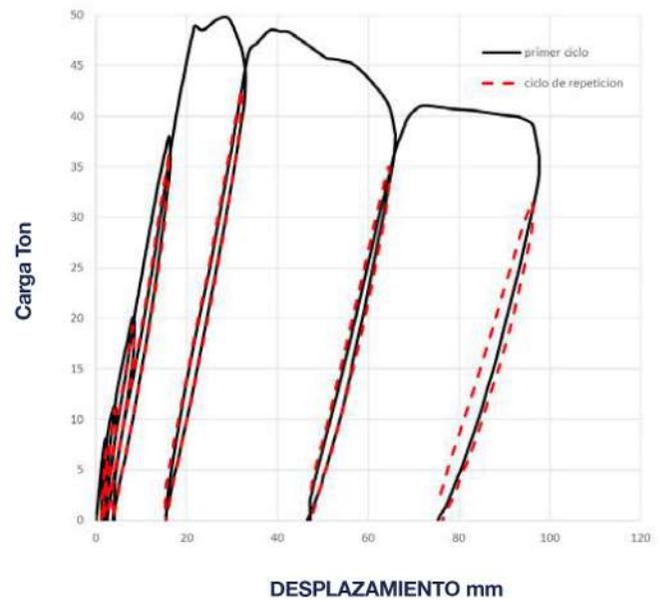


Figura 16. Diagrama de histéresis espécimen 3,  
 $M_n=26.13 \text{ ton}\cdot\text{m}$ ,  $M_{exp}=32.26 \text{ ton}\cdot\text{m}$ .

V04-L3G56-EG42

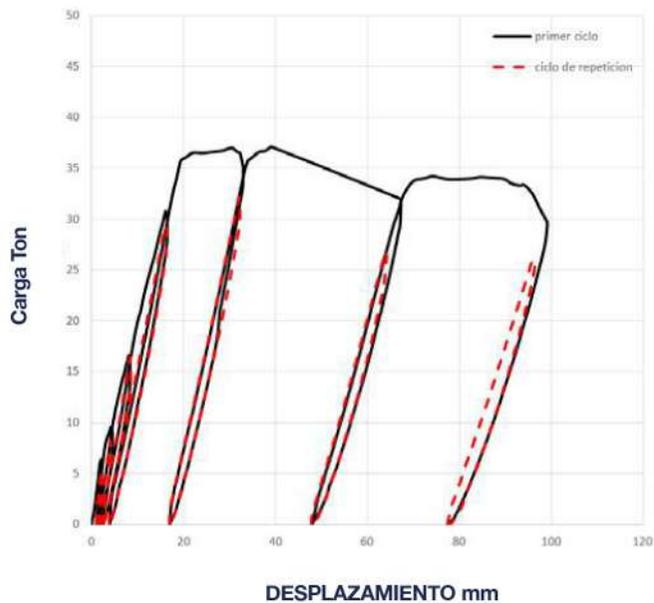


Figura 17. Diagrama de histéresis espécimen 4,  
 $M_n=20.04 \text{ ton}\cdot\text{m}$ ,  $M_{exp}=24.02 \text{ ton}\cdot\text{m}$ .

Se define como curva esqueleto a la que se forma con el valor de la carga asociada con el desplazamiento máximo de cada ciclo. En la figura 18 se muestra la curva esqueleto asociada con la primera vez que se alcanza el desplazamiento objetivo. Una observación importante es que el valor de la carga máxima de un ciclo y el desplazamiento máximo del ciclo, no ocurren al mismo tiempo, por ello, la curva esqueleto tiene valores inferiores que las gráficas de histéresis.



Figura 18. Envoltente de histéresis de los especímenes.

## 5.2 RIGIDEZ

Al analizar los diagramas de histéresis, se introduce el concepto de rigidez que es la pendiente pico a pico de un ciclo (Chopra, 2000). En la figura 19, la rigidez se representa con la letra K y se muestra como la línea roja que va desde el punto de carga cero, hasta el punto de desplazamiento máximo.

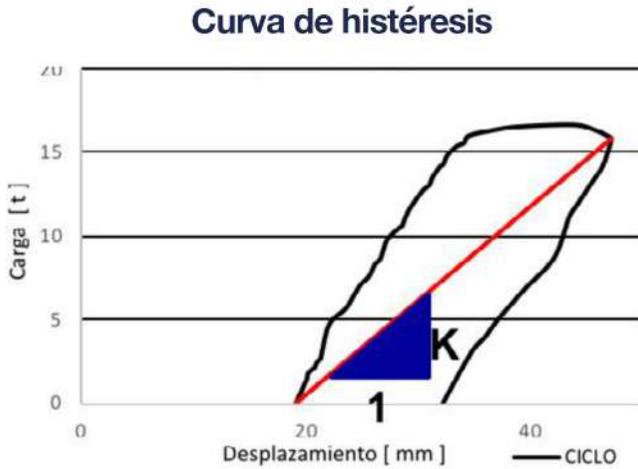


Figura 19. Rigidez pico a pico

Para poder comparar cómo se degrada la rigidez en los especímenes, se emplean las rigideces normalizadas respecto a la rigidez del primer desplazamiento objetivo  $K_n/K_1$ . En la figura 20, se muestra la forma en que se degrada la rigidez conforme aumenta el desplazamiento objetivo. En la gráfica se muestran los valores de los límites para el estado límite de servicio de deflexiones: el primero es cuando debajo de la viga se colocan elementos no estructurales que pueden dañarse y el segundo cuando no hay posibilidad de que resulten dañados los elementos no estructurales por las deflexiones verticales (NTC-Criterios, 2017).

La rigidez promedio cuando se alcanza el primer límite de desplazamiento, es de 0.75 veces la rigidez inicial. La rigidez promedio para el segundo límite, es de 0.6 veces la rigidez inicial.

La rigidez promedio de los especímenes cuando se alcanza la falla fue de 0.2 veces la rigidez inicial.

### Rigidez normalizada del primer ciclo

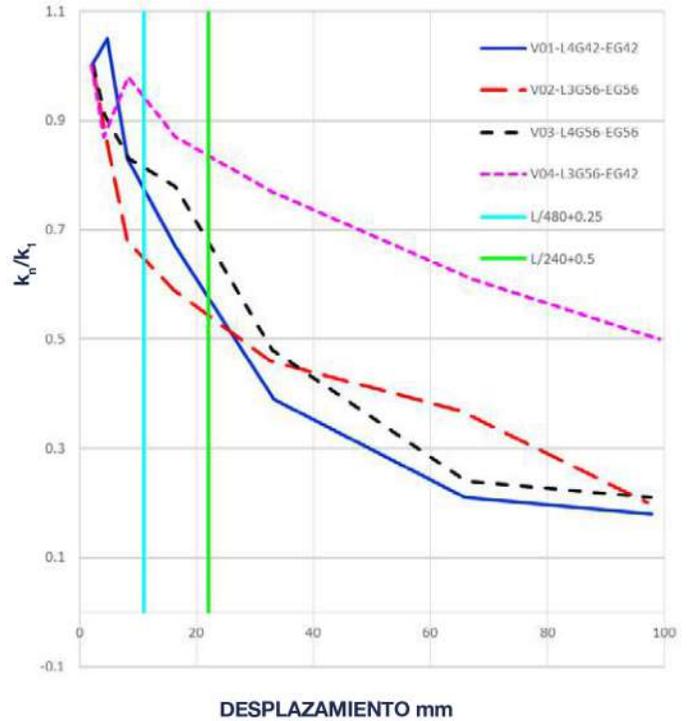


Figura 20. Degradación de rigidez



## 5.2 ENERGÍA HISTERÉTICA

La energía histerética disipada se calcula para cada ciclo y se define como el área contenida en la curva “Carga” vs “Desplazamiento”. En la figura 21 se muestra en forma esquemática el área bajo la curva de un ciclo de histéresis.



