

Universidad de Los Andes
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica
Postgrado en Ingeniería de Mantenimiento



El Reforzamiento de Columnas de Acero,
una Aplicación al Mantenimiento de
Estructuras

Por: Ing. Gregorio Antonio Ramírez

Mérida, Octubre de 2003

Licencia Creative Commons.

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Universidad de Los Andes
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica
Postgrado en Ingeniería de Mantenimiento

El Reforzamiento de Columnas de Acero,
una Aplicación al Mantenimiento de
Estructuras

SERBIULA

Tulio Febres Cordero

Por: Ing. Gregorio Antonio Ramírez

Mérida, Octubre de 2003

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

DONACION

ÍNDICE GENERAL

	Pag.
I Introducción	
1.1 Planteamiento del problema	2
1.2 Justificación	3
1.3 Alcances	4
II Marco Referencial	
2.1 Trabajos en el área	6
2.2 Fundamentos teóricos	6
2.2.1 Materiales y propiedades Mecánicas	6
2.2.1.1 Acero	8
2.2.1.2 Concreto	10
2.2.2 Elementos de Sección Compuesta	12
2.2.3 Teoría de columnas	15
2.2.3.1 Introducción	15
2.2.3.2 Carga crítica	16
2.2.3.3 Análisis de Euler para columnas largas	18
2.2.3.4 Pandeo inelástico en columnas	20
2.2.3.5 Fórmula de la Secante	23
2.2.4 Criterios de diseño	27
2.2.5 Teorías de falla	29
2.2.5.1 Introducción	29
2.2.5.2 Clasificación de la teorías de falla	31
2.5.2.1 Teoría del esfuerzo normal máximo	31
2.5.2.2 Teoría del esfuerzo cortante máximo	31
2.5.2.3 Teoría de la energía máxima de distorsión	32
2.5.2.4 Teoría del esfuerzo cortante octaédrico	34
2.2.6 Fatiga	35

Licencia Creative Commons:

iii

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

2.2.7 Fundamentos del pandeo local	37
2.2.8 Efectos de confinamiento en el concreto	41
III Metodología y Equipos	
3.1 Definición de la muestra	45
3.2 Construcción de las probetas	49
3.3 Diseño de la mezcla de reforzamiento	53
3.4 Cálculo teórico de las cargas de falla	54
3.4.1 Cálculo de la carga de falla para la columna vacía	55
3.4.2 Cálculo de la carga de falla para la columna reforzada con concreto	56
3.5 Cálculo de los esfuerzos máximos en el brazo de las probetas	59
3.6 Determinación del desplazamiento entre el tubo de acero y el núcleo de concreto	60
3.7 Cálculo teóricos de los esfuerzos en función de la carga	61
3.8 Ubicación de extensómetros	65
3.9 Equipos a emplear	67
3.10 Variables a medir en el ensayo	69
IV Análisis de Resultados	74
4.1 Gráficos correspondientes al comportamiento de cada una de las columnas en función de las deformaciones unitarias y de la deflexión.	75

4.1.1 Columna vacía	76
4.1.2 Columna reforzada con concreto con aditivo	78
4.1.3 Columna reforzada con concreto de 250 Kgrf./cm ²	80
4.1.4 Columna reforzada con concreto de 250 Kgrf/cm ² y con clavos laterales	82
4.2 Resultados experimentales de la resistencia del concreto empleado en el reforzamiento	84
4.3 Revisión de resultados	85
4.3.1 Observaciones generales en los ensayos	85
4.3.2 Análisis del proceso de carga	89

V Mantenimiento de Estructuras

5.1 Introducción	95
5.2 Justificación	96
5.3 Objetivos	100
5.4 Inspección	102
5.4.1 Inspección de estructuras	104
5.4.2 Reportes de inspección	105
5.4.3 Reporte de fallas	105
5.4.4 Jerarquizaron de las necesidades de mantenimiento	106
5.5 Corrosión	107
5.5.1. Definición y características	108
5.5.2 Tipos de formas de corrosión	108
5.5.3 Protección del acero contra la corrosión	110
5.6 Acciones de mantenimiento	112
5.6.1 Mantenimiento preventivo	113
5.6.2 Mantenimiento correctivo	113
5.6.3 Reforzamientos	114
5.7 Aplicación práctica del reforzamiento de columnas al mantenimiento de estructuras	115

VI Conclusiones y Recomendaciones

6.1 Conclusiones	120
6.2 Recomendaciones	124

VII Anexos

A.- Resultados experimentales del proceso de carga	127
A1.- Columna vacía	127
A2.- Columna reforzada con concreto con aditivo	132
A3.- Columna reforzada con concreto de 250 kgf./cm ²	140
A4.- Columna reforzada con concreto de 250 kgf./cm ² y con clavos laterales	145
B.- Reporte fotográfico	150
B1.- Vista general del ensayo	150
B2.- Detalle de medición de la deflexión	150
B3.- Detalle de pandeo local en columna sin reforzar	151
B4.- Detalle del pandeo local en columna reforzada	151
B5.- Vista general de la columna reforzada después de la falla	152
B6.- Brazo de la probeta para transmitir la carga	152
B7.- Agrietamiento del concreto visto a través del agujero del tubo de acero	153
B8.- Construcción típica	153
B9.- Agrietamientos en el concreto observados al cortar el tubo.	154
C.- Bibliografía	155
D.- Hoja de Vida	157

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pag.
CAPÍTULO II	
Figura N° 2.1 Elementos de sección compuesta	13
Figura N° 2.2 Esquema de columna	16
Figura N° 2.3 Carga crítica en una columna	17
Figura N° 2.4 Elástica en la columna	19
Figura N° 2.5 Esquema de columna con carga excéntrica	24
Figura N° 2.6 Superposición de esfuerzos máximos	32
Figura N° 2.7 Esfuerzo cortante octaédrico	35
Figura N° 2.8 Detalle del pandeo local	38
Figura N° 2.9 Elemento de lamina con esfuerzos en una sola Dirección	39
Figura N° 2.10 Ensayo de confinamiento en concreto	41
CAPÍTULO III	
Figura N° 3.1 Columna para la muestra a ensayar	48
Figura N° 3.2 Esquema de la probeta de ensayo	49
Figura N° 3.3 Detalles de unión entre brazo y columna	52
Figura N° 3.4 Ubicación de extensómetros en la probeta	53
Figura N° 3.5 Sección compuesta y sección equivalente en acero	57
Figura N° 3.6 Esquema del brazo de la probeta	60
Figura N° 3.7 Dispositivo para medir desplazamiento entre concreto y tubo	61
Figura N° 3.7 Vista Lateral de la columna	62
Figura N° 3.8 Sección de corte S-S	62
Figura N° 3.9 Diagrama de cuerpo libre de la columna	63
Figura N° 3.10 Ubicación de los extensómetros en la probeta	67
Figura N° 3.11 Dispositivo para medir deflexión	68

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Figura N° 3.12 Detalle de dispositivo para medir deflexión (extremo inferior) 68

CAPÍTULO IV

Figura N° 4.1 Pandeo local en columna vacía con 2 extensómetros 85

CAPÍTULO V

Figura N° 5.1 Ejemplo de una ampliación de vivienda que emplea perfiles tubulares de (100x100) mm² 98

Figura N°5.2 Casos típicos de columnas de acero afectadas por la corrosión 100

Figura N° 5.3 Vista de la pared interna del tubo, al cortar la probeta, sin muestras aparentes de corrosión 115

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

ÍNDICE DE GRÁFICOS

	Pag.
CAPÍTULO II	
Gráfico 2.1 Hipérbola de Euler	21
Gráfico 2.2 Esfuerzos en función de L_e/r	23
Gráfica 2.3 Límites de fatiga en el acero 1020 y aluminio 2024	37
Gráfica 2.4 Variación de la resistencia del concreto bajo Confinamiento	43
CAPÍTULO III	
Gráfico 3.1 Propiedades de las secciones tubulares cuadradas	46
Gráfico 3.2 Proceso de carga de la columna	70
CAPÍTULO IV	
Gráfico 4.1 Carga Vs Deformación para Columna 4A (Ext. 1, compresión)	75
Gráfico 4.2 Carga Vs Deformación para Columna 4A (Ext. 3, tracción)	75
Gráfico 4.3 Carga Vs Deformación para Columna 4B (Ext. 1, compresión)	76
Gráfico 4.4 Carga Vs Deformación para Columna 4B (Ext. 2, tracción)	76
Gráfico 4.5 Carga Vs Deformación para Columna 3A (Ext. 1, compresión)	77
Gráfico 4.6 Carga Vs Deformación para Columna 3A (Ext. 3, tracción)	77
Gráfico 4.7 Carga Vs Deformación para Columna 3B (Ext. 1, compresión)	78
Gráfico 4.8 Carga Vs Deformación para Columna 3B (Ext. 2, tracción)	78
Gráfico 4.9 Carga Vs Deformación para Columna 1A (Ext. 1,	79

Licencia Creative Commons:

ix

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

compresión)	
Gráfico 4.10 Carga Vs Deformación para Columna 1A (Ext. 3, tracción)	79
Gráfico 4.11 Carga Vs Deformación para Columna 1B (Ext. 1, compresión)	80
Gráfico 4.12 Carga Vs Deformación para Columna 1B (Ext. 2, tracción)	80
Gráfico 4.13 Carga Vs Deformación para Columna 2A (Ext. 1, compresión)	81
Gráfico 4.14 Carga Vs Deformación para Columna 2A (Ext. 3, tracción)	81
Gráfico 4.15 Carga Vs Deformación para Columna 2B (Ext. 1, compresión)	82
Gráfico 4.16 Carga Vs Deformación para Columna 2B (Ext. 2, tracción)	82
Gráfico 4.17 Características del concreto empleado en el reforzamiento	83
Gráfico 4.18 Resultados experimentales de la carga máxima soportada por cada columna	88

RESUMEN

El trabajo aquí presentado comprende un estudio del comportamiento mecánico de elementos tubulares de 100 mm. x 100 mm. de sección y de 3 mm. de espesor de pared, a los cuales se les refuerza incorporándoles un núcleo de concreto empleando una mezcla formal de 250 Kgf/cm² o una mezcla de concreto a la que se le añadió un aditivo expansor. En el primer caso se evaluó el comportamiento con la colocación o no de clavos de acero sobre la pared de elemento tubular a fin de evitar posibles deslizamientos entre los dos materiales que conforman el elemento. Para el segundo caso al agregarle el aditivo expansor, se persigue una mayor adhesión entre tubo y núcleo de concreto, para evitar los posibles deslizamientos ya indicados. En función de los cuatro posibles arreglos así considerados, se construyeron 8 columnas-probeta a las que se les sometió a cargas de flexo-compresión para evaluar su comportamiento y la máxima capacidad que cada tipo de arreglo podría soportar.

El objetivo básico al efectuar este estudio consistió en determinar comportamientos que pudiesen ser incorporados como base para la construcción y mantenimiento de estructuras que emplean de manera muy común este tipo de tubos como columnas tanto en el desarrollo de viviendas y galpones así como en ampliaciones de este tipo de edificaciones, y otros usos tales como bases de tanques elevados, torres de vigilancia, columnas de mezaninas, etc.

Los resultados obtenidos muestran una serie de ventajas, que se logran al reforzar los tubos citados, por lo que este proceso debería ser una recomendación a promover dentro del área en cuestión.

CAPITULO I INTRODUCCION

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las columnas son elementos estructurales que se emplean para soportar cargas de compresión, las cuales generalmente no se aplican directamente sobre el eje centroidal del elemento, por lo que se generan momentos flectores que son transmitidos a la columna. La resistencia de éstos elementos está intrínsecamente relacionada con las propiedades de la sección transversal, con la longitud y apoyos de la columna, y en una buena parte con el tipo de material que la conforma; cuando se requiere aumentar la carga que el elemento pueda soportar se opta normalmente por aumentar el momento de inercia de la sección, y una manera práctica de lograrlo es aumentando las dimensiones transversales de ella, sin embargo éste procedimiento conduce a un aumento significativo del costo de éstos elementos.

Un tipo de columna que tiene un uso muy extendido es aquella que se construye empleando elementos tubulares de acero de fabricación comercial y de secciones transversales cuadradas. En éste tipo de columnas una alternativa económica que se puede aplicar para aumentar la carga que las mismas puedan soportar es aumentando el momento de inercia de la sección al reforzar la columna vaciándole concreto en el interior del tubo y tratando de lograr la mayor adherencia entre los dos materiales.

Para llevar a cabo el estudio, en principio se desea estudiar las características del comportamiento de las columnas de sección tubular cuadrada sin ningún tipo de reforzamiento, de tal manera que los resultados que se obtengan sirvan de patrón de comparación a los casos cuando se estudian columnas con reforzamiento. Estos reforzamientos estarán constituidos de tres maneras diferentes: adición de concreto al tubo, adición de concreto al tubo más colocación de clavos de acero convenientemente

distribuidos sobre la pared del mismo, de tal manera que se pueda evitar el deslizamiento que tiende a presentarse entre los dos materiales al ocurrir el pandeo en la columna, y por último se considera la adición del concreto al tubo, pero agregándole a la mezcla un aditivo expansor de tal manera que se pueda lograr un aumento de la fricción y así evitar el deslizamiento entre los dos materiales al ocurrir el pandeo.

1.2 JUSTIFICACIÓN

A partir de hace aproximadamente treinta años y con el propósito de reducir costos y peso, se introdujo en el mercado nacional perfiles tubulares en sustitución de cabillas, ángulos y pletinas, básicamente; y con el tiempo esta oferta fue ampliándose en variedad y tamaños de sección. Actualmente se emplea extendidamente un perfil de sección cuadrada, mayormente de (100 x 100) mm², como columna en la construcción de edificaciones de vivienda y galpones de tamaño limitados, y también empleándolos en otras aplicaciones.

En virtud de ese uso extendido para los mencionados tubulares y tratando de contribuir a un empleo más adecuado de los mismos se presenta el siguiente trabajo el cual trata de demostrar y justificar el reforzamiento de dichos elementos estructurales, procedimiento que mejoraría el comportamiento mecánico de estos elementos, reduciría costos, propiciaría mejoras en las labores de mantenimiento de las estructuras donde se emplean estos tubulares, aportaría alternativas de solución en ampliación de edificaciones ya construidas.

Además este trabajo pretende servir como referencia para complementar otros trabajos ya desarrollados en este campo en los cuales se planteó la inquietud de determinar posibles deslizamientos, que se supone pueden presentarse entre la camisa o tubo de acero y el núcleo de concreto empleado

como reforzamiento. Bajo ese esquema se plantean dos procedimientos para evitar ese deslizamiento generado por los esfuerzos cortantes propios al efecto de deflexión en la columna, procedimientos que se escogen tomando en consideración las posibilidades de una aplicación práctica, fácil de llevar a cabo, para así hacerlos asequibles a cualquier interesado sin que se requieran equipos costosos o mano de obra especializada.

1.3 ALCANCES

Dado que es notorio que el empleo de perfiles tubulares de acero tiene una aplicación bastante extendida en la construcción de viviendas, edificios, galpones, canchas deportivas, así como también en la realización de ampliaciones de viviendas y otras edificaciones ya construidas, se espera que los resultados del presente trabajo puedan ser difundidos y conocidos dentro del personal técnico que ésta involucrado en ésta área, para que de ésta manera las ventajas que trae consigo el reforzamiento de tubulares de acero pueda ser eficazmente aprovechado y por otra parte, en ese reforzamiento se tiene la ventaja que su implementación resulta muy económica y no se requiere de equipos ni de personal especializado.

Por otra parte se espera también que este trabajo sirva de referencia a otros trabajos similares que puedan desarrollarse dentro de la misma área. Igualmente se aspira que los resultados obtenidos sirvan de base para implementar programas y mejoras en el mantenimiento de estructuras que emplean los elementos tubulares que se consideran en el estudio.

CAPITULO II

MARCO REFERENCIAL

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

2.1 TRABAJOS EN EL ÁREA

En la Escuela de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Los Andes, se han estado realizando investigaciones en el comportamiento de columnas fabricadas tanto de concreto armado como en columnas de acero. De éste último tipo se realizó un trabajo por el ingeniero Jesús P. Flores Vásquez titulado: "Metodología para el Diseño de Columnas Tubulares de Acero Laminado en Frío, con Núcleo de Concreto". Este trabajo consistió en establecer un modelo matemático para el diseño de dichas columnas empleando resultados de ensayos efectuados sobre columnas de 2 metros de longitud con y sin reforzamiento de concreto. Algunos de esos resultados guardan cierta relación con el trabajo aquí presentado, sin embargo debido a la diferencia de espesor de los tubos allí empleados y a la metodología de los ensayos, se puede considerar que se mantiene un cierto margen de independencia con los resultados que aquí se presentan, sin embargo el trabajo citado se puede considerar como un buen patrón de referencia.

2.2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.2.1 MATERIALES Y SUS PROPIEDADES MECÁNICAS

En el diseño y construcción de estructuras y máquinas se debe conocer perfectamente los valores de las fuerzas y momentos que actúan sobre ellas, puesto que estas cargas se traducen en esfuerzos y deformaciones en los elementos estructurales que integran al conjunto estudiado y estos efectos estarán estrechamente ligados a las propiedades mecánicas de los materiales que las conforman, por lo que el diseñador debe hacer uso de sus conocimientos para establecer la magnitud de los esfuerzos y deformaciones que eventualmente pueden presentarse y a su vez definir si el material está en

condiciones de resistir esos esfuerzos o sí la funcionabilidad de la estructura o máquina no queda afectada por las deformaciones que se llegasen a presentar.

En la selección de los materiales se requieren considerar muchas de sus propiedades y determinados factores inherentes a los mismos. Por lo general debe evaluarse la resistencia, rigidez, ductilidad, peso específico, resistencia a la corrosión, soldabilidad, conformabilidad, aspecto, combustibilidad, costo, disponibilidad. De todos estos aspectos mencionados se pueden considerar que para el presente estudio, y en la gran mayoría de los casos, se consideran como más importantes: la resistencia, la rigidez y la ductilidad.

Resistencia: se puede considerar como la capacidad de los materiales para soportar cargas. En las tablas de las propiedades de los materiales y específicamente para los metales siempre se definirán los valores de esfuerzo de fluencia o cedencia y los de esfuerzo último a la tracción, los cuales se obtienen a partir de ensayos de tracción uniaxiales. En el caso de ciertos materiales frágiles las capacidades de soportar cargas de compresión tienen una relevancia muy alta. Al efectuar los ensayos de tracción en materiales y dado que generalmente su comportamiento sigue dos patrones, uno elástico y otro plástico, se determina también el límite de tracción de un factor patrón a otro llamado límite elástico, pero con frecuencia se aproxima este último al valor de esfuerzo de fluencia o cedencia.

Rigidez: es la propiedad que tiene un material para resistir deformaciones en el rango elástico. La rigidez en un material se define en función de su módulo de elasticidad (E) o también llamado módulo de Young. Un material tiene un alto valor de rigidez cuando su deformación en el rango elástico es relativamente muy pequeña.

Ductilidad: Es la capacidad que tiene un material de deformarse en el rango plástico. Ésta propiedad permite al material deformarse antes de fracturarse. Es una característica muy importante en el diseño estructural, puesto que un material dúctil es usualmente muy resistente a cargas de impacto. Tiene además la ventaja de “avisar” cuando va a ocurrir la fractura, al hacerse visible su gran deformación. En este sentido, el acero tiene una alta capacidad de absorber y disipar energía lo que le da mejores condiciones de resistencia y de durabilidad en ciclos repetidos de carga.

La medida de la ductilidad se expresa como un porcentaje del alargamiento cuando se efectúa un ensayo de tracción, al medir la longitud de calibración entre marcas antes y después de la fractura del material.

Para el presente trabajo, y debido a que son los únicos materiales que intervienen, se estudiarán los siguientes:

2.2.1.1 Acero

EL acero es una aleación constituida básicamente por hierro y carbono, y en ciertos casos posee otros elementos como aleantes.

Los elementos básicos empleados en la producción de acero son mineral de hierro, coque y caliza, que son fundidos a 1650 °C en un alto horno y donde una vez cumplidas las condiciones de la mezcla es vaciado y luego laminado para obtener los diferentes productos.

En Venezuela, la producción nacional es obtenida a través de SIDOR, la cual emplea hornos básicos de hogar abierto y hornos eléctricos de ultra alta potencia. En esta industria se producen aceros denominados efervescentes, calmados y semicalmados, dependiendo del grado de desoxidación que desarrolle el acero, lo cual a su vez es una función del oxígeno que se

encuentre en la mezcla al producirse el acero. Los aceros efervescentes presentan la mayor cantidad de oxígeno en la mezcla, los aceros calmados presenta un mínimo nivel de oxígeno de tal manera que no se quiera ninguna reacción química entre el oxígeno y los elementos de aleación.

Los aceros efervescentes son empleados para la producción de aceros laminados, lo cual es la materia prima para la elaboración de productos planos o láminas las cuales son utilizadas por la industria metalmeccánica para la producción de perfiles abiertos y cerrados, propios en la construcción de viviendas y otras aplicaciones.

Una de las características importantes del acero es su homogeneidad, lo cual permite caracterizar sus propiedades y de esta manera poder asegurar su comportamiento único en el diseño.

En el presente trabajo según datos aportados por catálogos del fabricante, (C.A. CONDUVEN 3a ed. Mayo 1998) los tubos estructurales estudiados están constituidos por acero de alta resistencia producidos según la norma ASTM (American Society for Testing and Materials) A500, grado C con una resistencia a la fluencia de 3515 Kgf/ cm² (358,7 MPa) un esfuerzo último de 427 MPa y un porcentaje de elongación de 21 %.

Entre las ventajas del acero como material estructural se encuentran las siguientes:

- Alta resistencia por unidad de peso, lo cual permite la construcción de estructuras relativamente livianas en comparación con otros materiales
- *Elasticidad*: el acero es el material que más se acerca a un comportamiento linealmente elástico, mientras las cargas aplicadas no produzcan esfuerzos que superen el límite de proporcionalidad del material.

2.2.7 Fundamentos del pandeo local	37
2.2.8 Efectos de confinamiento en el concreto	41
III Metodología y Equipos	
3.1 Definición de la muestra	45
3.2 Construcción de las probetas	49
3.3 Diseño de la mezcla de reforzamiento	53
3.4 Cálculo teórico de las cargas de falla	54
3.4.1 Cálculo de la carga de falla para la columna vacía	55
3.4.2 Cálculo de la carga de falla para la columna reforzada con concreto	56
3.5 Cálculo de los esfuerzos máximos en el brazo de las probetas	59
3.6 Determinación del desplazamiento entre el tubo de acero y el núcleo de concreto	60
3.7 Cálculo teóricos de los esfuerzos en función de la carga	61
3.8 Ubicación de extensómetros	65
3.9 Equipos a emplear	67
3.10 Variables a medir en el ensayo	69
IV Análisis de Resultados	74
4.1 Gráficos correspondientes al comportamiento de cada una de las columnas en función de las deformaciones unitarias y de la deflexión.	75

4.1.1 Columna vacía	76
4.1.2 Columna reforzada con concreto con aditivo	78
4.1.3 Columna reforzada con concreto de 250 Kgrf./cm ²	80
4.1.4 Columna reforzada con concreto de 250 Kgrf/cm ² y con clavos laterales	82
4.2 Resultados experimentales de la resistencia del concreto empleado en el reforzamiento	84
4.3 Revisión de resultados	85
4.3.1 Observaciones generales en los ensayos	85
4.3.2 Análisis del proceso de carga	89

V Mantenimiento de Estructuras

5.1 Introducción	95
5.2 Justificación	96
5.3 Objetivos	100
5.4 Inspección	102
5.4.1 Inspección de estructuras	104
5.4.2 Reportes de inspección	105
5.4.3 Reporte de fallas	105
5.4.4 Jerarquizaron de las necesidades de mantenimiento	106
5.5 Corrosión	107
5.5.1. Definición y características	108
5.5.2 Tipos de formas de corrosión	108
5.5.3 Protección del acero contra la corrosión	110
5.6 Acciones de mantenimiento	112
5.6.1 Mantenimiento preventivo	113
5.6.2 Mantenimiento correctivo	113
5.6.3 Reforzamientos	114
5.7 Aplicación práctica del reforzamiento de columnas al mantenimiento de estructuras	115

VI Conclusiones y Recomendaciones

6.1 Conclusiones	120
6.2 Recomendaciones	124

VII Anexos

A.- Resultados experimentales del proceso de carga	127
A1.- Columna vacía	127
A2.- Columna reforzada con concreto con aditivo	132
A3.- Columna reforzada con concreto de 250 kgf./cm ²	140
A4.- Columna reforzada con concreto de 250 kgf./cm ² y con clavos laterales	145
B.- Reporte fotográfico	150
B1.- Vista general del ensayo	150
B2.- Detalle de medición de la deflexión	150
B3.- Detalle de pandeo local en columna sin reforzar	151
B4.- Detalle del pandeo local en columna reforzada	151
B5.- Vista general de la columna reforzada después de la falla	152
B6.- Brazo de la probeta para transmitir la carga	152
B7.- Agrietamiento del concreto visto a través del agujero del tubo de acero	153
B8.- Construcción típica	153
B9.- Agrietamientos en el concreto observados al cortar el tubo.	154
C.- Bibliografía	155
D.- Hoja de Vida	157

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pag.
CAPÍTULO II	
Figura N° 2.1 Elementos de sección compuesta	13
Figura N° 2.2 Esquema de columna	16
Figura N° 2.3 Carga crítica en una columna	17
Figura N° 2.4 Elástica en la columna	19
Figura N° 2.5 Esquema de columna con carga excéntrica	24
Figura N° 2.6 Superposición de esfuerzos máximos	32
Figura N° 2.7 Esfuerzo cortante octaédrico	35
Figura N° 2.8 Detalle del pandeo local	38
Figura N° 2.9 Elemento de lamina con esfuerzos en una sola Dirección	39
Figura N° 2.10 Ensayo de confinamiento en concreto	41
CAPÍTULO III	
Figura N° 3.1 Columna para la muestra a ensayar	48
Figura N° 3.2 Esquema de la probeta de ensayo	49
Figura N° 3.3 Detalles de unión entre brazo y columna	52
Figura N° 3.4 Ubicación de extensómetros en la probeta	53
Figura N° 3.5 Sección compuesta y sección equivalente en acero	57
Figura N° 3.6 Esquema del brazo de la probeta	60
Figura N° 3.7 Dispositivo para medir desplazamiento entre concreto y tubo	61
Figura N° 3.7 Vista Lateral de la columna	62
Figura N° 3.8 Sección de corte S-S	62
Figura N° 3.9 Diagrama de cuerpo libre de la columna	63
Figura N° 3.10 Ubicación de los extensómetros en la probeta	67
Figura N° 3.11 Dispositivo para medir deflexión	68

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Figura N° 3.12 Detalle de dispositivo para medir deflexión (extremo inferior) 68

CAPÍTULO IV

Figura N° 4.1 Pandeo local en columna vacía con 2 extensómetros 85

CAPÍTULO V

Figura N° 5.1 Ejemplo de una ampliación de vivienda que emplea perfiles tubulares de (100x100) mm² 98

Figura N°5.2 Casos típicos de columnas de acero afectadas por la corrosión 100

Figura N° 5.3 Vista de la pared interna del tubo, al cortar la probeta, sin muestras aparentes de corrosión 115

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

ÍNDICE DE GRÁFICOS

	Pag.
CAPÍTULO II	
Gráfico 2.1 Hipérbola de Euler	21
Gráfico 2.2 Esfuerzos en función de L_e/r	23
Gráfica 2.3 Límites de fatiga en el acero 1020 y aluminio 2024	37
Gráfica 2.4 Variación de la resistencia del concreto bajo Confinamiento	43
CAPÍTULO III	
Gráfico 3.1 Propiedades de las secciones tubulares cuadradas	46
Gráfico 3.2 Proceso de carga de la columna	70
CAPÍTULO IV	
Gráfico 4.1 Carga Vs Deformación para Columna 4A (Ext. 1, compresión)	75
Gráfico 4.2 Carga Vs Deformación para Columna 4A (Ext. 3, tracción)	75
Gráfico 4.3 Carga Vs Deformación para Columna 4B (Ext. 1, compresión)	76
Gráfico 4.4 Carga Vs Deformación para Columna 4B (Ext. 2, tracción)	76
Gráfico 4.5 Carga Vs Deformación para Columna 3A (Ext. 1, compresión)	77
Gráfico 4.6 Carga Vs Deformación para Columna 3A (Ext. 3, tracción)	77
Gráfico 4.7 Carga Vs Deformación para Columna 3B (Ext. 1, compresión)	78
Gráfico 4.8 Carga Vs Deformación para Columna 3B (Ext. 2, tracción)	78
Gráfico 4.9 Carga Vs Deformación para Columna 1A (Ext. 1,	79

Licencia Creative Commons:

ix

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

compresión)	
Gráfico 4.10 Carga Vs Deformación para Columna 1A (Ext. 3, tracción)	79
Gráfico 4.11 Carga Vs Deformación para Columna 1B (Ext. 1, compresión)	80
Gráfico 4.12 Carga Vs Deformación para Columna 1B (Ext. 2, tracción)	80
Gráfico 4.13 Carga Vs Deformación para Columna 2A (Ext. 1, compresión)	81
Gráfico 4.14 Carga Vs Deformación para Columna 2A (Ext. 3, tracción)	81
Gráfico 4.15 Carga Vs Deformación para Columna 2B (Ext. 1, compresión)	82
Gráfico 4.16 Carga Vs Deformación para Columna 2B (Ext. 2, tracción)	82
Gráfico 4.17 Características del concreto empleado en el reforzamiento	83
Gráfico 4.18 Resultados experimentales de la carga máxima soportada por cada columna	88

RESUMEN

El trabajo aquí presentado comprende un estudio del comportamiento mecánico de elementos tubulares de 100 mm. x 100 mm. de sección y de 3 mm. de espesor de pared, a los cuales se les refuerza incorporándoles un núcleo de concreto empleando una mezcla formal de 250 Kg/cm² o una mezcla de concreto a la que se le añadió un aditivo expansor. En el primer caso se evaluó el comportamiento con la colocación o no de clavos de acero sobre la pared de elemento tubular a fin de evitar posibles deslizamientos entre los dos materiales que conforman el elemento. Para el segundo caso al agregarle el aditivo expansor, se persigue una mayor adhesión entre tubo y núcleo de concreto, para evitar los posibles deslizamientos ya indicados. En función de los cuatro posibles arreglos así considerados, se construyeron 8 columnas-probeta a las que se les sometió a cargas de flexo-compresión para evaluar su comportamiento y la máxima capacidad que cada tipo de arreglo podría soportar.

El objetivo básico al efectuar este estudio consistió en determinar comportamientos que pudiesen ser incorporados como base para la construcción y mantenimiento de estructuras que emplean de manera muy común este tipo de tubos como columnas tanto en el desarrollo de viviendas y galpones así como en ampliaciones de este tipo de edificaciones, y otros usos tales como bases de tanques elevados, torres de vigilancia, columnas de mezaninas, etc.

Los resultados obtenidos muestran una serie de ventajas, que se logran al reforzar los tubos citados, por lo que este proceso debería ser una recomendación a promover dentro del área en cuestión.

CAPITULO I INTRODUCCION

WWW.DIGITALJLA.VE

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las columnas son elementos estructurales que se emplean para soportar cargas de compresión, las cuales generalmente no se aplican directamente sobre el eje centroidal del elemento, por lo que se generan momentos flectores que son transmitidos a la columna. La resistencia de éstos elementos está intrínsecamente relacionada con las propiedades de la sección transversal, con la longitud y apoyos de la columna, y en una buena parte con el tipo de material que la conforma; cuando se requiere aumentar la carga que el elemento pueda soportar se opta normalmente por aumentar el momento de inercia de la sección, y una manera práctica de lograrlo es aumentando las dimensiones transversales de ella, sin embargo éste procedimiento conduce a un aumento significativo del costo de éstos elementos.

Un tipo de columna que tiene un uso muy extendido es aquella que se construye empleando elementos tubulares de acero de fabricación comercial y de secciones transversales cuadradas. En éste tipo de columnas una alternativa económica que se puede aplicar para aumentar la carga que las mismas puedan soportar es aumentando el momento de inercia de la sección al reforzar la columna vaciándole concreto en el interior del tubo y tratando de lograr la mayor adherencia entre los dos materiales.

Para llevar a cabo el estudio, en principio se desea estudiar las características del comportamiento de las columnas de sección tubular cuadrada sin ningún tipo de reforzamiento, de tal manera que los resultados que se obtengan sirvan de patrón de comparación a los casos cuando se estudian columnas con reforzamiento. Estos reforzamientos estarán constituidos de tres maneras diferentes: adición de concreto al tubo, adición de concreto al tubo más colocación de clavos de acero convenientemente

distribuidos sobre la pared del mismo, de tal manera que se pueda evitar el deslizamiento que tiende a presentarse entre los dos materiales al ocurrir el pandeo en la columna, y por último se considera la adición del concreto al tubo, pero agregándole a la mezcla un aditivo expansor de tal manera que se pueda lograr un aumento de la fricción y así evitar el deslizamiento entre los dos materiales al ocurrir el pandeo.

1.2 JUSTIFICACIÓN

A partir de hace aproximadamente treinta años y con el propósito de reducir costos y peso, se introdujo en el mercado nacional perfiles tubulares en sustitución de cabillas, ángulos y pletinas, básicamente; y con el tiempo esta oferta fue ampliándose en variedad y tamaños de sección. Actualmente se emplea extendidamente un perfil de sección cuadrada, mayormente de (100 x 100) mm², como columna en la construcción de edificaciones de vivienda y galpones de tamaño limitados, y también empleándolos en otras aplicaciones.