Figura 21. Energía histerética.

La figura 22 muestra la energía histerética disipada por el primer ciclo. Cabe destacar que en las figuras 14 a 17, pueden observarse los ciclos de histéresis. Se aprecia que el primer ciclo de desplazamientos tiene un área mayor que el ciclo de repetición. En la figura 23, se muestra la gráfica de la energía histerética disipada por el ciclo de repetición. Es clara la diferencia entre la energía que se disipa entre el primer y segundo ciclo.

En la figura 24 se muestra la energía histerética disipada acumulada.

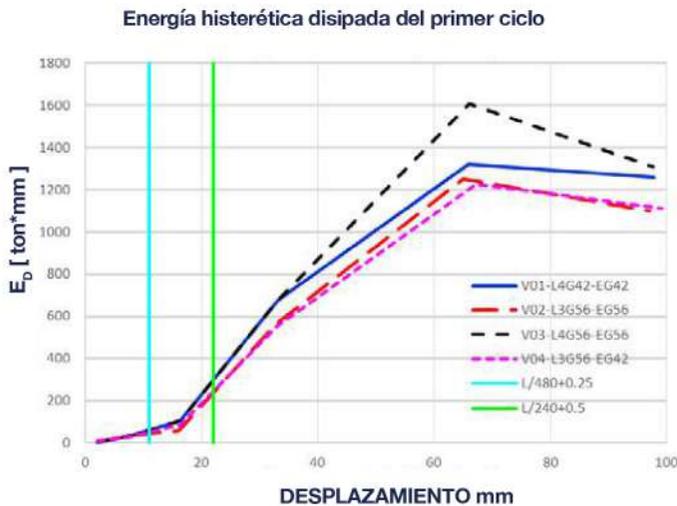


Figura 22. Energía histerética disipada por el primer ciclo.

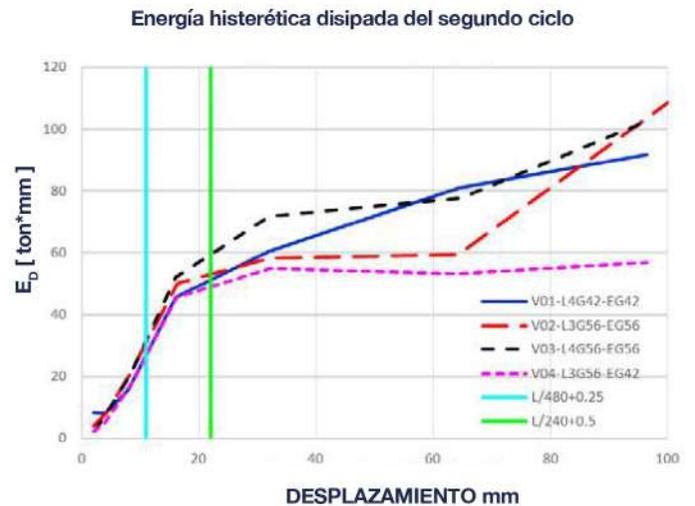
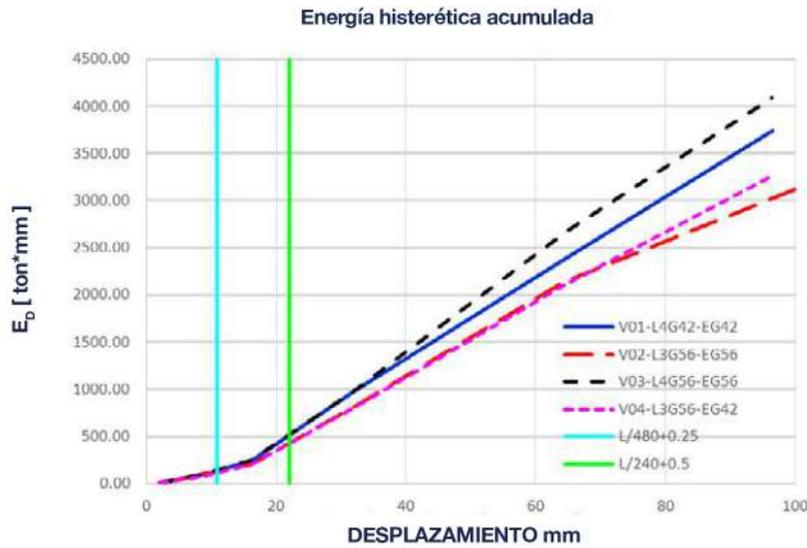


Figura 23. Energía histerética disipada por el segundo ciclo.



Los primeros ciclos de desplazamiento disipan el 90% debido a que la energía se disipa por histéresis, es decir por daño. Como el daño implica agrietamiento, al observar las figuras 28, 31, 33 y 35 se ve que la mayor parte de las grietas se deben al primer ciclo.

Figura 24. Energía histerética acumulada

### 5.4 AMORTIGUAMIENTO VISCOSO.

El amortiguamiento viscoso equivalente (ver figura 25) puede calcularse en curvas experimentales, con la ecuación 6 (Chopra, 2000). Dicho parámetro representa las fricciones internas en el material que, en el caso de las vigas aumenta a medida que el desplazamiento aumenta. El amortiguamiento viscoso en el intervalo del estado límite de desplazamientos, son menores que 5%, valor que se asume para las estructuras de concreto (ver figura 26).

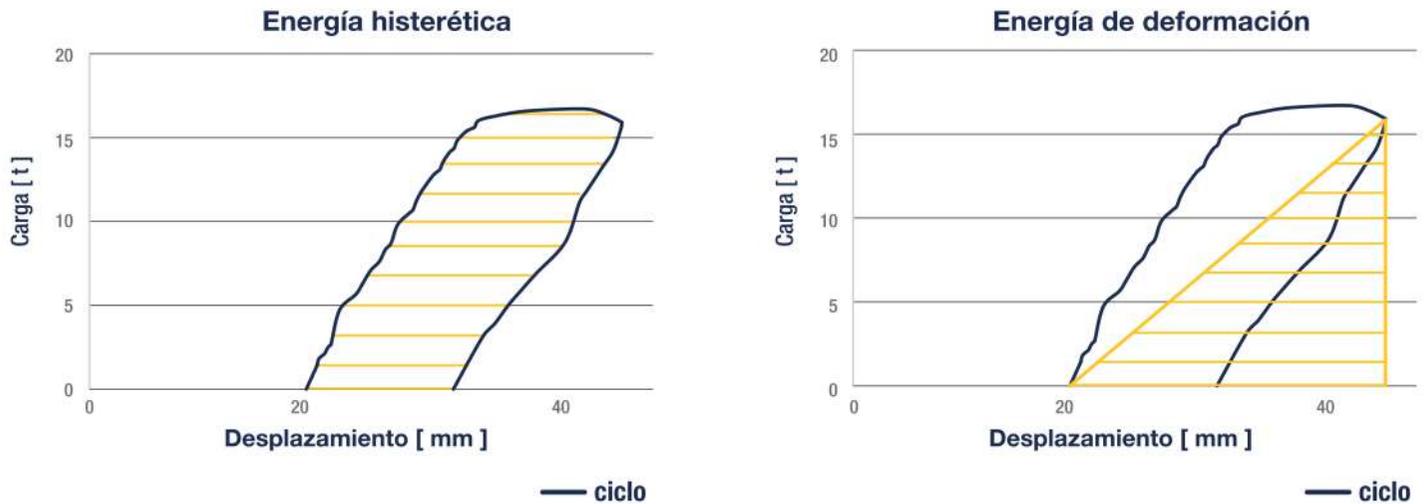
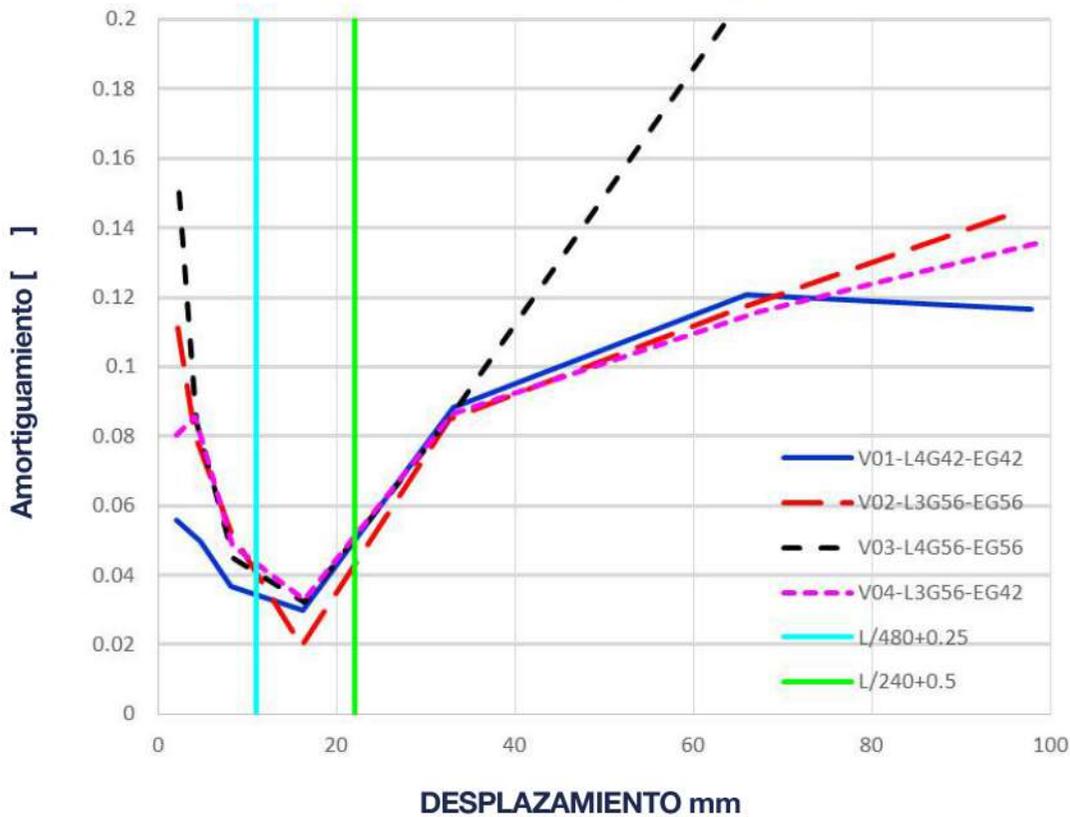


Figura 25. Definiciones de energía histerética y de deformación



$$\zeta_{eq} = \frac{1}{4\pi} \frac{E_H}{E_D} = \frac{1}{4\pi} \frac{\text{Energía de ciclo}}{\text{Energía de deformación}} \quad \text{Ec. (6)}$$

Amortiguamiento viscoso equivalente, primer ciclo.

Figura 26.  
Amortiguamiento viscoso.

## 5.5 DUCTILIDAD

Para superar la incertidumbre en la definición del desplazamiento de fluencia, se construye la gráfica que representa la envolvente de los ciclos de histéresis es decir, "Carga" vs "Desplazamiento" (Pan, 1989). La envolvente se idealiza como una curva con comportamiento elastoplástico. La pendiente inicial del comportamiento idealizado es secante y se determina uniendo el origen con el punto donde se tiene una carga igual a dos terceras partes del valor máximo registrado durante la prueba ( $P_{max}$ ). La porción plástica idealizada de la gráfica pasa por la carga máxima y llega hasta el desplazamiento de falla, que se define como el asociado a una disminución del 20% de la resistencia máxima registrada. La construcción de la gráfica idealizada puede verse en la figura 27.



Figura 27. Comportamiento elastoplástico idealizado, (Pan, 1989)

La ductilidad puede determinarse con la ecuación 7, es decir el desplazamiento último dividido entre el desplazamiento de fluencia.

$$\mu = \frac{\Delta_{u80}}{\Delta_y} \quad \text{Ec. (7)}$$

	V01	V02	V03	V04
$\Delta_y$ (mm)	16.50	16.96	19.54	19.40
$\Delta_u$ (mm)	97.86	96.99	97.67	97.86
$\mu$	5.93	5.72	5.00	5.04

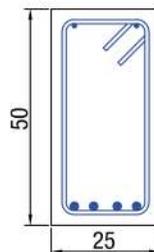
Tabla 5. Ductilidad de los especímenes

La ductilidad en todos los casos es mayor que 5. El espécimen V01, es el que tiene la mayor ductilidad, ese comportamiento es esperado, ya que la ductilidad de las vigas depende fundamentalmente de la ductilidad del acero de refuerzo, y como el espécimen V01 es el que se construyó con acero Grado 42, que tiene una ductilidad ligeramente mayor que el acero Grado 56, se ve reflejado en el comportamiento global. Es importante notar que el espécimen V02, tiene prácticamente la misma ductilidad que el espécimen V01.

### 5.6 AGRIETAMIENTO

Una manera de identificar el comportamiento de los especímenes de prueba es mediante el patrón de agrietamientos durante el ensaye.

En la figura 28, se muestra la imagen del espécimen 1 al final del experimento. Durante el ensaye, el acero de refuerzo longitudinal del lecho inferior que está trabajando por flexión, fluyó antes de que se formara la superficie de falla en el concreto conocida como desconchamiento.



**V01-L4G42-EG42**

$M_n = 20.04 \text{ ton} \cdot \text{m}$   
 $M_{exp} = 28.04 \text{ ton} \cdot \text{m}$

$As' = 2\#3, f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$

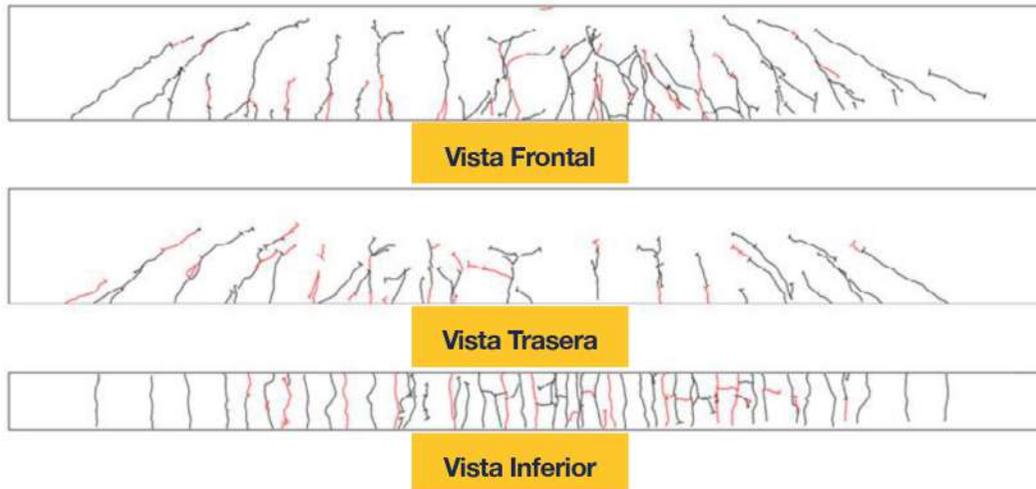
$E\#3, f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$

$As = 4\#6, f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$

Figura 28. Agrietamiento del espécimen V01 al final del ensaye.