En virtud de ese uso extendido para los mencionados tubulares y tratando de contribuir a un empleo más adecuado de los mismos se presenta el siguiente trabajo el cual trata de demostrar y justificar el reforzamiento de dichos elementos estructurales, procedimiento que mejoraría el comportamiento mecánico de estos elementos, reduciría costos, propiciaría mejoras en las labores de mantenimiento de las estructuras donde se emplean estos tubulares, aportaría alternativas de solución en ampliación de edificaciones ya construidas.

Además este trabajo pretende servir como referencia para complementar otros trabajos ya desarrollados en este campo en los cuales se planteó la inquietud de determinar posibles deslizamientos, que se supone pueden presentarse entre la camisa o tubo de acero y el núcleo de concreto empleado

como reforzamiento. Bajo ese esquema se plantean dos procedimientos para evitar ese deslizamiento generado por los esfuerzos cortantes propios al efecto de deflexión en la columna, procedimientos que se escogen tomando en consideración las posibilidades de una aplicación práctica, fácil de llevar a cabo, para así hacerlos asequibles a cualquier interesado sin que se requieran equipos costosos o mano de obra especializada.

1.3 ALCANCES

Dado que es notorio que el empleo de perfiles tubulares de acero tiene una aplicación bastante extendida en la construcción de viviendas, edificios, galpones, canchas deportivas, así como también en la realización de ampliaciones de viviendas y otras edificaciones ya construidas, se espera que los resultados del presente trabajo puedan ser difundidos y conocidos dentro del personal técnico que ésta involucrado en ésta área, para que de ésta manera las ventajas que trae consigo el reforzamiento de tubulares de acero pueda ser eficazmente aprovechado y por otra parte, en ese reforzamiento se tiene la ventaja que su implementación resulta muy económica y no se requiere de equipos ni de personal especializado.

Por otra parte se espera también que este trabajo sirva de referencia a otros trabajos similares que puedan desarrollarse dentro de la misma área. Igualmente se aspira que los resultados obtenidos sirvan de base para implementar programas y mejoras en el mantenimiento de estructuras que emplean los elementos tubulares que se consideran en el estudio.

CAPITULO II

MARCO REFERENCIAL

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

2.1 TRABAJOS EN EL ÁREA

En la Escuela de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Los Andes, se han estado realizando investigaciones en el comportamiento de columnas fabricadas tanto de concreto armado como en columnas de acero. De éste último tipo se realizó un trabajo por el ingeniero Jesús P. Flores Vásquez titulado: "Metodología para el Diseño de Columnas Tubulares de Acero Laminado en Frío, con Núcleo de Concreto". Este trabajo consistió en establecer un modelo matemático para el diseño de dichas columnas empleando resultados de ensayos efectuados sobre columnas de 2 metros de longitud con y sin reforzamiento de concreto. Algunos de esos resultados guardan cierta relación con el trabajo aquí presentado, sin embargo debido a la diferencia de espesor de los tubos allí empleados y a la metodología de los ensayos, se puede considerar que se mantiene un cierto margen de independencia con los resultados que aquí se presentan, sin embargo el trabajo citado se puede considerar como un buen patrón de referencia.

2.2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.2.1 MATERIALES Y SUS PROPIEDADES MECÁNICAS

En el diseño y construcción de estructuras y máquinas se debe conocer perfectamente los valores de las fuerzas y momentos que actúan sobre ellas, puesto que estas cargas se traducen en esfuerzos y deformaciones en los elementos estructurales que integran al conjunto estudiado y estos efectos estarán estrechamente ligados a las propiedades mecánicas de los materiales que las conforman, por lo que el diseñador debe hacer uso de sus conocimientos para establecer la magnitud de los esfuerzos y deformaciones que eventualmente pueden presentarse y a su vez definir si el material está en

condiciones de resistir esos esfuerzos o sí la funcionabilidad de la estructura o máquina no queda afectada por las deformaciones que se llegasen a presentar.

En la selección de los materiales se requieren considerar muchas de sus propiedades y determinados factores inherentes a los mismos. Por lo general debe evaluarse la resistencia, rigidez, ductilidad, peso específico, resistencia a la corrosión, soldabilidad, conformabilidad, aspecto, combustibilidad, costo, disponibilidad. De todos estos aspectos mencionados se pueden considerar que para el presente estudio, y en la gran mayoría de los casos, se consideran como más importantes: la resistencia, la rigidez y la ductilidad.

Resistencia: se puede considerar como la capacidad de los materiales para soportar cargas. En las tablas de las propiedades de los materiales y específicamente para los metales siempre se definirán los valores de esfuerzo de fluencia o cedencia y los de esfuerzo último a la tracción, los cuales se obtienen a partir de ensayos de tracción uniaxiales. En el caso de ciertos materiales frágiles las capacidades de soportar cargas de compresión tienen una relevancia muy alta. Al efectuar los ensayos de tracción en materiales y dado que generalmente su comportamiento sigue dos patrones, uno elástico y otro plástico, se determina también el límite de tracción de un factor patrón a otro llamado límite elástico, pero con frecuencia se aproxima este último al valor de esfuerzo de fluencia o cedencia.

Rigidez: es la propiedad que tiene un material para resistir deformaciones en el rango elástico. La rigidez en un material se define en función de su módulo de elasticidad (E) o también llamado módulo de Young. Un material tiene un alto valor de rigidez cuando su deformación en el rango elástico es relativamente muy pequeña.

Ductilidad: Es la capacidad que tiene un material de deformarse en el rango plástico. Ésta propiedad permite al material deformarse antes de fracturarse. Es una característica muy importante en el diseño estructural, puesto que un material dúctil es usualmente muy resistente a cargas de impacto. Tiene además la ventaja de “avisar” cuando va a ocurrir la fractura, al hacerse visible su gran deformación. En este sentido, el acero tiene una alta capacidad de absorber y disipar energía lo que le da mejores condiciones de resistencia y de durabilidad en ciclos repetidos de carga.

La medida de la ductilidad se expresa como un porcentaje del alargamiento cuando se efectúa un ensayo de tracción, al medir la longitud de calibración entre marcas antes y después de la fractura del material.

Para el presente trabajo, y debido a que son los únicos materiales que intervienen, se estudiarán los siguientes:

2.2.1.1 Acero

EL acero es una aleación constituida básicamente por hierro y carbono, y en ciertos casos posee otros elementos como aleantes.

Los elementos básicos empleados en la producción de acero son mineral de hierro, coque y caliza, que son fundidos a 1650 °C en un alto horno y donde una vez cumplidas las condiciones de la mezcla es vaciado y luego laminado para obtener los diferentes productos.

En Venezuela, la producción nacional es obtenida a través de SIDOR, la cual emplea hornos básicos de hogar abierto y hornos eléctricos de ultra alta potencia. En esta industria se producen aceros denominados efervescentes, calmados y semicalmados, dependiendo del grado de desoxidación que desarrolle el acero, lo cual a su vez es una función del oxígeno que se

encuentre en la mezcla al producirse el acero. Los aceros efervescentes presentan la mayor cantidad de oxígeno en la mezcla, los aceros calmados presenta un mínimo nivel de oxígeno de tal manera que no se quiera ninguna reacción química entre el oxígeno y los elementos de aleación.

Los aceros efervescentes son empleados para la producción de aceros laminados, lo cual es la materia prima para la elaboración de productos planos o láminas las cuales son utilizadas por la industria metalmeccánica para la producción de perfiles abiertos y cerrados, propios en la construcción de viviendas y otras aplicaciones.

Una de las características importantes del acero es su homogeneidad, lo cual permite caracterizar sus propiedades y de esta manera poder asegurar su comportamiento único en el diseño.

En el presente trabajo según datos aportados por catálogos del fabricante, (C.A. CONDUVEN 3a ed. Mayo 1998) los tubos estructurales estudiados están constituidos por acero de alta resistencia producidos según la norma ASTM (American Society for Testing and Materials) A500, grado C con una resistencia a la fluencia de 3515 Kgf/ cm² (358,7 MPa) un esfuerzo último de 427 MPa y un porcentaje de elongación de 21 %.

Entre las ventajas del acero como material estructural se encuentran las siguientes:

- Alta resistencia por unidad de peso, lo cual permite la construcción de estructuras relativamente livianas en comparación con otros materiales
- *Elasticidad*: el acero es el material que más se acerca a un comportamiento linealmente elástico, mientras las cargas aplicadas no produzcan esfuerzos que superen el límite de proporcionalidad del material.

- *Precisión dimensional:* los perfiles laminados están fabricados bajo estándares que permiten establecer de manera precisa la propiedad geométrica de la sección.
- *Ductilidad:* permite soportar grandes deformaciones sin que se presente fractura, lo que ayuda a evidenciar las fallas, antes que la estructura o máquina colapse.
- Facilidad de unión con otros miembros mediante soldadura o a través de remaches o tornillos.
- Disponibilidad en diferentes secciones y tamaños, lo que permite optimizar su uso.
- *Reciclable:* el acero es 100 % reciclable y a su vez es degradable lo que reduce la contaminación ambiental.
- *Económico:* en comparación con otros materiales es de un costo relativamente bajo.

Se puede mencionar adicionalmente que se presentan ciertas desventajas en el uso del acero, entre estas las más relevantes son su corrosión rápida cuando queda expuesto a la intemperie y no se protege empleando esmaltes alquidáticos o anticorrosivos (se exceptúa de esta característica a los aceros inoxidables). Otra desventaja es que en el caso de incendios el calor se propaga rápidamente por las estructuras y al alcanzarse altas temperaturas su comportamiento se hace muy plástico y su resistencia se reduce drásticamente.

2.2.1.2 Concreto:

El concreto es un material heterogéneo formado por dos componentes agregados y cemento. El cemento se puede considerar como una pasta formada por cemento Pórtland y agua, la cual recubre a todas las partículas agregadas y una vez cerrada queda aglutinada de manera segura.

Algunas de las variables que intervienen en la determinación de la resistencia del concreto son tipo y cantidad de cemento utilizado; tipo, cantidad y tamaño del agregado y cantidad de agua añadida.

La proporción entre el cemento y el agua definen la resistencia del concreto, a mayor cantidad de cemento se aumenta su resistencia o a menor cantidad de agua también, pero se debe agregar cierta cantidad mínima de agua para que la pasta se forme y recubra eficientemente los agregados y se pueda manejar con comodidad. Una vez vaciado o modelado el concreto, el material va adquiriendo con el tiempo una alta resistencia a la compresión, aunque posee una baja resistencia a la tracción. Se considera que su resistencia a la compresión se logra mediante ensayo que se efectúa sobre cilindros a los 28 días de vaciado. La falla se produce debido a la aparición de grietas orientadas diagonalmente con respecto a la dirección de aplicación de la carga.

En Venezuela se establecen las diferentes composiciones de la mezcla siguiendo las recomendaciones del “Manual del concreto Fresco” o en otros casos las recomendaciones del A.C.I. (American Concrete Institute). En función de ellas se pueden obtener concretos con resistencias que pueden ir de 15 MPa a 100 MPa. También es muy común emplear aditivo en su preparación para lograr comportamientos especiales tanto en su manejo como en sus propiedades.

Independiente de su resistencia se puede considerar que la deformación unitaria en el concreto es de 0,2% o 0,002, aunque antes de la falla puede alcanzar valores de hasta 0,004. Su módulo de elasticidad es establecido según normas del ACI en $15000 \sqrt{f'_c}$ (F'_c = esfuerzo de rotura en compresión a los

28 días de curado). La resistencia a la tracción es de aproximadamente 8% a 12% de su resistencia a la compresión, con frecuencia se toma como 1,33 a 1,99 veces la raíz cuadrada de su resistencia a la compresión. Su resistencia al corte puede variar entre el 35% al 80% de su resistencia a la compresión, el valor de la relación de Poisson se encuentra entre 0,15 y 0,20 tomándose comúnmente un valor de 0,20. Muchas de estas propiedades están intrínsecamente relacionadas a la proporción agua-cemento de la mezcla.

2.2.2 ELEMENTOS DE SECCIÓN COMPUESTA

Las fórmulas de flexión se aplican normalmente a elementos que se consideran constituidos por un material homogéneo por lo que cuando se dispone de elementos formados por dos o más materiales diferentes se debe proceder a obtener un elemento de sección equivalente formado por un único material, con un comportamiento similar frente a las cargas y deformaciones, efectuando ciertas transformaciones a la sección original.

Para entender el concepto se considera que originalmente se dispone de un elemento de sección transversal A_0 , con las dimensiones indicadas en la figura N° 2.1 y cuyo módulo de elasticidad vale E_0 . Luego se quiere obtener un elemento de área de sección transversal que posea un comportamiento similar frente a las cargas y deformaciones pero formado por otro material de módulo de elasticidad E_t , de acuerdo a lo que se plantea en la figura N° 2.1.

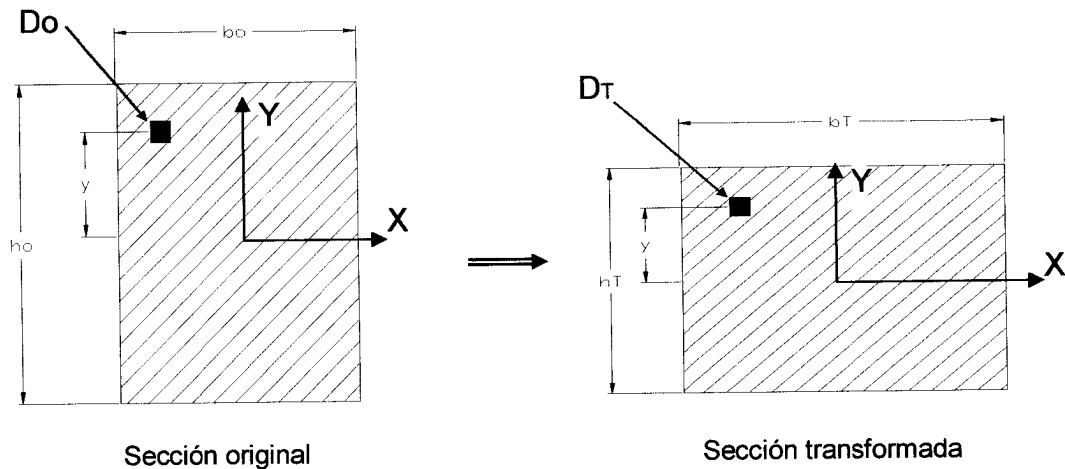


Figura N° 2.1 Elementos de sección compuesta

Al considerar un diferencial de área D_T situado a una misma distancia “y” del eje X (eje neutro para la viga), y estableciendo que se cumple la ley de Hooke: $\sigma = E \cdot \varepsilon$, al existir equivalencia en las deformaciones unitarias ($\varepsilon_T = \varepsilon_o$), se tiene:

$$\frac{\sigma_T}{E_T} = \frac{\sigma_o}{E_o} \quad \text{y despejando:}$$

$$\sigma_o = \frac{E_o}{E_T} \sigma_T \quad (A)$$

También como debe existir una equivalencia en función de las cargas, debido a que las deformaciones unitarias se mantienen constantes, se puede establecer que para la fibra D, $P_o = P_E$ (o para la carga longitudinal de la sección), entonces se puede escribir que:

$$\sigma_o \cdot A_o = \sigma_T \cdot A_T \quad \text{y sustituyendo el valor de } \sigma_o \text{ de la relación (A)}$$

$$A_T = \frac{E_o}{E_T} A_o$$

Esta última relación permite encontrar el valor del área equivalente en función de los módulos de elasticidad. Luego considerando áreas rectangulares donde $A = b \cdot h$ se dispondrán de infinitas combinaciones en función de las dimensiones de b y h para obtener áreas equivalentes para el caso de secciones rectangulares. Ahora considerando que se quiere obtener una solución particular, partiendo que $h_T = h_o$, se obtiene:

$$b_T = \frac{E_o}{E_T} \cdot b_o$$

Esta es la condición básica y elemental para encontrar secciones equivalentes donde se mantiene constante la altura de la sección.

Una vez conocido el procedimiento de transformación de las dimensiones originales de una sección, se desea encontrar secciones equivalentes, y esto se aplica para convertir secciones no homogéneas, conformadas por diferentes materiales en secciones equivalentes conformadas por un solo tipo de material. Para esto se deben mantener las dimensiones en la sección de uno de los materiales en forma invariable y luego se deben encontrar secciones equivalentes para los demás materiales, con el módulo de elasticidad del material que se desea mantener invariable y de esa manera se obtiene finalmente una sección equivalente conformada por un único material y para, así de esta forma, poder aplicar las fórmulas de flexión deducidas para esta condición de homogeneidad.

Por último, para encontrar los esfuerzos en cada uno de los materiales originales se aplica de nuevo la ecuación (A) una vez que se conocen u obtienen los esfuerzos en los puntos respectivos de las secciones equivalentes o transformadas, situados a las mismas distancias” y” para cada sección.

Esta base teórica tiene por objetivo poder trabajar con secciones transversales de elementos estructurales formados por diferentes materiales. En el caso del presente trabajo se requiere aplicarla para los tubos de acero que han sido reforzados con concreto.

2.2.3 TEORÍA DE COLUMNAS

2.2.3.1 Introducción

Las columnas son elementos estructurales de cierta longitud que se emplean para soportar cargas axiales de compresión.