En la figura 29, se muestra el patrón de grietas del espécimen V01. Las grietas de color negro ocurrieron la primera vez que se alcanzó el desplazamiento objetivo y las de color rojo en el ciclo de repetición.



*Figura 29. Patrón de agrietamiento del espécimen V01.*

Cuando ocurre el desconchamiento, de forma simultánea se presenta el pandeo en el acero de refuerzo longitudinal que está sometido a compresión, en la figura 30, puede observarse un acercamiento. En la figura se aprecia que el pandeo ocurre entre dos estribos.

*Figura 30. Detalle del desconchamiento y pandeo de barras del espécimen V01.*



En la figura 31, se muestra la imagen del espécimen V02 al final del experimento. El acero de refuerzo también fluyó y se presentó nuevamente el desconchamiento del concreto.

La figura 32, muestra el patrón de agrietamientos.

En la figura 33, se muestra la imagen del espécimen V03 al final del experimento. El acero de refuerzo también fluyó y se presentó nuevamente el desconchamiento del concreto.

La figura 34, muestra el patrón de agrietamientos.

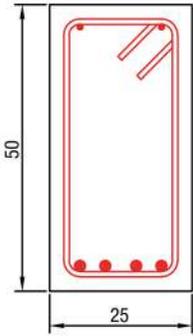
En la figura 35, se muestra la imagen del espécimen V04 al final del experimento. El acero de refuerzo también fluyó y se presentó nuevamente el desconchamiento del concreto.

La figura 36, muestra el patrón de agrietamientos.

### V02-L3G56-EG56

$M_n = 20.04 \text{ ton} \cdot \text{m}$

$M_{exp} = 25.39 \text{ ton} \cdot \text{m}$



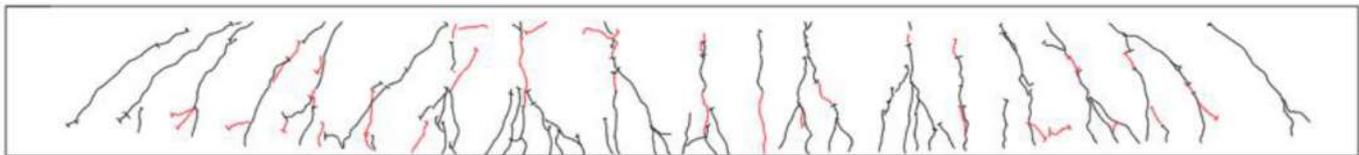
$As' = 2\#3, f_y = 5600 \text{ kg/cm}^2$

$E\#3, f_y = 5600 \text{ kg/cm}^2$

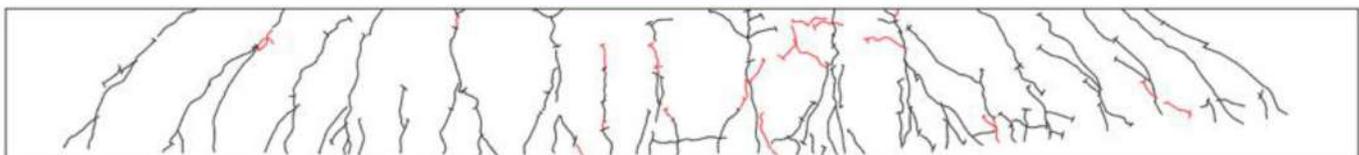
$As = 3\#6, f_y = 5600 \text{ kg/cm}^2$



Figura 31. Agrietamiento del espécimen V02 al final del ensaye.



Vista Frontal



Vista Trasera



Vista Inferior

Figura 32. Patrón de agrietamiento del espécimen V02.



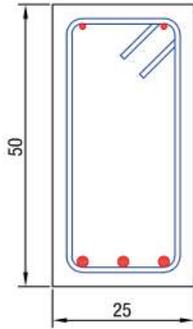
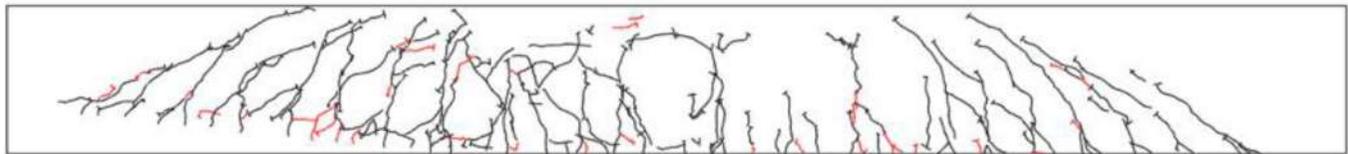
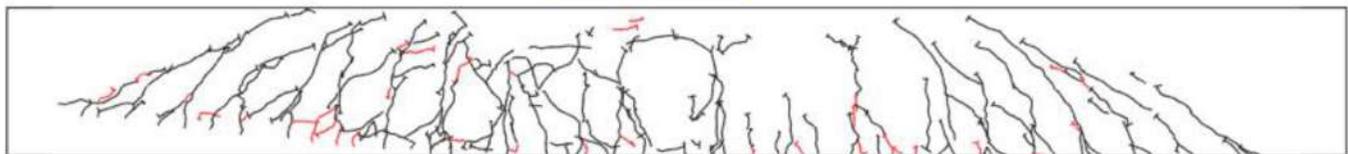
**V03-L4G56-EG56** $M_n = 26.13 \text{ ton} \cdot \text{m}$  $M_{exp} = 32.26 \text{ ton} \cdot \text{m}$  $As' = 2\#3, f_y = 5600 \text{ kg/cm}^2$  $E\#3, f_y = 5600 \text{ kg/cm}^2$  $As = 4\#6, f_y = 5600 \text{ kg/cm}^2$ 

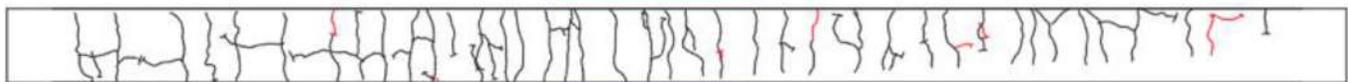
Figura 33. Agrietamiento del espécimen V03 al final del ensaye.



Vista Frontal



Vista Trasera



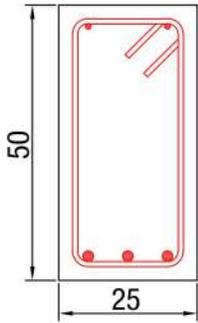
Vista Inferior

Figura 34. Patrón de agrietamiento del espécimen V03.

**V04-L4G56-EG42**

$M_n = 20.04 \text{ ton} \cdot \text{m}$

$M_{exp} = 24.02 \text{ ton} \cdot \text{m}$



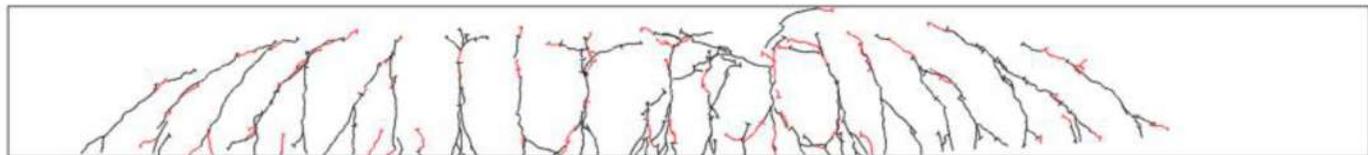
$As' = 2\#3, f_y = 5600 \text{ kg/cm}^2$

$E\#3, f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$

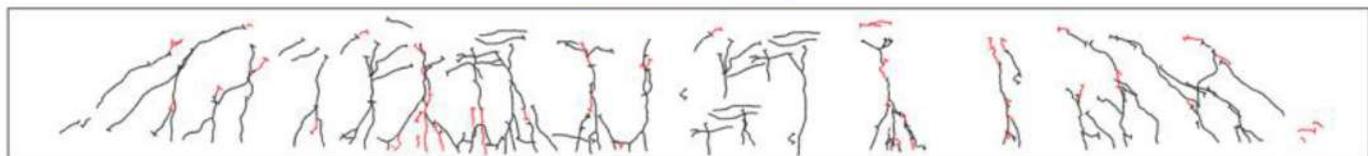
$As = 3\#6, f_y = 5600 \text{ kg/cm}^2$



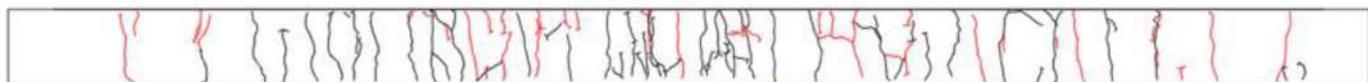
Figura 35. Agrietamiento del espécimen V04 al final del ensaye.



Vista Frontal



Vista Trasera



Vista Inferior

Figura 36. Patrón de agrietamiento del espécimen V04.



## 5.7 DEFORMACIÓN UNITARIA

En la tabla 4, se muestran los valores máximos de las deformaciones unitarias medidas con los strain gages. Además de los valores de la deformación unitaria, se colocaron otras columnas en las que se indican los puntos en los que de acuerdo con las deformaciones unitarias medidas experimentalmente se alcanza la fluencia. Cuando se coloca el valor cero, es porque el sensor no funcionó después de hacer el colado.

En los extremos, se instrumentaron los ganchos, y en ningún espécimen se alcanzó la fluencia del material. De acuerdo al diagrama de momentos (figura 3), la deformación unitaria de tensión es cero en el apoyo.

Para el acero de refuerzo longitudinal que está en tensión, se tiene que en los puntos ubicados en la etapa ascendente del momento (SG3 a SG-4) el acero no fluye y en los puntos de momento máximo (SG5 a SG-8) el acero fluye en todos los especímenes.

En la tabla 5, se muestra el valor máximo registrado por alguno de los strain gages SG5 a SG8 de la tabla 4, también se muestra el valor del esfuerzo asociado obtenido de la gráfica experimental del acero de refuerzo.

Todos los especímenes entraron en la etapa del endurecimiento por deformación pero ninguno alcanzó la deformación unitaria asociada con el esfuerzo último; es decir, el esfuerzo al final de la prueba, fue mayor que el de fluencia pero menor que él último.

Cabe mencionar que para deformaciones unitarias grandes, la mayoría de los strain gages dejó de funcionar, es decir que las deformaciones mostradas en la tabla 5 son las máximas registradas pero no necesariamente fueron las máximas en los especímenes.

		V01	V02	V03	V04	V01	V02	V03	V04
GANCHOS	SG1	7	45	0	4				
	SG2	3	2	0	1				
	SG9	-9	-4	-14	-6				
	SG10	-13	-6	-18	-9				
TENSIÓN	SG3	1637	1405	1976	1654				
	SG4	1731	1689	2224	1839				
	SG5	13426	5624	3707	2685	Fluye	Fluye	Fluye	
	SG6	672	9331	0	8511		Fluye		Fluye
	SG7	0	6064	6298	4120		Fluye	Fluye	Fluye
	SG8	0	3781	3880	4402		Fluye	Fluye	Fluye
COMPRESIÓN	SG11	-3230	-105	-259	-160	Fluye			
	SG12	-165	-71	-199	-131				
	SG13	-2340	-32046	-3059	-1880		Fluye	Fluye	
	SG14	-2554	-27489	-2657	-2471	Fluye	Fluye		
	SG15	-2691	-2182	-1976	-1908	Fluye			
	SG16	-2180	-2255	-1791	-2070				
ESTRIBOS	SG17	1442	334	1842	0				
	SG18	1103	438	0	1526				
	SG19	628	1108	1853	1851				
	SG20	749	1189	0	2289				
	SG21	10159	2391	2209	0	Fluye			
	SG22	626	1440	0	435				
	SG23	985	2898	901	1134		Fluye		
	SG24	1174	2469	952	1231				
CONCRETO	SGC01	-3684	-2348	-2615	-2930	Falla			
	SGC02	5318	43	3708	165279	Falla		Falla	Falla

Tabla 6. Deformaciones unitarias máximas [ $1 \times 10^{-6}$  mm/mm].

	$\epsilon_s$ [ $1 \times 10^{-6}$ mm/mm ]	$\epsilon_y$ [ $1 \times 10^{-6}$ mm/mm ]	$\epsilon_u$ [ $1 \times 10^{-6}$ mm/mm ]	$f_s$ [ kg/cm <sup>2</sup> ]
V01	13426	2250	162090	5124
V02	9331	2850	124660	5813
V03	6298	2850	124660	5816
V04	8511	2850	124660	5815

Tabla 7. Deformaciones unitarias máximas y esfuerzos asociados.

## 6. RESISTENCIA

La resistencia de las vigas se calculó en forma teórica utilizando las hipótesis básicas de las NTC-Concreto 2017. El cálculo de las resistencias se hizo en forma nominal, es decir sin considerar el factor de reducción.

### 6.1 RECUBRIMIENTO

En todos los especímenes se usó un recubrimiento libre de 2.5 cm, los estribos se fabricaron siguiendo las especificaciones de las NTC-C 2017 y de la NMX-B-457-CANACERO-2013. Para el radio del mandril en el doblado de los estribos del #3, se usó un diámetro de 3.5 veces el diámetro nominal de la barra y para el refuerzo longitudinal, se usó un diámetro del mandril de 5 veces el diámetro

nominal de la barra. En la figura 37, se dibujaron los estribos y el acero longitudinal, considerando que la corrugación promedio del acero del #3, es de 0.5 mm ( $d_{\#3}=1.05$  cm) y que la corrugación promedio del acero del #6, es de 1 mm ( $d_{\#6}=2.10$  cm). En los cálculos, se usa un recubrimiento para el acero del lecho inferior de 4.6 cm y del lecho superior de 4.1 cm.