Se pueden clasificar en largas, cortas e intermedias. Normalmente las largas son aquellas que presentan fallas debido a flexión, las cortas fallan por aplastamiento y las intermedias fallan por combinación de flexión y aplastamiento.

Idealmente las columnas se pueden considerar como elementos de material homogéneo, con una sección recta constante, que soportan cargas de compresión aplicadas sobre el eje centroidal; sin embargo en la práctica esto no sucede así pues generalmente la aplicación de las cargas posee cierta excentricidad respecto al eje centroidal, y por otra parte, el eje neutro real de la columna no es necesariamente siempre recto debido a las imperfecciones que se presentan en el material y en el proceso de fabricación del elemento. La figura N° 2.2 muestra algunos de estos detalles mencionados

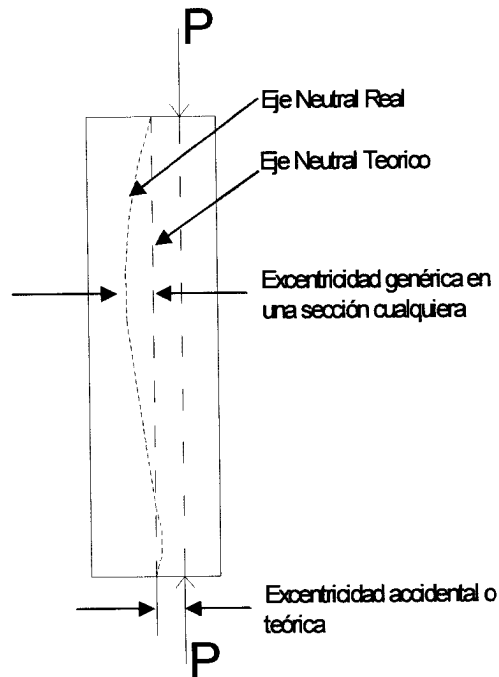


Figura N° 2.2 Esquema de columna

Cuando se dispone de un elemento corto y la excentricidad es pequeña la flexión lateral será despreciable, pero a medida que la longitud del elemento es mayor la flexión aumenta considerablemente, ya que las deflexiones son proporcionales al cubo de la longitud del elemento, y para un valor pequeño de carga pueden presentar valores de esfuerzos de flexión bastante elevados. (Ver Singer y Pytel, *Resistencia de Materiales*, 3ª. Ed., p 357)

2.2.3.2 Carga crítica

Se entiende por carga crítica en la columna, al valor de carga que hace que el sistema pase de un estado de equilibrio estable a un equilibrio inestable y en consecuencia se presenta el colapso del mismo. Para entender de una forma muy resumida este concepto se observa en la figura N° 2.3:

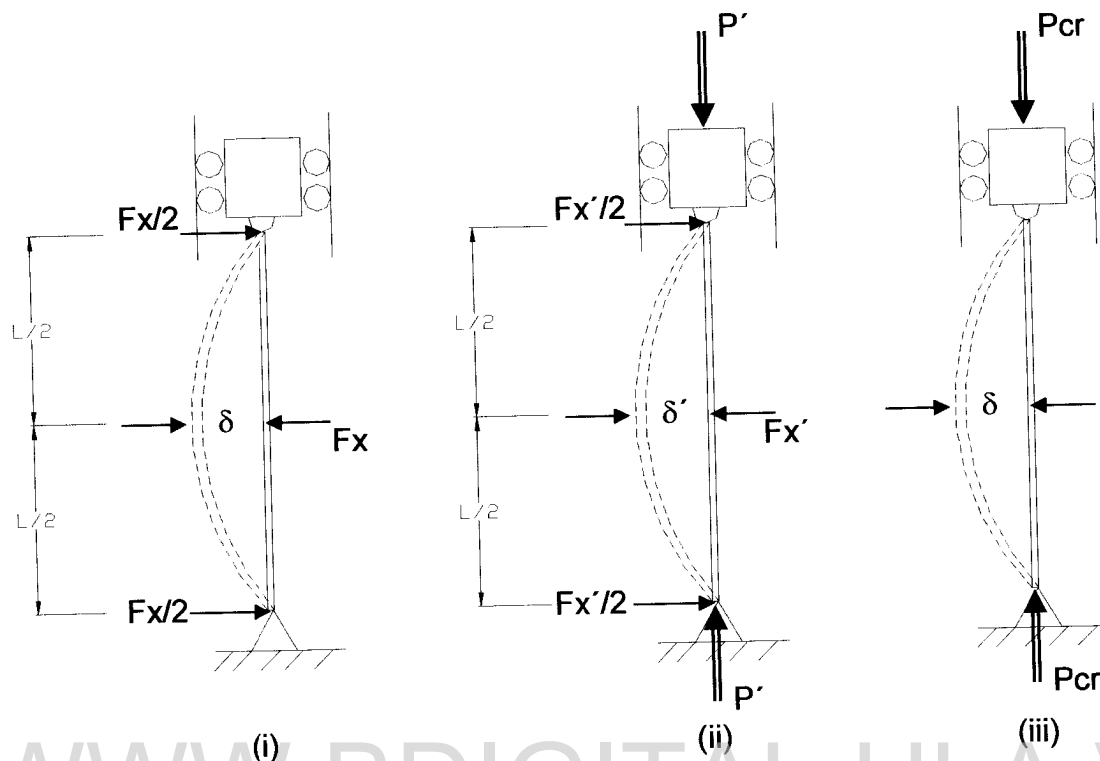


Figura N° 2.3 Carga crítica en una columna

En el caso (i) la deflexión δ se debe a la carga horizontal F_x , el elemento se comporta como una viga donde la deformación δ depende del momento flector, que para el punto medio valdría: $M = \frac{F_x}{2} \times \frac{L}{2}$

Para el caso (ii) se desea mantener constante el valor de deformación δ , esto se logra manteniendo el momento flector constante, por lo que se reduce el valor de F_x a $F_{x'}$ y se compensa esta reducción al aplicar la carga P' . El momento en el punto central valdrá:

$$M = \frac{F_{x'}}{2} \times \frac{L}{2} + P' \times \delta$$

Para el caso (iii) se reduce el valor de F_x a cero y se mantiene el valor del momento flector constante, al aumentar la carga axial P' a un valor P_{cr} , entonces:

$$M = P_{cr} \cdot \delta$$

De esta ecuación se observa que si el valor de P_{cr} aumentase un valor muy pequeño esto se traduciría en aumentos de M que a su vez conducirían a aumentos de δ , entrándose a un ciclo progresivo de aumentos de M y δ que conducirían al colapso del elemento. Es por lo anterior que a P_{cr} se le conoce como carga crítica en la columna.

2.2.3.3 Análisis de EULER para columnas largas

La base de la teoría de columnas fue presentada en 1757 por el matemático suizo Leonhard Euler, quién realizó un análisis teórico de la carga crítica aplicada a columnas esbeltas. Este análisis está basado en la ecuación diferencial de la elástica para un elemento de cierta longitud donde:

$$EI * \frac{d^2 y}{dx} = M$$

E = Módulo de elasticidad ; M = Momento flector

I = Momento de inercia de la sección

En el caso de las columnas, el momento tal como se planteó, se puede generalizar de la siguiente manera:

$$M = M(x) = -P.Y$$

P = carga axial

Y = deflexión

Y substituyendo M

$$EI \frac{d^2 y}{dx^2} = -P.Y$$

Esta es una ecuación diferencial de segundo grado homogénea con coeficiente constante, cuya solución es:

$$Y = C_1 \text{sen}\left(\sqrt{\frac{P}{EI}} X\right) + C_2 \text{cos}\left(\sqrt{\frac{P}{EI}} X\right)$$

A partir de las condiciones de borde, para $x = 0, y = 0$, se encuentra que $C_2 = 0$ por lo que:

$$\text{sen}\left(\sqrt{\frac{P}{EI}} .L\right) = 0 \text{ y entonces: } P = \frac{n^2 \pi^2 .EI}{L^2}$$

Y donde el valor mínimo de P hallado se le conoce como carga crítica de Euler.

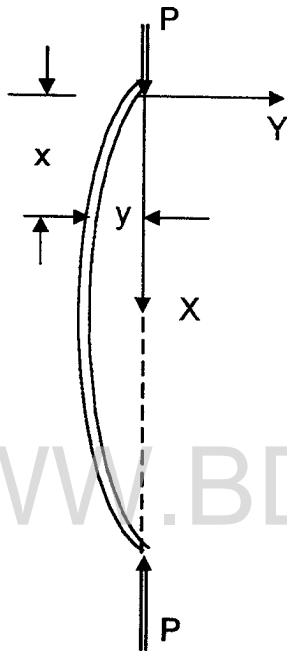


Figura N° 2.4 Elástica de la columna

Haciendo también para $x = \frac{L}{2}, \frac{dy}{dx} = 0$ se obtiene que $C_1 = \delta$.

El valor de P_{cr} hallado se puede generalizar para otros tipos de apoyos considerando al valor de L con un valor L_e (Longitud equivalente) donde, L_e es igual a L en columnas con extremos articulados como en el caso planteado. Cuando la columna tiene extremos doblemente empotrados el valor de L_e se hace igual a $L/2$. Con extremos empotrado y libre (Columna Mástil) $L_e = 2L$ y con extremos articulado y empotrado $L_e = 0.707L$. Estos valores se hallan

determinando los puntos de inflexión de la elástica de la columna, en estos puntos el momento es nulo y luego se aplica una analogía a la columna con extremos doblemente articulados.

Las fórmulas obtenidas (análisis de Euler) son válidas mientras los esfuerzos no sobrepasen el límite de proporcionalidad del material. El caso extremo se presenta cuando la relación P/A alcanza el esfuerzo de fluencia o cedencia (σ_{pc}). En estas condiciones:

$$P = \frac{\pi^2 \cdot EI}{Le^2} \quad \text{y como} \quad I = r^2 \cdot A \quad r = \text{radio de giro}$$

$$A = \text{Área de la sección}$$

$$\frac{P}{A} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot r^2}{Le^2} = \frac{\pi^2 \cdot E}{\left(\frac{Le}{r}\right)^2} ; \quad \frac{Le}{r} = \text{Relación de esbeltez}$$

$$\left(\frac{Le}{r}\right)_{\min} = \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E}{\sigma_{pc}}}$$

A este valor se le conoce como la relación de esbeltez mínima del material, valor a partir del cual se considera válido el análisis de EULER.

2.2.3.4 Pandeo inelástico en columnas

Al aplicar el análisis de Euler se encontró:

$$\frac{P}{A} = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{Le}{r}\right)^2}$$

Al graficar los valores de P/A en función de Le/r se obtiene la siguiente curva llamada comúnmente la hipérbola de Euler:

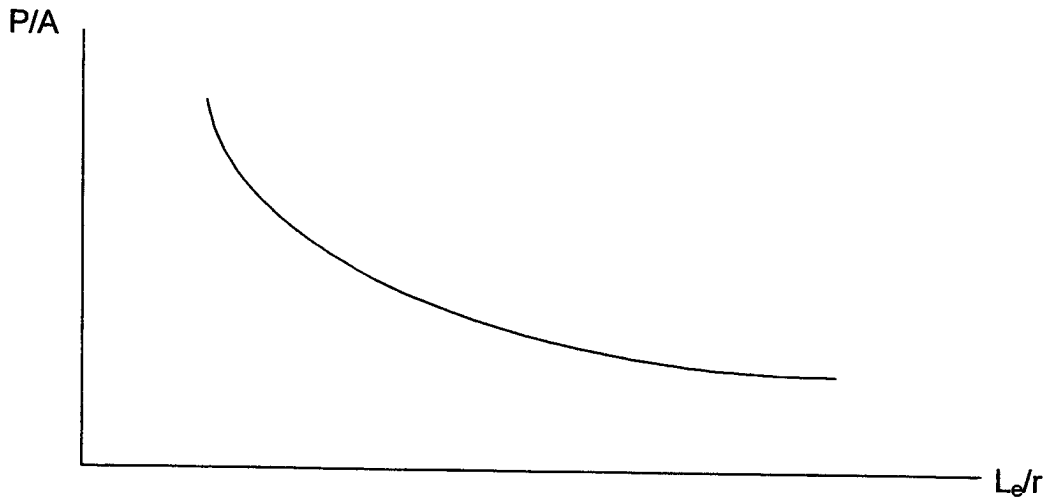


Gráfico 2.1 Hipérbola de Euler

Ahora como en el análisis de Euler los esfuerzos deben mantenerse en el rango elástico se considera entonces que:

$\sigma_{crit} \leq \sigma_{flu}$ por lo que haciendo

$$P/A = \sigma_{flu}$$

$$\sigma_{crit} = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{Le}{r}\right)^2}$$

En la práctica se conoce que para todos los materiales y especialmente para el acero los esfuerzos de fluencia o cedencia obtenidos en ensayos de laboratorio son mayores que los correspondientes a los de elementos contruidos a partir de materiales comerciales, pues los primeros están libres de esfuerzos residuales mientras que debido a los procesos de laminación y también por defectos de fabricación, los materiales comerciales mantienen ciertos esfuerzos residuales de valores significativos, según recomendaciones

del Structural Stability Research Council (SSRC) vease Gere-Timoshenko (1984) *Mecánica de Materiales*:

$$(\sigma_{flu})_{real} = 0,5(\sigma_{flu})_{Teórico}$$

Por lo que para hallar la mínima relación de esbeltez (Cc) para materiales comerciales se toma:

$$\frac{\sigma_{flu}}{2} = \frac{\pi^2 E}{Cc^2}$$

$$Cc = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{\sigma_{flu}}}$$

Y luego el esfuerzo admisible (σ_{adm}) se halla aplicando:

$$\sigma_{adm} = \frac{\pi^2 E}{F.S. \left(\frac{Le}{r}\right)^2}$$

donde F.S. = Factor de seguridad

Para relaciones de esbeltez (Le/r) mayores al valor de Cc definido, el AISC (American Institute of Steel Construction) considera F.S. = 23/ 12 = 1,92 para esos valores, se considera que la columna se mantiene dentro del rango elástico.

Para valores de relación de esbeltez menores al valor Cc definido, el pandeo ocurre dentro del rango inelástico; el AISC considera que el factor de seguridad F.S. debe ser menor, pues la posibilidad de pandeo se reduce y el valor del esfuerzo admisible (σ_{adm}) se halla aplicando:

$$\sigma_{adm} = \left[1 - \frac{(Le/r)^2}{2Cc^2} \right] * \frac{\sigma_{flu}}{F.S.}$$

Y donde:

$$F.S. = \frac{5}{3} + \frac{3(Le/r)}{8Cc} - \frac{(Le/r)^3}{8Cc^3}$$

Al graficar estos esfuerzos sobre la curva (hipérbola) Euler se obtiene:

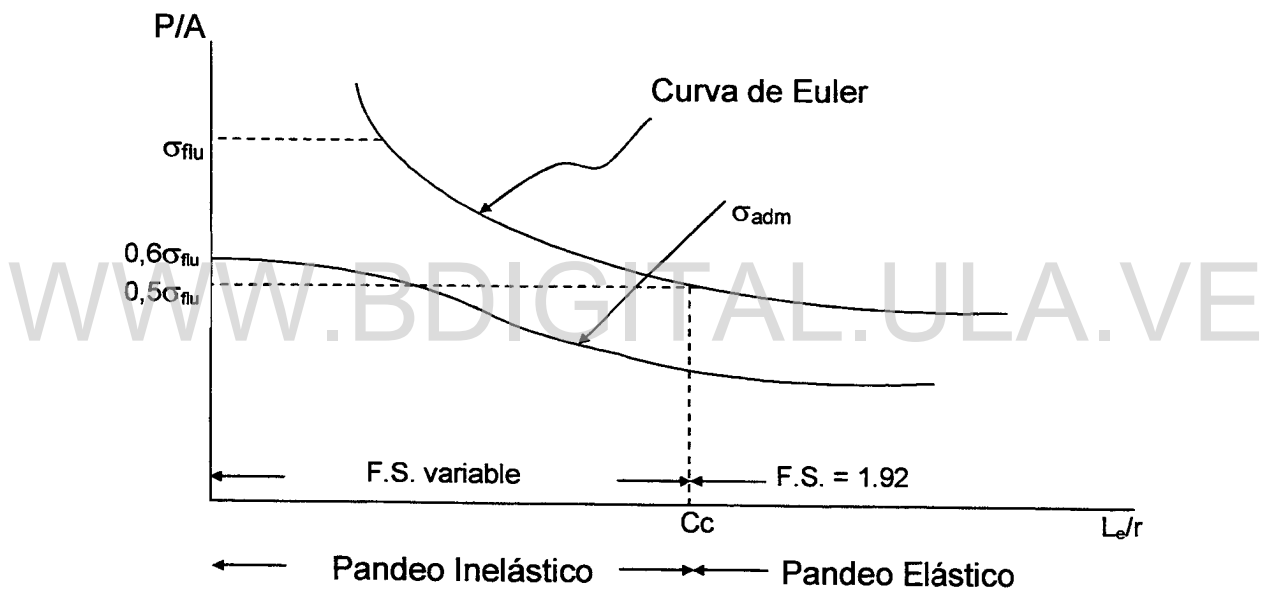


Gráfico 2.2 Esfuerzos en función de L_e/r

2.2.3.5 Fórmula de la Secante

Una de las características que se presentan con mucha frecuencia en las columnas es el hecho de que estas soportan cargas excéntricas y una manera de efectuar su análisis es el de aplicar la “Formula de Secante”, la cual es una expresión teóricamente correcta para columnas cargadas excéntricamente. A

continuación se explica este análisis, considerando una generalización del análisis de Euler aplicado a una columna de longitud λ doblemente articulada con carga axial P tal como se muestra:

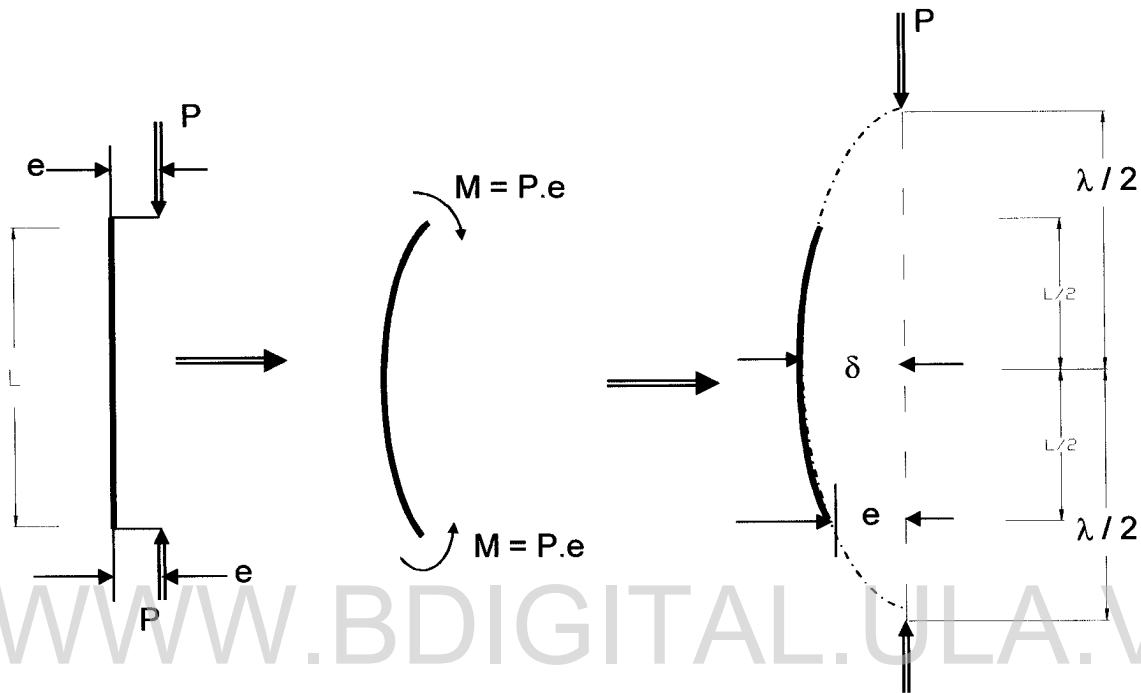


Figura N° 2.5 Esquema de columna con carga excéntrica

En función del gráfico indicado se puede considerar que la columna de longitud L , es una parte de una columna de longitud λ , doblemente articulada y para esta última se puede aplicar el análisis de Euler donde:

$$y = \delta \cdot \text{sen} \left(x \sqrt{\frac{P}{EI}} \right) \quad \text{y donde:}$$

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{Le^2} \quad \text{y} \quad Le = \lambda$$

Ahora sí se cambia el origen del sistema de referencia al punto medio de la elástica, se puede expresar a esta última por la siguiente expresión:

$$y = \delta \cos\left(x\sqrt{\frac{P}{EI}}\right) \text{ y como } \frac{\pi^2}{\lambda^2} = \frac{P}{EI}$$

$$y = \delta \cdot \cos\left(x\frac{\pi}{\lambda}\right) \text{ y de acuerdo a la figura N° 2.5 para } x = L/2 \text{ el}$$

valor de $y = e$, donde "e" es la excentricidad de la carga respecto al eje centroidal:

$$e = \delta \cdot \cos\left(\frac{L\pi}{2\lambda}\right), \text{ despejando } \delta:$$

$$\delta = \frac{e}{\cos\left(\frac{L\pi}{2\lambda}\right)} \text{ y sustituyendo el valor de } \delta:$$

$$y = e \frac{\cos\left(\frac{x\pi}{\lambda}\right)}{\cos\left(\frac{L\pi}{2\lambda}\right)} \quad (B)$$

Luego para hallar el valor de λ se sabe que:

$$P = P_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot EI}{\lambda^2} \quad \lambda = \pi \sqrt{\frac{EI}{P_{cr}}}$$

$$\frac{\pi}{\lambda} = \sqrt{\frac{P}{EI}} \text{ y sustituyendo en (B):}$$

$$y = e \frac{\cos\left(x\sqrt{\frac{P}{EI}}\right)}{\cos\left(\frac{L}{2}\sqrt{\frac{P}{EI}}\right)}$$

$$\text{Y como } \frac{d^2y}{dx^2} = \frac{M}{EI} \text{ y } M_{\text{Max}} \text{ ocurre en } x = 0$$

$$\frac{d^2y}{dx^2} = -\frac{P.e.\cos\left(x\sqrt{\frac{P}{EI}}\right)}{EI.\cos\left(\frac{L}{2}\sqrt{\frac{P}{EI}}\right)} = \frac{M}{EI}$$

Y para $x = 0$

$$M = -\frac{P.e}{\cos\left(\frac{L}{2}\sqrt{\frac{P}{EI}}\right)} = -P.e.\sec\left(\frac{L}{2}\sqrt{\frac{P}{EI}}\right)$$

Ahora como el esfuerzo máximo se sabe que se presenta donde el momento es máximo, esto ocurre en $x = 0$; y se puede considerar que el esfuerzo resultante de una combinación de esfuerzo por carga axial y por flexión:

$$\sigma_{\max} = \frac{P}{A} + \frac{M.C}{I} \quad \text{y como } I = r^2 \cdot A,$$

Donde: A = Área de la sección I = Momento de inercia
 C = Dist. Max. de flexión r = Radio de giro

$$\sigma_{\max} = \frac{P}{A} + \frac{M}{r^2 \cdot A}$$

Y substituyendo el valor de M hallado (en valor absoluto)

$$\sigma_{\max} = \frac{P}{A} + \frac{P.e.\sec\left(\frac{L}{2}\sqrt{\frac{P}{EI}}\right)}{r^2 \cdot A}$$

$$\sigma_{\max} = \frac{P}{A} \left[1 + \frac{P.e.C.\sec\left(\frac{L}{2r}\sqrt{\frac{P}{EA}}\right)}{r^2} \right]$$

A esta expresión se le conoce como fórmula de la secante y si se quiere hallar la carga de trabajo que se le puede aplicar a la columna se toma $\sigma_{\max} = \sigma_{\text{plu}}$ donde σ_{flu} = esfuerzo de fluencia o de cedencia y P_t = carga de trabajo:

$$P_T = \frac{\sigma_{\text{flu}}}{FS} \cdot A \quad , \text{ donde } FS = \text{Factor de seguridad } (>1)$$

La fórmula de la secante es una expresión teóricamente exacta, el único inconveniente en su empleo es el que su solución relativamente incómoda pues se debe proceder aplicando un método iterativo para llegar a los resultados que se requieren normalmente.

2.2.4 CRITERIOS DE DISEÑO

Una estructura se puede considerar confiable y técnicamente aceptable si satisface todos los requisitos de seguridad y funcionamiento que se requieren en el diseño.

La seguridad exige que las cargas de diseño sean soportadas de manera adecuada durante toda la vida útil de la estructura.

Para lograr esto se deben tomar en cuenta los comportamientos estáticos y dinámicos a que va a estar sometida dicha estructura y efectuar un análisis tomando en cuenta los comportamientos mencionados.

La vida útil de la estructura puede cambiar si cambian las condiciones de diseño o si se llega a presentar alguna falla. Las fallas pueden presentarse en función de la capacidad de servicio o en función de la capacidad de la resistencia.

Normalmente las cargas de trabajo se establecen en función de ciertos requisitos o normas que se aplican de acuerdo al uso o función de la estructura.

Es común que como criterio se adopte el que la resistencia mínima del material sea mayor a la carga de diseño máxima y para esto se establecen los factores de seguridad o de carga, siempre mayores a la unidad, teniéndose entonces que:

$$\sigma_{trabajo} = \frac{\sigma_{fluencia}}{F.S.} \quad \text{donde } F.S. = \text{Factor de Seguridad} > 1$$

A esta última condición se le conoce como criterio de fluencia y es uno de los métodos más antiguos y simples que se disponen. Tiene como limitante el que se aplica particularmente a materiales de comportamiento dúctil.

Otro criterio que se aplica con frecuencia, básicamente a ciertos materiales de comportamiento frágil como el concreto, aceros de alta resistencia, aleaciones de aluminio, etc, es el criterio de plasticidad. Este criterio se basa en el hecho de que al alcanzarse el esfuerzo de fluencia en una determinada región o elemento en una estructura, esta situación no significa que la estructura o el elemento llegue a fallar o la función de la estructura no se cumpla. Esto se debe a que la fluencia local en un punto no produce automáticamente un flujo plástico en ese punto y por lo general lo que ocurre es una redistribución de las cargas sobre los demás elementos que conforman la estructura.

Otros criterios empleados en ciertos casos son el criterio de fractura, el cual trata de prevenir la fractura empleando materiales de alta tenacidad al entalle para prevenir la presencia de la fractura frágil, que es la que ocurre después de una apreciable deformación plástica.

También se emplea el criterio de inestabilidad, el cual con frecuencia se emplea en el caso de diseño de columnas largas o esbeltas. Los detalles de este criterio se tratan en el punto 2.3 ya estudiado.

También se emplea como criterio de diseño el criterio por fatiga, empleado cuando algún elemento de la estructura o parte de una máquina es sometido a una serie de ciclos de carga y descarga en números muy elevados (mayores de 10.000 ciclos), al aplicar este criterio se pueden emplear dos procedimientos uno basado en el concepto de “duración de seguridad” y otro basado en el “límite de falla”. En el primero se requiere que no se presenten grietas por fatiga y para esto se toman todas las previsiones del caso. El segundo debe garantizar que la propagación de las grietas no conducirá a una falla estructural, basándose en los criterios de “Mecánica de Fractura”.

Un último criterio se puede considerar como el “criterio de deformación” en el cual las deformaciones que se presentan debido a las cargas de trabajo poseen cierto límite a partir del cual las mismas deben evitarse, considerándose como patrones o criterios de control en el diseño.

2.2.5 TEORÍAS DE FALLA

2.2.5.1 Introducción

Tal como se describió en el punto anterior la falla de un elemento o parte de una estructura o máquina ocurre cuando la pieza en cuestión no es capaz de soportar las cargas a las que está sometida. Esta falla puede estar relacionada con causas tales como deformación excesiva, agrietamientos, inestabilidad que conduce al colapso repentino de la estructura, etc., sin embargo se puede decir

que en un porcentaje muy alto, las fallas de los elementos ocurren debido a que se alcanzan estados de esfuerzo que sobrepasan la capacidad resistiva propia del material.

No obstante, a pesar de la gran cantidad de investigaciones relacionadas actualmente no se disponen de conocimientos o metodologías precisas que determinen la naturaleza exacta de la falla de un material, aunque se sabe que los niveles de esfuerzo, la rapidez de aplicación de las cargas, el número de ciclos de carga, la temperatura, los defectos del material, etc. y otros factores que difieren de acuerdo al material empleado, tienen una gran incidencia sobre las fallas que puedan presentarse, sin embargo las teorías de falla que se consideran en éste trabajo no toman en cuenta a todos los factores que influyen sobre la falla y sólo se concentran en tratar de identificar las componentes de esfuerzo para un estado general, bajo ciertas condiciones limitadas.

En ciertos elementos estructurales, por ejemplo vigas y columnas, en los que el estado de esfuerzo en puntos críticos es uniaxial simple, las condiciones de falla del material pueden corresponder simplemente al esfuerzo uniaxial máximo en el elemento, el cual debería ser igual al esfuerzo de fluencia del material. En otros casos, donde se presentan estados de esfuerzo más generales que conlleven a situaciones de esfuerzos combinados, la falla del material es un asunto mucho más complicado.

En las teorías fundamentales, la falla de un material en un punto se clasifica normalmente como falla dúctil o falla frágil. La falla dúctil de un material involucra la fluencia del mismo y estados de deformación inelásticos, esta condición no significa necesariamente la falla total o ruptura de la pieza. La falla frágil de un material implica una separación del material no precedida por deformaciones inelásticas o en algunos casos elásticas. En este tipo de falla no se toman en cuenta las teorías fundamentales de fallas.

2.2.5.2 Clasificación de las teorías de falla

En diferentes épocas se han planteado diversas teorías que tratan de explicar o justificar la presencia de la falla en un material. Cada una de ellas propone un criterio para relacionar la causa de la falla con un estado determinado de esfuerzo. Entre estas teorías se tienen:

2.2.5.2.1 Teoría del esfuerzo normal máximo

Esta teoría fue propuesta por Rankine (1802 –1872), esta establece que la falla en un material ocurre, para un estado cualquiera de esfuerzos, cuando el esfuerzo principal de mayor magnitud alcanza un valor crítico, o en otras palabras el esfuerzo máximo alcanza el esfuerzo de falla del material. Esta teoría de acuerdo a la experiencia es muy válida para predecir falla en materiales frágiles como el concreto, vidrio, fundición, etc; sin embargo no es aplicable a materiales de comportamiento dúctil como el acero.

2.2.5.2.2. Teoría del esfuerzo cortante máximo

Esta teoría fue propuesta por Coulomb en 1773 y por Tresca en 1868. Establece que la falla de un material por fluencia ocurre para un estado cualquiera de esfuerzos cuando el esfuerzo cortante máximo absoluto alcanza un valor crítico. Este valor crítico del esfuerzo cortante es el que existe en una probeta de un material sometido a ensayo de tracción cuando comienza la fluencia del material. De acuerdo a las ecuaciones que definen el esfuerzo en un determinado plano o en función del método gráfico del círculo de Mohr, se obtiene que el esfuerzo cortante máximo ocurre, en una probeta sometida a

tracción, para un plano de 45° con el eje longitudinal de la probeta y viene dado por :

$$\tau_{flu} = \frac{\sigma_{flu}}{2} , \text{ donde } \sigma_{flu} = \text{Esfuerzo e fluencia en tracción}$$

Normalmente el esfuerzo cortante máximo absoluto en materiales dúctiles es ligeramente mayor que el τ_{flu} , ya definido, por lo que esta teoría es bastante aproximada para predecir la fluencia en materiales dúctiles y es ligeramente conservativa por lo que se aplica con mucha frecuencia y además es también muy simple de aplicar.

2.2.5.2.3 Teoría de la energía máxima de distorsión

Esta teoría fue formulada por Huber en 1904, Von Mises en 1913 y Hencky en 1925 y establece que la falla por fluencia está asociada con valores críticos de una determinada porción de la energía de deformación por unidad de volumen del material en un determinado punto sometido a un estado triaxial de esfuerzos. Para comprender esta teoría se puede emplear la figura N° 2.6:

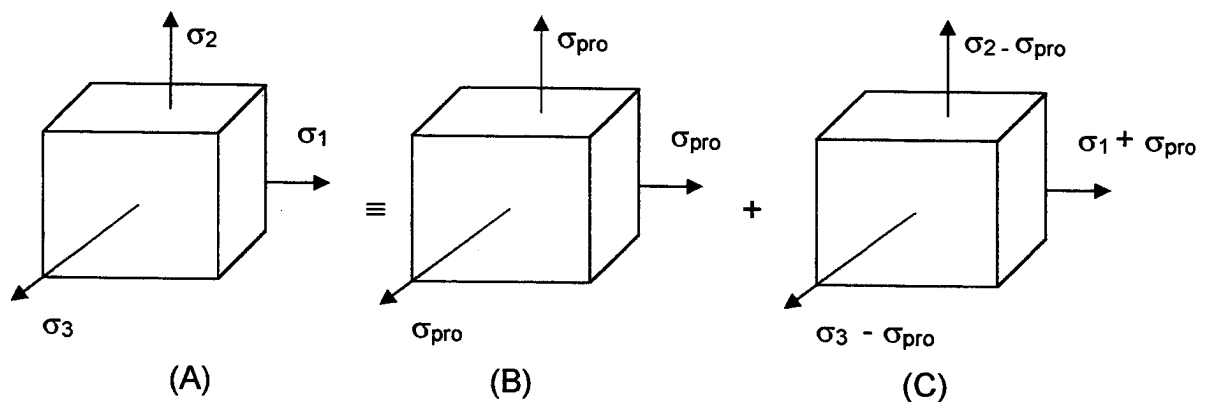


Figura N° 2.6 Superposición de esfuerzos máximos

donde: $\sigma_{pro} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{2}$ (esfuerzo promedio)

El estado de esfuerzos (A) se puede considerar como la superposición de los estados de esfuerzo (B) y (C). El estado de (B) corresponde a un estado de esfuerzos hidrostático. Este estado produce una deformación unitaria uniforme en cualquier dirección. El estado (C) produce distorsión en el paralelepípedo. La teoría supone que un estado de fluencia es producto únicamente de los esfuerzos que generan la distorsión, en este caso el estado (C), y la falla ocurre cuando la energía asociada a este estado alcanza un valor crítico.