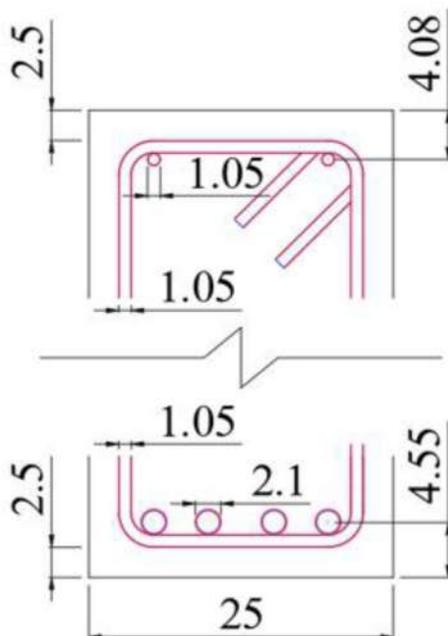


Figura 37. Recubrimiento considerando la corrugación (Dimensiones en cm).



## 6.2 MOMENTO RESISTENTE

En la tabla 6, se muestran los valores del momento resistente, considerando las propiedades nominales para las resistencias de los materiales; también se muestran los valores experimentales de la resistencia.

Lo primero que hay que notar es que: **la resistencia experimental es mayor que la resistencia teórica calculada con las propiedades nominales de los materiales.**

	$f_y$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$f'_c$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	E [kg/cm <sup>2</sup> ]	Mn [ton*m]	Me [ton*m]	Me/Mn
V01-L4G42-EG42	4200	350	2000000	20.276	28.04	1.38
V02-L3G56-EG56	5600	350	2000000	20.276	25.39	1.25
V03-L4G56-EG56	5600	350	2000000	26.450	32.26	1.22
V04-L3G56-EG42	5600	350	2000000	20.276	24.02	1.18

Tabla 8. Resistencia con valores nominales.

En la tabla 8, se muestra los valores del momento resistente, considerando las propiedades experimentales de la resistencia del concreto y del acero de refuerzo.

Al analizar los resultados, se puede concluir que: **la resistencia experimental es mayor que la resistencia**

	$f_y$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$f'_c$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	E [kg/cm <sup>2</sup> ]	Mn [ton*m]	Me [ton*m]	Me/Mn
V01-L4G42-EG42	5150	365	2017831	24.501	28.04	1.14
V02-L3G56-EG56	5800	395	2029389	20.953	25.39	1.21
V03-L4G56-EG56	5800	395	2029389	27.310	32.26	1.18
V04-L3G56-EG42	5800	395	2029389	20.953	24.02	1.15

Tabla 9. Resistencia con valores experimentales.

El espécimen V01, tiene un valor menor de la resistencia  $f'_c$ , debido a que fue el primer espécimen que se ensayó.

La diferencia entre las resistencias teóricas y experimentales se debe a que el acero de refuerzo entró en el intervalo del endurecimiento por deformación.

Cuando se analizaron las deformaciones unitarias, se determinó que el acero incurrió en el endurecimiento por deformación, pero no alcanzó la deformación última. En la tabla 8 se muestran los cálculos de la resistencia empleando

	$f_y$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$f'_c$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	E [kg/cm <sup>2</sup> ]	Mn [ton*m]	Me [ton*m]	Me/Mn
V01-L4G42-EG42	6855	365	2017831	31.717	28.039	0.88
V02-L3G56-EG56	7465	395	2029389	26.448	25.390	0.96
V03-L4G56-EG56	7465	395	2029389	34.182	32.265	0.94
V04-L3G56-EG42	7465	395	2029389	26.448	24.020	0.91

Tabla 10. Resistencia con valores experimentales de ruptura.

La última columna muestra la división del valor experimental respecto al teórico. Puede observarse que el valor máximo se obtiene para el espécimen V01, debido a que la sobrerresistencia del acero Grado 42 es mayor que el Grado 56.

Los especímenes reforzados con acero Grado 56, tienen un margen de seguridad del orden del 20% de la resistencia.

**teórica calculada con las propiedades experimentales de los materiales ( $f'_c$  experimental y  $f_y$  experimental).**

Al utilizar las propiedades experimentales, se obtiene un margen de seguridad más homogéneo entre los especímenes, del orden del 15%.

el valor del esfuerzo último de la gráfica experimental esfuerzo vs deformación unitaria. **La resistencia calculada con el esfuerzo último, es un límite superior para la resistencia.**

La última columna muestra la relación entre el momento calculado experimentalmente respecto al momento máximo probable. En este caso, el esfuerzo experimental es menor al máximo.

Las vigas de concreto construidas con 3 varillas de acero Grado 56, tienen el mismo margen de seguridad que una viga construida con 4 varillas de acero Grado 42.

Cuando se divide la resistencia teórica del espécimen V03 respecto al V01, se obtiene un valor de 1.3, es decir la viga construida con 4 varillas de acero Grado 56, tiene 30% más resistencia que la construida con 4 varillas de acero Grado 42. Si la división se hace respecto a las resistencias calculadas con las propiedades experimentales de los materiales, se tiene un valor de 1.11, es decir se tiene 11% más resistencia. Cuando la división se hace respecto a los valores experimentales, se tiene el valor de 1.15, es decir 15% más resistencia. El contraste entre lo teórico (30%) y lo experimental (15%) se debe a que el acero Grado 42 tiene una mayor  $R_y$  que el acero Grado 56.

### 6.3 AHORRO

De acuerdo con la información proporcionada por Gerdau en enero de 2018, una tonelada de varilla del #6 Grado 42, tiene un costo de \$13,200.00, y la tonelada de acero del #6 Grado 56, tiene un costo de \$13,700.00.

Tomando en cuenta que por cuestiones de resistencia tenemos un ahorro del 25% del acero longitudinal al emplear acero Grado 56 respecto al acero Grado 42 podemos hacer el siguiente cálculo

$$\$AceroG42 = As(13,200) = \$13,200.00 As \quad \text{Ec. (8)}$$

$$\$AceroG56 = 0.75 As(13,700) = \$9900.00 As \quad \text{Ec. (9)}$$

$$Ahorro = \frac{\$9900.00 As}{\$13,200.00 As} = 0.78 \quad \text{Ec. (10)}$$

**Al utilizar Acero Grado 56 se tiene un ahorro del 22%.**

## 7. CONCLUSIONES

Se logró comprobar la hipótesis de trabajo en la que se establece que “Una viga con 3 varillas de acero Grado 56, tiene la misma resistencia que una viga con 4 varillas Grado 42”.

El acero de refuerzo de todos los especímenes, incursiona en el intervalo del endurecimiento por deformación.

El esfuerzo del acero cuando ocurre la falla es mayor que el esfuerzo de fluencia y menor que el esfuerzo último.

Debido a que el experimento se diseñó para que fallara por flexión, el acero de los estribos no fluyó, por lo tanto, no se obtuvo ninguna ventaja al usar acero de Grado 56 como refuerzo por cortante.

La degradación de rigidez medida experimentalmente fue similar en todos los especímenes, por lo que se puede decir que tienen el mismo comportamiento y que no se presentaron caídas súbitas de los valores. El espécimen V04 que fue el último que se ensayó fue el que tuvo la menos degradación de rigidez, probablemente porque el concreto tenía más edad durante el ensaye.

Los especímenes no están diseñados para disipar energía, pero al calcular la energía histerética disipada, se determina que los especímenes diseñados con acero Grado 42 y Grado 56 disipan valores similares de energía. El 90% de la energía se disipa durante el ciclo en el que se alcanza por primera vez el valor del desplazamiento objetivo, debido a que la energía se disipa por histéresis, es decir por daño que en los especímenes está asociado con el agrietamiento y la mayoría de las grietas se generaron en el primer ciclo de desplazamientos.