El valor de la energía de deformación que produce distorsión para un estado general de esfuerzos en función de los esfuerzos principales viene dado por:

$$U_{dist} = \frac{1+\nu}{6E} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2]$$

Luego igualando esta a la energía de deformación por unidad de volumen de un elemento sometido a un esfuerzo de tracción donde $\sigma_1 = \sigma_{flu}$ y $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$, se obtiene:

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 = 2(\sigma_{flu})^2$$

Donde E = Módulo de elasticidad

ν = Constante de la relación de Poisson

$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ = esfuerzos normales principales

σ_{flu} = Esfuerzo de fluencia

¹ Mecánica de los sólidos por Egor Popov, pag. 143 Edit Limusa México 1982

Las expresiones donde ocurre la falla por fluencia en materiales dúctiles indican una buena correlación con el criterio de la energía máxima de distorsión. Este criterio se aplica extensamente para predecir la fluencia en materiales dúctiles sometidos a estados generales de esfuerzo.

2.2.5.2.4 Teoría del esfuerzo cortante octaédrico

Esta teoría conduce exactamente al mismo criterio de falla que la teoría de la energía máxima de distorsión, pero se basa en el esfuerzo cortante octaédrico, el cual es el esfuerzo cortante que se presenta en un plano cuyo eje perpendicular forma ángulos iguales con las direcciones de los esfuerzos principales tal como se muestra en la figura N° 2.7.

El esfuerzo cortante en ese plano viene dado por la siguiente relación:

$$\tau_{oct} = \frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2]^{1/2}$$

La teoría del esfuerzo cortante octaédrico, supone que los esfuerzos cortantes influyen en la fluencia del material en un punto, ya que esta comienza cuando los esfuerzos τ_{oct} alcanzan el valor del esfuerzo cortante máximo que se presenta cuando se presenta el esfuerzo de fluencia obtenido en una probeta sometida a tracción, por lo que al final el resultado se da cuando se iguala el valor de τ_{oct} al de $\sigma_{flu} / 2$ y se llega al mismo resultado que el indicado en el punto anterior.

² Resistencia de Materiales por Willians – Easley – Rolfe. Ed Mc Graw Hill. Pag 307

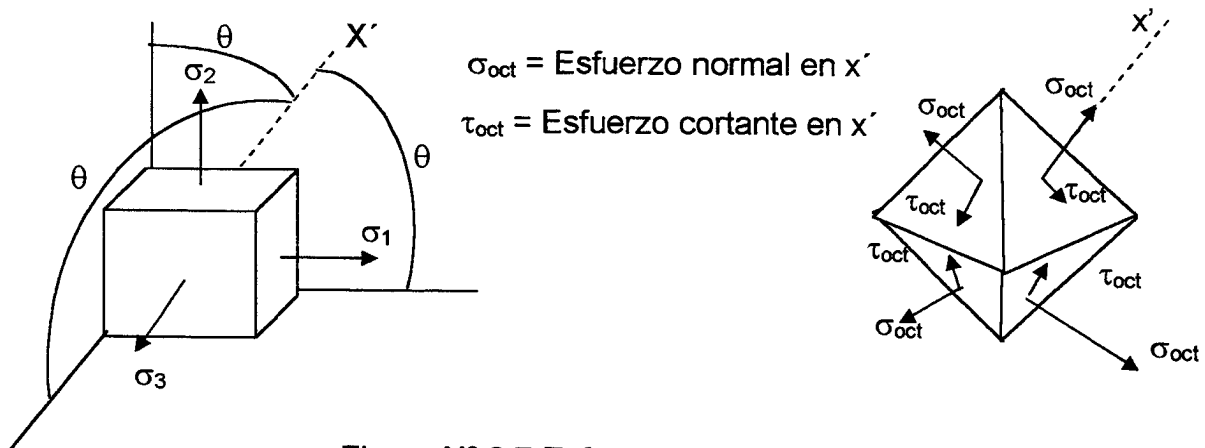


Figura N° 2.7 Esfuerzo cortante octaédrico

2.2.6 FATIGA

Cuando se le aplica carga a un material y no se excede el límite elástico, el material recupera sus condiciones originales al cesar la carga; esta característica se puede decir que se cumple muchas veces mientras los ciclos de carga puedan repetirse decenas y quizás centenas de veces, pero cuando los ciclos se repiten miles o millones de veces, la afirmación hecha no se cumple.

En estos casos se presentará la falla o ruptura de la pieza a esfuerzos muy por debajo de los valores alcanzados que cuando se aplica la carga estática de ruptura de la pieza. A este fenómeno se le conoce como *fatiga*. Normalmente la falla por fatiga es aquella donde se presenta una falla debida a una fractura frágil, aún en materiales dúctiles.

La fatiga debe ser considerada en el diseño de los elementos de máquina y de estructuras que van a estar sometidos a cargas repetidas o fluctuantes. El número de ciclos de carga que pueda esperarse durante la vida útil de un componente es muy variable, por ejemplo la viga de un puente puede cargarse varios millones de veces. Si se supone por ejemplo que puede

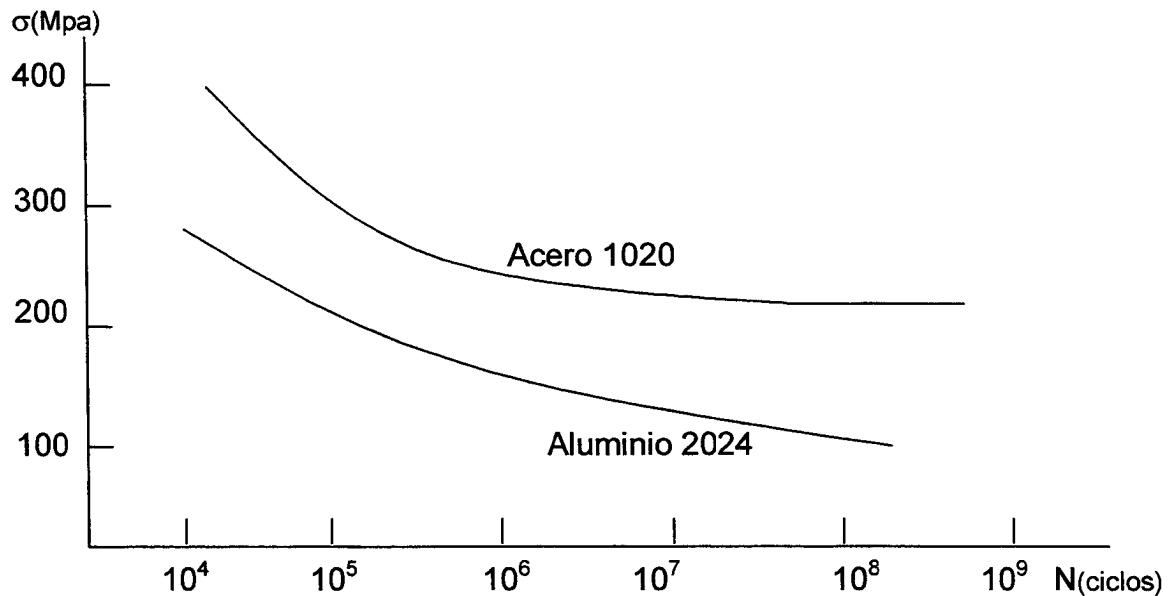
cargarse 2000 veces por día, al cabo de 10 años habrá soportado más de 7 millones de ciclos.

Las cargas que se aplican se pueden considerar fluctuantes si en cada ciclo se alcanza una fracción de la carga máxima que puede soportar el elemento. Una condición más severa se presenta si en cada ciclo se produce una inversión de la carga por ejemplo los esfuerzos sobre el eje de un vagón de ferrocarril se invierten completamente por cada media vuelta de la rueda.

El número de ciclos de carga necesarias para causar la falla de una probeta, sometida sucesivamente a cargas e inversión de las cargas, puede determinarse experimentalmente para cualquier nivel de esfuerzo al efectuarse ensayos a diferentes niveles de esfuerzos y luego graficando los datos como una curva σ Vs. N. Como los ciclos son cantidades muy altas normalmente se trazan en una escala logarítmica.

En la gráfica 2.3 se muestra una curva típica σ Vs. N para el acero y para aluminio. En el caso del acero a medida que se reduce el esfuerzo máximo, el número de ciclos requerido para causar la falla aumenta hasta alcanzar un valor límite conocido como límite de fatiga. Se considera que el límite de fatiga es el valor del esfuerzo para el cual no ocurre falla aún para cualquier número de ciclos a que se someta el elemento.

Se observa en la gráfica también que para otros materiales, como en este caso para el aluminio, no existe un límite de fatiga definido, pues a mayor número de ciclos el esfuerzo sigue reduciéndose. Para estos materiales se estima el límite de fatiga como el esfuerzo de ruptura que se presenta para un número de 500 millones de ciclos.



Gráfica 2.3 Límites de fatiga en el acero 1020 y aluminio 2024

El examen de las probetas, ejes, resortes y otros componentes que han fallado por haber sido sometidos a fatiga muestra que la falla se inicia en pequeñas grietas microscópicas o debido a alguna imperfección del material, y a medida que transcurren los ciclos de carga la grieta va aumentando hasta que la parte sana es insuficiente para soportar la carga y sobreviene una falla súbita. Como la falla puede presentarse debido a cualquier grieta o imperfección, el estado de la superficie de la pieza tiene un efecto importante en el valor que se obtiene para el límite de la fatiga, por lo que el límite de carga para elementos bien terminados superficialmente será mayor que para aquellos donde la terminación de la superficie es deficiente.

2.2.7 FUNDAMENTOS DEL PANDEO LOCAL

Uno de los mecanismos de falla más comunes, para recipientes y cilindros de pared delgada así como para columnas tubulares, es el pandeo local. A continuación se tratará describir someramente este fenómeno.

El pandeo local es un mecanismo de falla que ocurre cuando un elemento está constituido por láminas de pared delgada que se encuentran sometidas a cargas de compresión pura o a cargas de flexión que generen esfuerzos de compresión en alguna de sus partes. En la figura N° 2.8 se muestra un ejemplo típico de falla por pandeo local en una columna tubular de sección cuadrada:

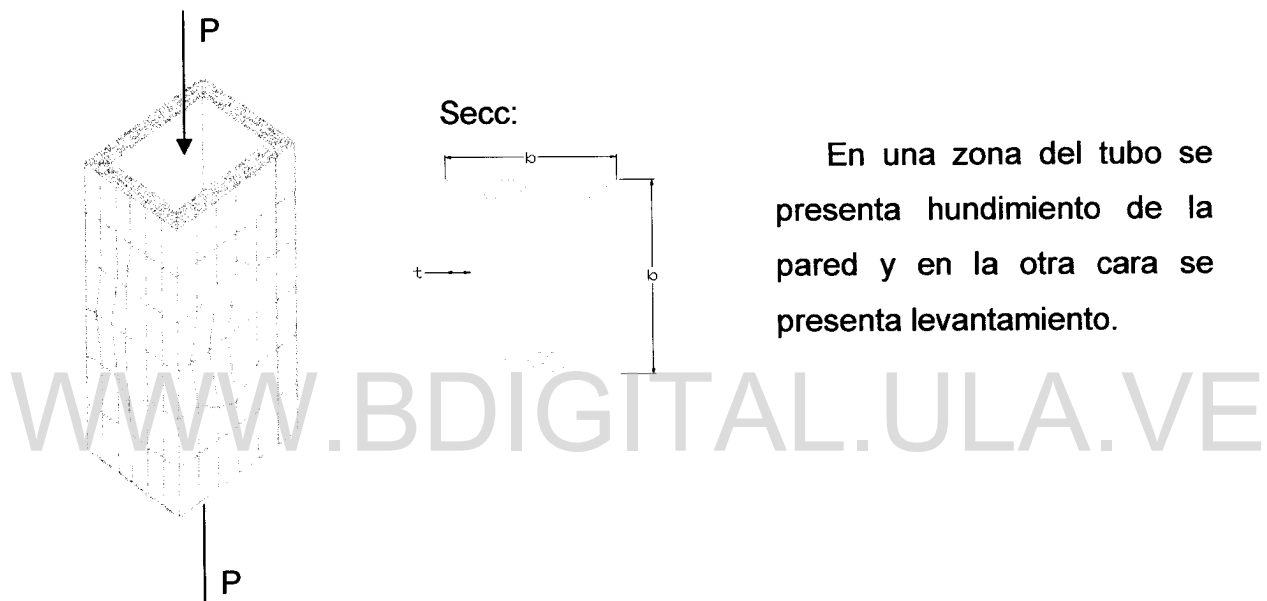


Figura N° 2.8 Detalle del pandeo local

Uno de los requerimientos para que se presente pandeo local es el que la relación b/t sea lo suficientemente alta. Valores de b/t cercanos a 50 generan pandeo local para esfuerzos medios muy por debajo del esfuerzo de fluencia del material.

Para estudiar el pandeo local debe estudiarse el comportamiento de las láminas que conforman al elemento y aplicar la teoría de placas en la cual se contempla que el pandeo local puede presentarse tanto en el rango elástico

como en el rango inelástico, y además, considerando que una vez que se presenta el fenómeno, el elemento desarrolla un remanente de resistencia debido al endurecimiento del material producto de las deformaciones laterales, las cuales normalmente están restringidas por la resistencia a la flexión de los bordes de las láminas.

Para una lámina delgada sometida a esfuerzos longitudinales en una sola dirección "x" y de espesor "t" tal como se muestra en la figura N° 2.9:

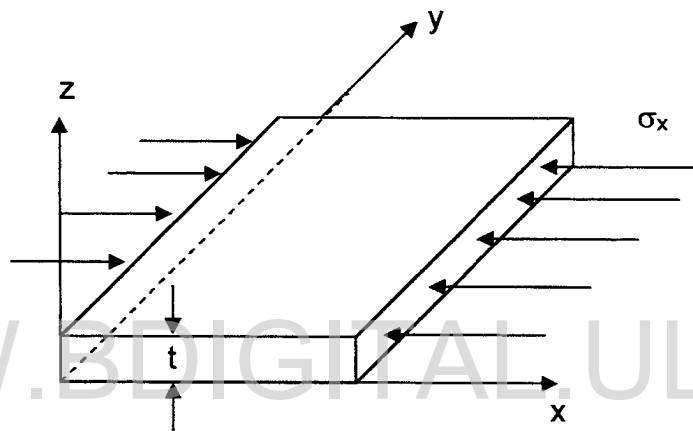


Figura N° 2.9 Elemento de lámina con esfuerzos en una sola dirección

La ecuación básica que rige el comportamiento de la inestabilidad viene dada por:

$$k \left[\frac{\partial^4 \omega}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 \omega}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \omega}{\partial y^4} \right] + \sigma_x t \cdot \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} = 0$$

Donde: ω = deflexión lateral en el eje z

σ_x = esfuerzo en dirección x

t = Espesor de la lámina

$K = Et^3 / (12 \cdot (1 - \mu^2))$ = constante de rigidez de la lámina

La ecuación anterior es análoga a la ecuación diferencial homogénea que establece el comportamiento de las columnas:

$$EI \frac{d^2 y}{dx^2} + p \cdot y = 0, \text{ en la cual: } EI = \text{rigidez de la sección}$$

$$P = \text{carga axial aplicada}$$

Por lo que por analogía se establece que en las láminas sólo hay una solución característica para valores específicos de σ_x cuando se alcanza el valor de σ_{crit} , lo que en las columnas correspondía a la carga P_{crit} que originaba la inestabilidad.

Este modelo matemático es válido sólo en el rango elástico de aplicación de la ley de Hooke, donde se considera que:

$$\sigma_{crit} = \sigma_{flu} - \left(\frac{\sigma_{flu}^2}{4\pi^2 E} \right) \left(\frac{Le}{r} \right)^2$$

donde σ_{flu} = esfuerzo de fluencia.

Al definir esta última fórmula se observa que el σ_{crit} tiende a σ_{flu} cuando Le/r tiende a cero, por lo que en una columna corta formada por láminas delgadas el esfuerzo promedio no llegará a alcanzar el valor σ_{flu} antes de la falla entonces se puede considerar que $\sigma_{crit} = Q \cdot \sigma_{flu}$, donde Q es un factor menor a la unidad y representa el efecto desfavorable de falla por pandeo local y depende de la relación ancho / espesor, del esfuerzo de fluencia y de las condiciones de apoyo de la lámina tanto en sus bordes laterales como en los bordes donde se aplica el esfuerzo.