El valor típico del amortiguamiento viscoso que reconocen los reglamentos de construcción es de 5%. Durante la prueba se determinó que para el estado límite de desplazamientos, el amortiguamiento viscoso es menor que 5% y que para el estado límite de falla es mayor al 5%. Cuando se incrementan los valores del desplazamiento, el amortiguamiento viscoso calculado experimentalmente aumenta, ya que está asociado con las fricciones internas entre las grietas del concreto.

La ductilidad de los especímenes es adecuada, con valor de 5 o mayor, el espécimen con acero Grado 42 tiene una ductilidad ligeramente mayor que los construidos con acero Grado 56, dicho comportamiento se atribuye a la mayor elongación medida experimentalmente del acero Grado 42 respecto al acero Grado 56 cuando ocurre la falla.

Todas las vigas fallaron por aplastamiento del concreto y lo hicieron ante el mismo incremento de desplazamiento, por lo que se concluye que tienen la misma capacidad de deformación.



El agrietamiento de las vigas inició en el centro del claro y se fue propagando hacia los lados, la mayoría de las grietas se generaron durante el ciclo en el que se alcanza por primera vez el valor del desplazamiento objetivo.

La resistencia experimental de los especímenes es mayor que la resistencia teórica calculada con las propiedades nominales de los materiales y también es mayor que la resistencia calculada con las propiedades experimentales de los materiales.

La seguridad de los especímenes reforzados con 3 varillas de acero Grado 56, es la misma que un espécimen reforzado con 4 varillas Grado 42.

Utilizar acero Grado 56 implica un menor congestionamiento del refuerzo respecto al acero Grado 42, lo que facilita el colado.

Emplear acero Grado 56 en combinación con concreto de alta resistencia permite secciones transversales más ligeras, lo que reduce las acciones a las que está sometida la estructura.

Utilizar acero Grado 56 como refuerzo longitudinal implica un ahorro de 25% en peso respecto del acero Grado 42 y un ahorro económico del 22%.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

Chopra, A. K. (2000). "Dynamics of structures", Prentice Hall, USA, pp. 98-105.

Pan, A., and Moehle, L. P. (1989). "Lateral displacement ductility of reinforced concrete flat-slabs", ACI Structural Journal, Vol. 86, No. 3, May-June 1989, pp. 250-258. (86-s27).

Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de concreto. (2017). Gaceta Oficial de la Ciudad de México, Vigésima época, No. 220 Bis, México, 15 de diciembre de 2017.

Norma Mexicana NMX-B-457-CANACERO-2013, Industria siderúrgica - Varilla corrugada de acero de baja aleación para refuerzo de concreto - Especificaciones y métodos de prueba.

Norma Mexicana NMX-B-506-CANACERO-2011, Industria siderúrgica - Varilla corrugada de acero para refuerzo de concreto - Especificaciones y métodos de prueba.



## APÉNDICE A CONSTRUCCIÓN

Los especímenes se construyeron en las instalaciones de la UAM Azcapotzalco.

Todo el acero de refuerzo lo proporcionó la empresa Gerdau Corsa, el habilitado del refuerzo se hizo conservando las especificaciones de la NMX-B-457-CANACERO-2013. En la figura A1, se muestra el doblado de una barra de refuerzo del #6. En la figura A2, se muestra el acero longitudinal listo para habilitarlo, se utilizaron códigos de colores para distinguir entre el acero Grado 42 y Grado 56.



Figura A1. Doblado del refuerzo



Figura A2. Acero longitudinal.

Durante el habilitado del acero, se procuró que los ganchos del estribo no quedaran ubicados en la misma esquina, como se muestra en la figura A3.



Figura A3. Acero longitudinal.

Una vez habilitado el acero de refuerzo, se colocó la instrumentación interna, que fueron 24 strain gages en la superficie del acero de refuerzo. Para colocarlos, se preparó la superficie, primero retirando la corrugación (figura 4), posteriormente se hizo un pulido mecánico cambiando las lijas de grano grueso a grano fino hasta dejar la superficie tipo espejo.



Figura A4. Pulido de la superficie.



La colocación de los strain gages se hizo siguiendo las indicaciones de la marca Vishay que incluye una protección aislante que permite el colado y reduce los daños durante el colado.



*Figura A5. Strain gages colocados.*

Se mandó a fabricar una cimbra de fibra de vidrio para la construcción de vigas de 4.5m con una sección transversal de 0.5x0.25m (ver figura A6).



*Figura A6. Cimbra de fibra de vidrio.*

Para disminuir la variabilidad en el concreto, se utilizó concreto premezclado, en la figura A7, se puede observar el proceso de colado y vibrado de uno de los especímenes.



*Figura A7. Colado y vibrado de especímenes.*

Para determinar las propiedades experimentales del concreto, se sacaron cilindros y vigas de concreto que se probaron al siguiente día de la prueba de los especímenes. En la figura A8, se muestra a los testigos que se curaron de la misma forma que los especímenes.



*Figura A8. Cilindros testigo curados igual que los especímenes.*

La preparación de los especímenes incluye el traslado, al dispositivo de pruebas, para poder marcar las grietas, el espécimen se pinta de color blanco y posteriormente se cuadricula (ver figura A9).



Figura A9. Viga cuadriculada

Para medir los desplazamientos en el centro del claro y en bajo la aplicación de las cargas, se emplean dos ménsulas y un acrílico para que se apoye el transductor de desplazamientos (ver figura A10).

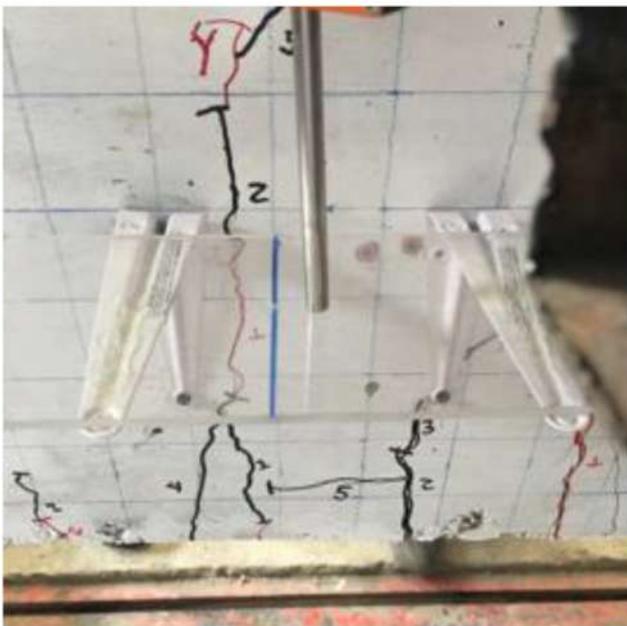


Figura A10. Transductor colocado sobre el acrílico.

Para lograr que los apoyos sean considerados como articulados, se utilizaron articulaciones formadas por dos placas de acero con una redonda de 1.5 pulgadas al que se le restringe el desplazamiento por medio de dos redondos de 0.375 pulgadas que se fijan a la placa superior (ver figura A11).



Figura A11. Apoyo articulado



La figura A12 muestra un espécimen al inicio de la prueba y el dispositivo de cargas.