En función de este comportamiento teórico existen una serie de normativas que se aplican para evitar que se presente el pandeo local. Dentro

de dichas normativas se encuentran las normas alemanas DIN 4114, las normas de la AISC, y las normas AISI.

2.2.8 EFECTOS DEL CONFINAMIENTO EN EL CONCRETO

Normalmente las propiedades más comunes que se dan para el concreto son obtenidas en ensayos de carga uniaxial; ahora cuando esas propiedades se evalúan en ensayos de compresión triaxial las mismas cambian considerablemente.

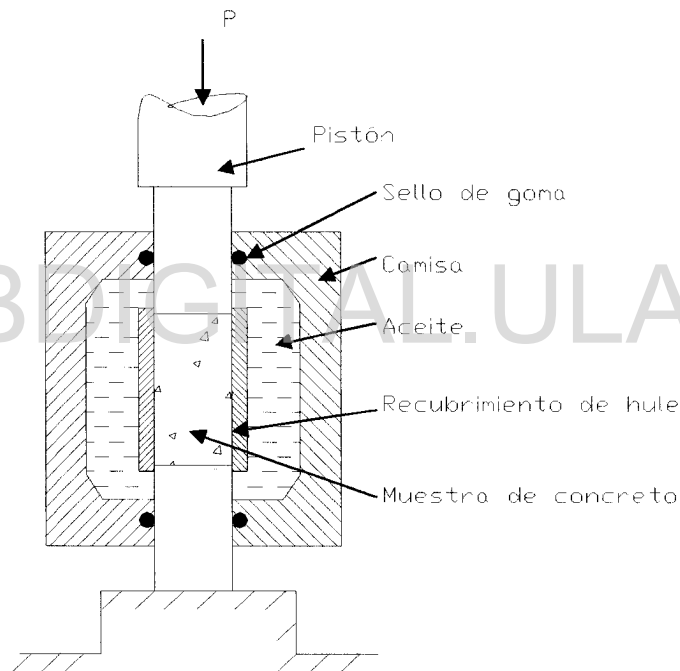


Figura N° 2.10 Ensayo de confinamiento en concreto

Un ensayo de compresión triaxial consiste en someter a la muestra de concreto a la presión de un fluido, generalmente aceite, el cual se encuentra contenido en una camisa o chaqueta que recubre la muestra, y a la carga propiamente dicha aplicada a través de un pistón tal como se muestra en la figura N° 2.10.

Este ensayo fue evaluado por primera vez por Richard, Brandtzaeg y Brown³ quienes encontraron que la ductilidad y la resistencia de los cilindros de concreto se incrementaban considerablemente, planteando la siguiente relación:

$$f''c = f'c + 4.1f_l$$

donde: $f''c$ = Resistencia del material bajo el ensayo de compresión Triaxial.

$f'c$ = Resistencia del material en ensayo Uniaxial.

f_l = Presión del fluido o presión de confinamiento lateral.

Tal como se observa un concreto cuya resistencia en ensayo uniaxial alcanzó una resistencia de 25,2 MPa, puede llegar a aumentar esta resistencia más de 5 veces cuando la presión de confinamiento alcanza un valor igual a su resistencia en ensayo uniaxial. Este fenómeno se debe a que la presión de confinamiento reduce significativamente la aparición de grietas producto de la deformación transversal que es la causa principal en la falla de este material. Es importante destacar que pruebas llevadas a cabo por G. Balmer⁴ dieron como resultado un aumento del efecto del factor de confinamiento de 4,1 a valores que se ubicaron entre 4,5 a 7,0; con valor promedio de 5,6, para presiones de confinamiento relativamente bajas, planteando la siguiente corrección a la ecuación anterior:

$$f''c = f'c + 5,6f_l$$

Al graficar los resultados para diferentes presiones se obtuvo lo siguiente:

³ F.E. Richard, A. Brandtzaeg, I. Brown a study of the failure of concrete under combined compressive stresses. University of Illinois 1928

⁴ G.G. Balmer. Shearing Strength of concrete under high triaxial stress. Structural Research Laboratory. Report SP - 23

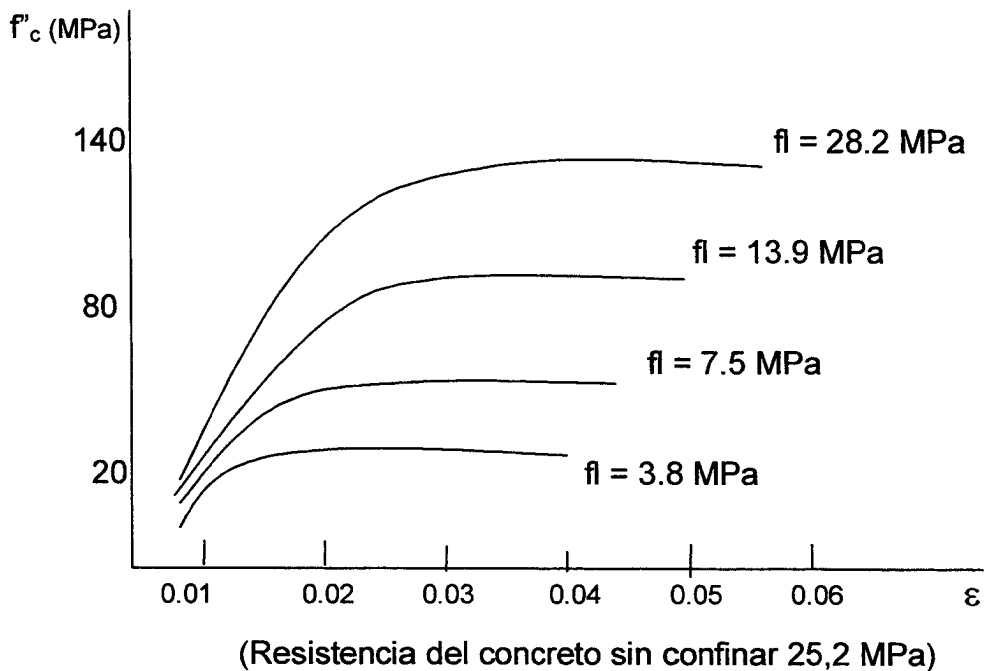


Gráfico 2.4 Variación de la resistencia del concreto bajo confinamiento

Tal como se observa en el gráfico 2.4, un concreto cuya resistencia en ensayo uniaxial alcanzó una resistencia de 25,2 MPa, puede llegar a aumentar esta resistencia más de 5 veces cuando la presión de confinamiento alcanza un valor igual a su resistencia en ensayo uniaxial. Este fenómeno se debe a que la presión de confinamiento reduce significativamente la aparición de grietas producto de la deformación transversal que es la causa principal en la falla de este material.

Es importante destacar que pruebas llevadas a cabo por G. Balmer⁵;

dieron como resultado un aumento del efecto del factor de confinamiento de 4,1 a valores que se ubicaron entre 4,5 a 7,0; con valor promedio de 5,6, para presiones de confinamiento relativamente bajas, planteando la siguiente corrección a la ecuación anterior:

$$f''c = f'c + 5,6fl$$

⁵ G.G. Balmer. Shearing Strength of concrete under high triaxial stress. Structural Research Laboratory. Report SP - 23

CAPITULO III

METODOLOGIA Y EQUIPOS

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

3.1 DEFINICION DE LA MUESTRA:

A manera de cumplir con los objetivos del presente trabajo y a fin de evaluar las características y efectos del reforzamiento de columnas fabricadas a partir de tubos estructurales de secciones huecas cuadradas con las características que se detallan en la gráfico 3.1, en el presente trabajo se consideran las siguientes alternativas:

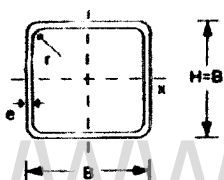
a) Columnas de sección tubular cuadrada de dimensiones 100 mm. x 100 mm., sin ningún tipo de reforzamiento, es decir columnas tubulares vacías. Los resultados que se tengan al aplicarles carga bajo esta característica servirán como patrones de comparación para determinar las bondades que se puedan lograr en este tipo de columnas a las que se le aplique algún tipo de reforzamiento, tal como el que se detalla en las siguientes alternativas.

b) Columnas de sección tubular cuadrada de dimensiones 100 mm. x 100 mm., las cuales son reforzadas al serles vaciado y curado concreto con una resistencia de diseño de 250 Kgf/ cm² (24.5 MPa). A estas columnas se les debe dejar en reposo por un periodo mínimo de 28 días a fin de permitir el curado o fraguado del concreto de relleno o de reforzamiento. Este núcleo de concreto, se supone que le conferirá una resistencia adicional a la columna, para lo cual se efectuarán los ensayos correspondientes.

c) Columna de sección tubular cuadrada de dimensiones 100 mm. x 100 mm., a la cual se le vacía internamente concreto de resistencia 250 Kgf/cm² y se le colocan clavos de acero atravesando las paredes laterales de la columna, tanto en la cara lateral externa como en la interna respecto a la carga excéntrica que se le aplicará. El objetivo de la colocación de estos clavos de acero es tratar de evitar un posible deslizamiento entre el núcleo de concreto y el tubo estructural , una vez que se presente pandeo, debido al efecto de la carga excéntrica que se

aplicará. La colocación de estos clavos debe efectuarse antes de las 24 horas de realizarse el vaciado del concreto a fin de que no haya avanzado el proceso de fraguado y de esta manera evitar agrietamientos en el núcleo de concreto.

d) Columnas de sección tubular cuadrada de 100 mm. x 100 mm. a las que se les vacía concreto con aditivo expansor “SIKA” (SIKACRETE) . Al agregar el aditivo expansor se desea el que exista una mayor presión de contacto o un mayor roce entre la pared interna del tubo de acero y el núcleo de concreto, y con esto se evitarían posibles deslizamientos entre esas dos superficies debido a los esfuerzos cortantes que se generan por la flexión que se produce al efectuarse el proceso de carga.



Tubos Estructurales CONDUVEN ECO Sección Cuadrada

Al igual que la sección circular la compresión axial es muy eficiente, teniendo un $F_y=3.515 \text{ Kg/cm}^2$ y un $F_b=0,69 \times F_y$. Es recomendado su uso común como columna, para cargas axiales grandes, momentos moderados y (KL) grandes.

H x B mm	Dimensiones mm		Sección A cm ²	Peso kg/m	Propiedades Estáticas		
	e	r			I _x cm ⁴	S _x cm ³	r _x cm
60 x 60	2,25	3,38	5,02	3,94	27,40	9,13	2,34
70 x 70	2,25	3,38	5,92	4,65	44,60	12,74	2,74
90 x 90	2,50	3,75	8,54	6,70	107,46	23,88	3,55
100 x 100	3,00	4,50	11,33	8,89	175,10	35,02	3,93
110 x 110	3,40	5,10	14,10	11,07	283,04	47,82	4,32
120 x 120	4,00	6,00	18,01	14,14	397,30	66,22	4,70
135 x 135	4,30	6,45	21,85	17,15	612,27	90,71	5,29
155 x 155	4,50	6,75	26,39	20,72	982,43	126,77	6,10
175 x 175	5,50	8,25	36,25	28,46	1709,23	195,34	6,87
*200 x 200	5,50	8,25	41,75	32,77	2597,67	259,77	7,89
*200 x 200	7,00	10,50	52,36	41,10	3194,10	319,41	7,81
220 x 220	7,00	10,50	57,96	45,50	4314,30	392,21	8,63

Grafico 3.1 Propiedades de las secciones tubulares cuadradas

Una vez definidas las secciones se delimitará la longitud de la columna a ensayar. Para esto se debe tener en consideración que la columna posea una relación de esbeltez que la ubique dentro del rango de columnas largas, o en un caso extremo dentro del rango de columnas intermedias. Por otra parte la dimensión de la columna no debe exceder de la máxima capacidad de la

máquina universal de ensayos, disponible en el laboratorio de materiales de la Facultad de Ingeniería de la U.L.A., lugar donde se efectuarían las pruebas de carga, por lo que esta no debe exceder de 1400mm., la cual resulta una dimensión relativamente corta, y considerando cierto margen de seguridad para colocar los aditamentos de transmisión de la carga que se emplean, se considerará finalmente una longitud máxima de 1300mm. Debido a que la sección de estudio corresponde a una sección tubular de 100 mm. x 100 mm., la cual en la práctica popular de construcción es la sección más comúnmente empleada y de acuerdo a que el radio de giro correspondiente a una sección de este tipo es de 39,3 mm. de acuerdo a los datos de la tabla anterior, se obtiene una relación de esbeltez de $(L_e/r = 1300 \text{ mm} / 39,3 \text{ mm})$ 33, la cual indica que una columna de estas dimensiones corresponde a una columna corta, la cual requerirá de cargas muy elevadas para fallar y por otra parte no se corresponde con las columnas empleadas por el ingenio popular. En consecuencia para poder efectuar un estudio comparativo más acorde a lo utilizado en la práctica, se decide emplear una columna que pueda simular un comportamiento dentro del rango de columnas largas, pero donde la longitud máxima no exceda de 1300mm. y donde se mantenga la sección cuadrada de 100 mm. x 100 mm. Esto se puede lograr uniendo a un tramo corto de columna un brazo rígido a cada extremo de tal manera que allí se transmita un momento flector y una carga axial de compresión tal como se indica en la figura N° 3.1.

Para lograr mayor rigidez en los brazos colocados en los extremos se seleccionaron tubos estructurales de sección cuadrada de 155 mm. x 155 mm., los cuales se soldarán a los extremos de la columna y se reforzarán con concreto de relleno en su interior. Estos brazos obligan a que la sección útil de la columna sea ahora de 1 m de longitud, con lo cual la longitud total de la probeta obtenida alcanzará la longitud límite de 1300 mm. La longitud de los brazos en función de cálculos teóricos que se detallan adelante corresponde a un valor de 400mm aproximadamente considerando los espacios requeridos

Licencia Creative Commons:

47

para la soldadura a emplear y para la ubicación de un elemento cilíndrico que permita la transmisión de la carga en un punto predeterminado

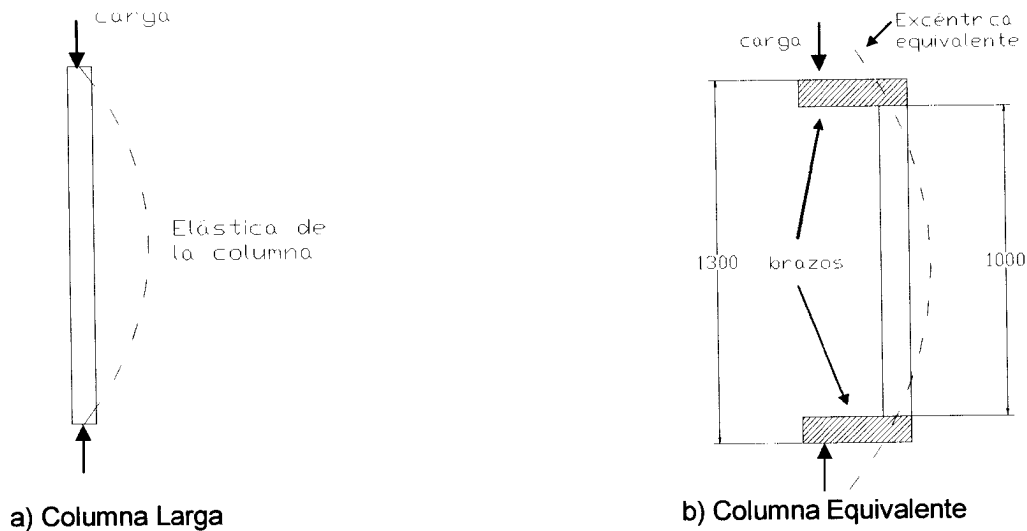


Figura N° 3.1 Columna para la muestra a ensayar

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

sobre estos brazos, alcanzando en la práctica una distancia entre la carga aplicada y el eje centroidal de la columna de 300 mm. En la figura 3.2 se muestra el esquema del elemento o probeta en función de las dimensiones establecidas.