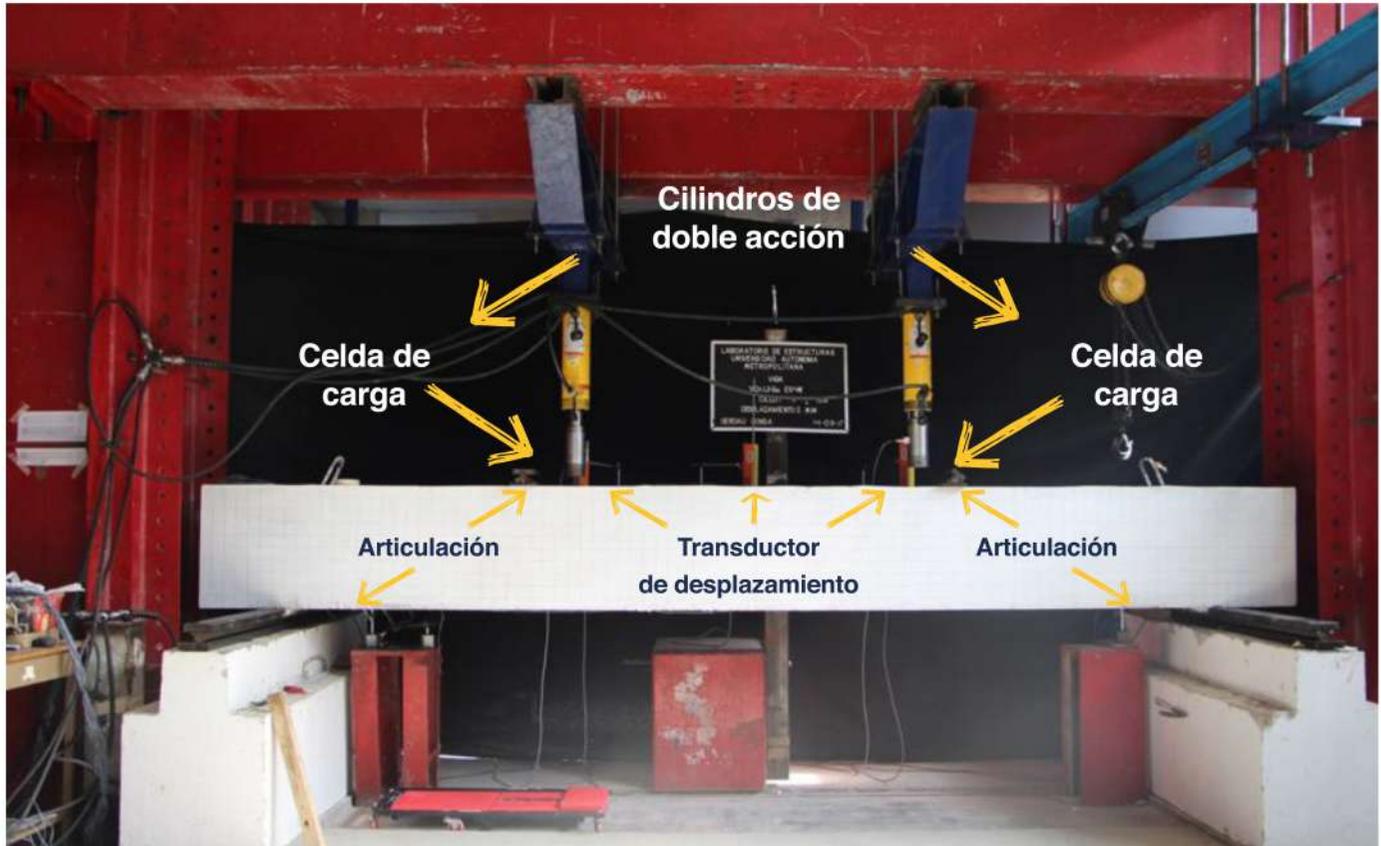
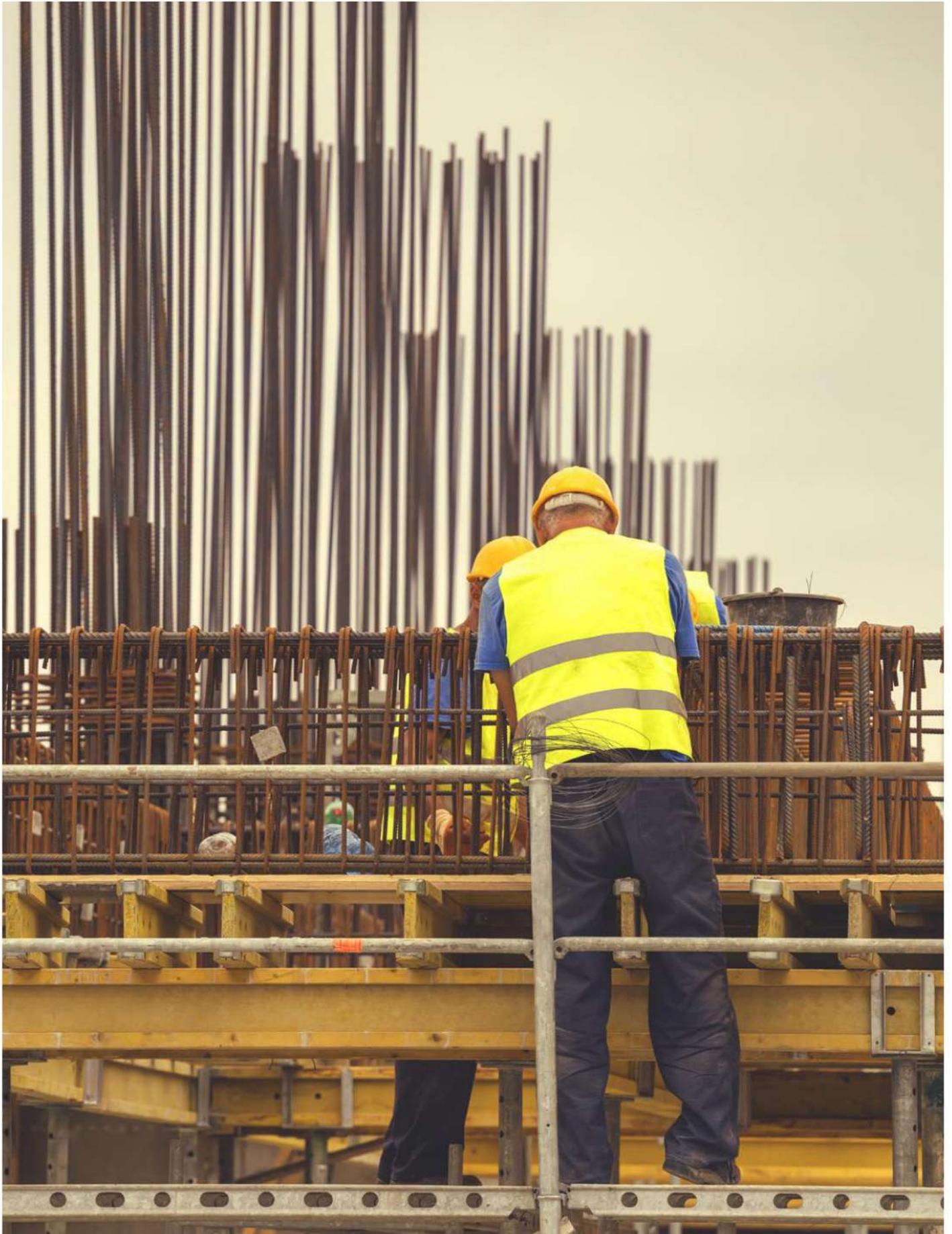


Figura A12. Dispositivo de cargas.







**GERDAU** CORSA

El futuro se moldea

Somos más allá del acero.

[gerdaucorsa.com.mx](http://gerdaucorsa.com.mx)



Gerdau Corsa. El futuro se moldea.