Para unir el brazo a la columna propiamente dicha se emplea un cordón de soldadura eléctrica de filete sobre todo el contorno del tubo con un ancho de filete de 20 mm, el cual debe ser aplicado en varias etapas a fin de lograr el ancho deseado y por otra parte para evitar un calentamiento excesivo en el acero del tubo y a su vez con esto evitar posibles cristalizaciones o esfuerzos residuales.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

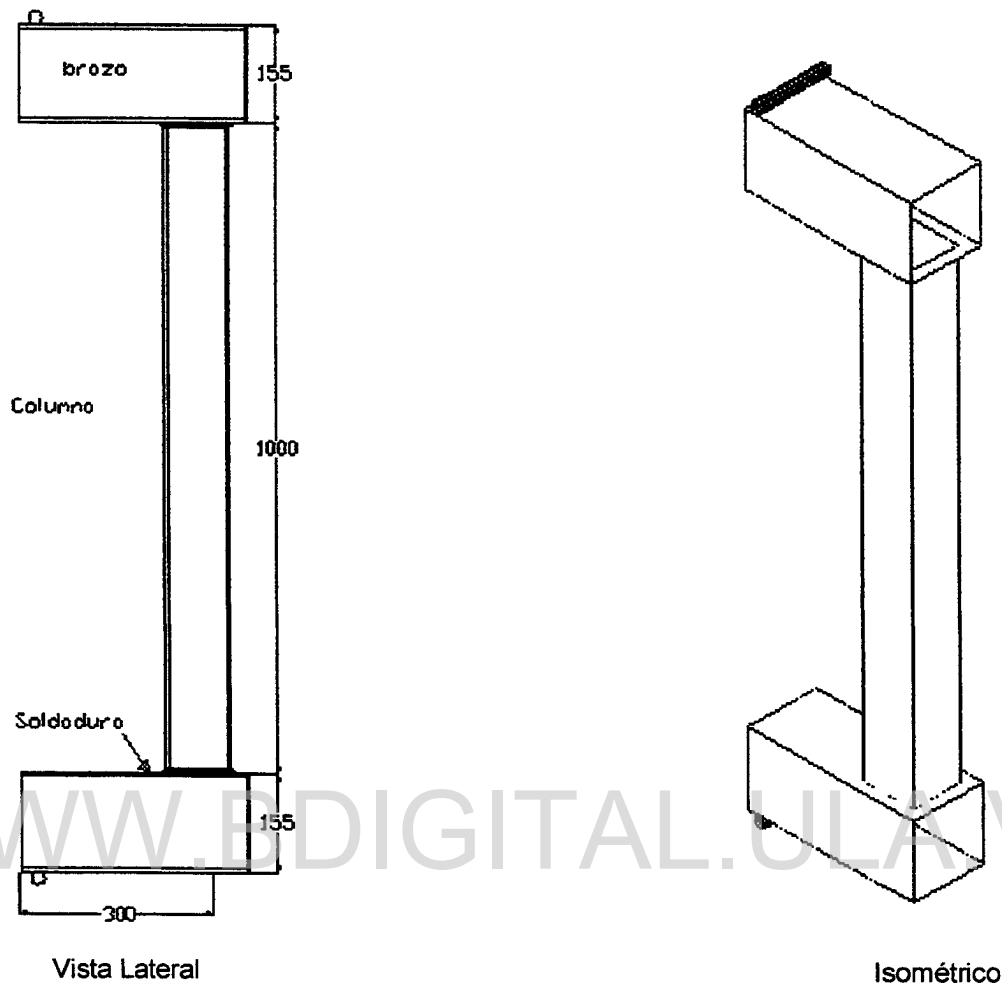


Figura N° 3.2 Esquema de la probeta de ensayo

3.2 CONSTRUCCION DE LAS PROBETAS

Una vez definidas las características y dimensiones de las probetas a ensayar se procedió a construir las probetas y por limitaciones económicas del proyecto sólo se cortaron 8 tubos estructurales de sección cuadrada de 100mm x 100mm, teniendo sumo cuidado en efectuar cortes rectos, o sea planos de corte completamente perpendiculares al eje del tubo, para de esta manera poder soldar los brazos perpendicularmente y obtener planos paralelos entre los extremos de estos brazos, una vez que se efectúa la unión.

Licencia Creative Commons:

49

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Luego de cortados los tubos se les vació internamente concreto a todo lo largo de los mismos, colocando los tubos en posición vertical. Este proceso se efectuó sobre cuatro de los ocho tubos, con un concreto de resistencia 250 Kgf/cm². A otros dos tubos se les vació en forma similar concreto con aditivo “SIKACRETE” y los dos restantes se dejaron vacíos.

Este vaciado se efectuó con suficiente antelación, a las pruebas de carga para así poder lograr el perfecto fraguado del concreto. A las 16 horas del vaciado, a dos de los tubos les rellenó con concreto de 250 Kgrf/cm², se les colocaron clavos de acero empleando una pistola de impacto, y colocando cinco clavos de acero sobre las caras laterales interna y externa del tubo, con respecto a la carga aplicada y distanciados 150mm entre sí, teniendo presente adicionalmente que no coincidieran los colocados en la cara externa respecto a los colocados en la cara interna, para así evitar debilitar exageradamente la sección transversal donde se colocarían estos clavos.

Paralelamente al curado del concreto, se efectuó el corte de los brazos a partir de un tubo de sección cuadrada de 155mm x 155mm de sección, se cortaron 16 elementos de aproximadamente 390mm de longitud, los cuales se fueron soldando uno a uno a los extremos de los tubos de 100mm x 100mm de sección. Este proceso de soldadura se efectuó de manera muy lenta para evitar recalentamientos excesivos sobre el acero y de esta forma prevenir cualquier efecto de cristalización en este material. Para obtener un cordón de soldadura de filete de aproximadamente 20 mm de espesor se aplicaron entre cinco y seis cordones de soldadura en todo el contorno de la sección del tubo.

Una vez finalizado el proceso de soldadura se procedió a efectuar el reforzamiento de todos los brazos soldados empleando concreto vaciado en el interior de cada brazo con resistencia de 250 Kgrf/cm² y con esto tratar de lograr transmitir la carga a aplicar a la columna a través de un elemento lo más

rígido posible. Una vez, vaciado el concreto se dejó fraguar por más de un mes para conseguir un curado completo.

Seguidamente se le soldaron a cada brazo un elemento cilíndrico (cabilla redonda y lisa) de $\frac{1}{2}$ pulg. de diámetro en el extremo de cada brazo a fin de poder ubicar, sin llegar a cometer errores, la carga que se aplicaría a la columna. Este elemento se colocó exactamente a 300 mm. de distancia medidos desde el eje centroidal de la columna.

Es importante destacar que una vez comenzando el proceso de aplicación de cargas se presentó una separación o despegue entre el concreto y el tubo en el extremo del brazo que lo une a la columna, por lo que hubo que recurrir a colocar una “tapa” metálica formada por varias pletinas de 2 pulgadas de ancho y $\frac{1}{4}$ pulgada de espesor para así lograr mejorar la transmisión de carga y momento flector a la columna y por otra parte se soldó adicionalmente dos “cartelas” o refuerzos formada por pletinas de 2 pulgadas de ancho y $\frac{1}{4}$ pulgada de espesor, para asegurar con esto una mayor rigidez en la unión entre brazo y columna. Detalles de este reforzamiento se muestran en la figura 3.3

Una vez cumplidos los tiempos de curado, se le colocaron los deformímetros o extensómetros de resistencia eléctrica requeridos para poder determinar experimentalmente el valor de los esfuerzos en la primera etapa de carga, es decir, antes de que los esfuerzos sobrepasaran los valores de la zona elástica del acero.

Se colocaron 4 extensómetros a cada una de las cuatro primeras columnas a ensayar, es decir, cuatro a la columna vacía, cuatro a la columna con concreto normal de $250 \text{ Kg}/\text{cm}^2$, cuatro a la columna con concreto normal y con clavos, y cuatro a la columna de concreto reforzado con aditivo.

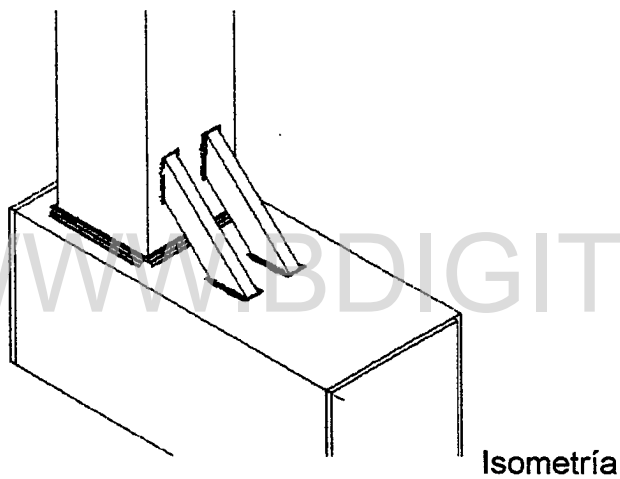
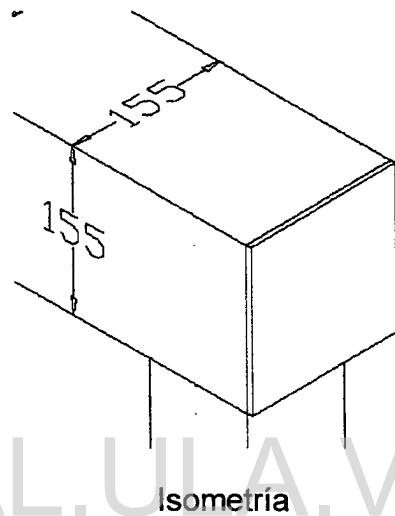
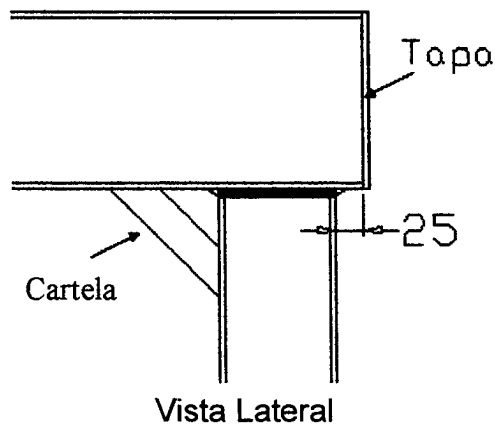


Figura Nº 3.3 Detalles de unión entre brazo y columna

Estos cuatro extensómetros se colocaron en el tercio medio de las caras internas y externas a la carga, uno en el plano centroidal de la columna y sobre la cara lateral de la misma y otro sobre el plano neutro teórico e igualmente sobre el eje neutro de la columna, el cual fue determinado de manera teórica y su cálculo se detalla en el próximo capítulo.

A las cuatro últimas probetas a ensayar y debido a limitaciones económicas sólo les fueron colocados 2 extensómetros, uno en la cara externa

y otro en la cara interna de la columna, ambos también sobre el tercio medio de la columna para así determinar los esfuerzos máximos de tracción y compresión sobre el tubo.

Detalles de la ubicación de los extensómetros se muestra en la siguiente figura.

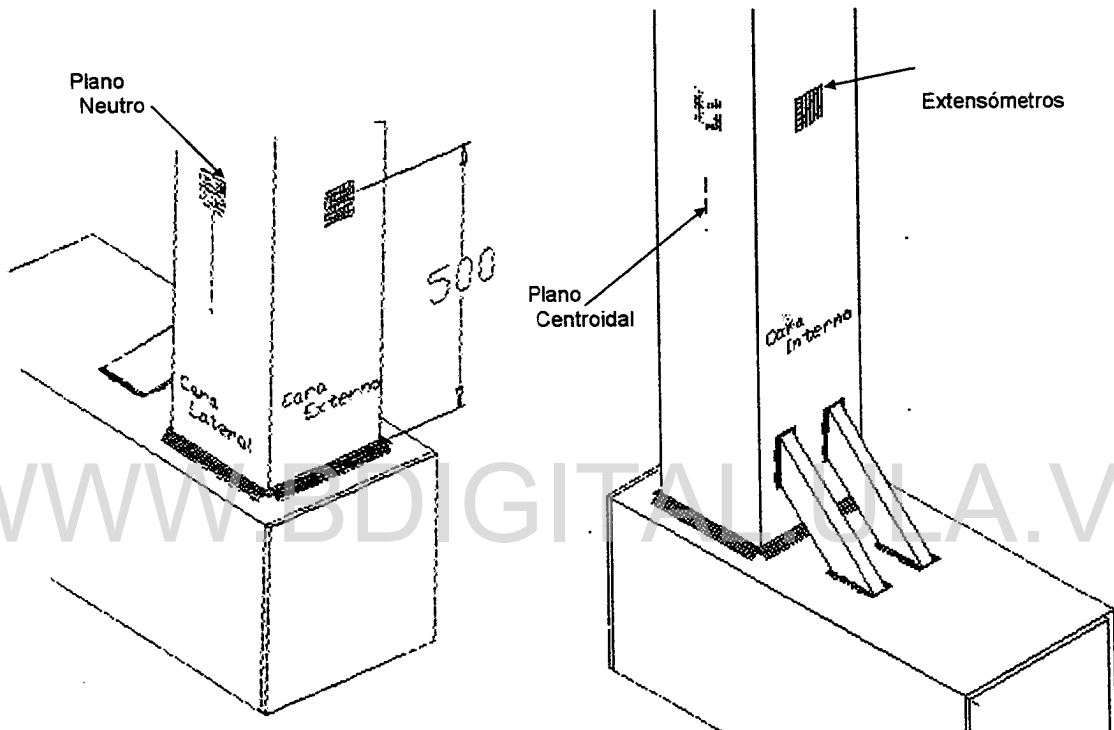


Figura N° 3.4 Ubicación de extensómetros en la probeta

3.3 DISEÑO DE LA MEZCLA DE REFORZAMIENTO

El diseño de la mezcla es el procedimiento mediante el cual se calcula o estiman las proporciones entre los diferentes materiales que intervienen en la composición de la mezcla, para así poder lograr las características o propiedades deseadas en el concreto.

Para obtener un concreto con una resistencia de 250 Kgrf/cm² se empleó el manual del concreto fresco⁵ y considerando las propiedades físicas de los agregados (granulometría) se determinó el valor correspondiente, resultando este de 0,45 y en función de este valor se establecieron las siguientes cantidades de componentes para la preparación de 1m³ de concreto:

Arena: 793 Kgr.

Piedra: 988 Kgr.

Cemento: 405 Kgr.

Agua: 198 lit.

Luego como la cantidad de concreto a preparar, tomando en cuenta el volumen de los testigos, era de 0,08 m se determinó la proporción equivalente de elementos de la mezcla corresponden a ese volumen.

Este concreto se vació al interior de los cuatro tubos requeridos vibrando el vaciado a cada tercio del tubo con una cabilla de ½ pulgada y golpeando con una martillo de goma en la pared del tubo, el cual se colocó en posición vertical y se tapó convenientemente en su parte inferior. También se hizo el vaciado a los cilindros testigos para la comprobación de las resistencias esperadas.

3.4 CÁLCULO TEÓRICO DE LAS CARGAS DE FALLA

Tal como se explicó en el punto 2.3.5, el esfuerzo máximo para una columna que posea carga aplicada excéntricamente, tal como la que ocupa este estudio viene dado por (fórmula de la secante):

$$\sigma_{\max} = \frac{P}{A} \left[1 + \frac{e.C}{r^2} \cdot \sec \left(\frac{L}{2r} \sqrt{\frac{P}{EA}} \right) \right]$$

Donde: σ_{\max} = Esfuerzo máximo sobre las columnas

⁵ Manual del concreto fresco, por Romero, Ramos y Grases, pag. 45

P = Carga aplicada excéntricamente.

e = Excentricidad de la carga respecto al eje centroidal

C = Distancia del eje centroidal al punto más alejado de la sección.

r = Radio de giro de la sección.

L = Distancia entre las cargas o longitud real de la columna.

E = Módulo de elasticidad del material.

A = Área de la sección.

A continuación se efectuarán los cálculos correspondientes al espécimen vacío y al espécimen con núcleo de concreto o reforzado.

3.4.1 CÁLCULO DE LA CARGA DE FALLA PARA LA COLUMNA VACIA

Para determinar la carga máxima teórica a aplicar se considerará un $\sigma_{\max} = \sigma_y$ (esfuerzo de fluencia). Este valor según datos suministrados por el fabricante (C.A. CONDUVEN) corresponde a un valor de 3515 Kgrf/cm² (358,7 MPa) y según datos para el acero se toma como módulo de elasticidad un valor de 200 GPa.

Por otra parte en función de los datos correspondientes a las dimensiones físicas de la probeta se tiene:

$$e = 300 \text{ mm.}$$

$$C = (100/2) \text{ mm} = 50 \text{ mm.}$$

$$r = 39.3 \text{ mm.}$$

$$A = 1133 \text{ mm}^2$$

$$L = 1000 \text{ mm.}$$

Sustituyendo estos datos en la fórmula de la secante se tiene:

$$358,7 \frac{N}{mm^2} = \frac{P}{1133mm^2} \cdot \left\{ 1 + \frac{300 \times 50}{(39,3)^2} \cdot \frac{1}{\cos \left[\frac{1000}{78,6} \cdot \sqrt{\frac{P}{200 \cdot 10^3 \times 1133}} \right]} \right\}$$

reordenando los términos, se obtiene:

$$P = \frac{406407,1N}{\left[1 + \frac{9,71194375}{\cos(8,4517667 \cdot 10^{-4} \sqrt{P})} \right]}$$

Para obtener finalmente el valor de P se aplica ensayo y error, obteniéndose el siguiente valor que satisface la igualdad anterior:

$$P = P_{max} = 37479,6 N$$

Por tanto corresponde a un valor de 3824 Kgrf. aproximadamente.

3.4.2 CÁLCULO DE LA CARGA DE FALLA PARA LA COLUMNA REFORZADA CON CONCRETO

Para determinar la carga de falla en el elemento reforzado se determinará previamente una sección equivalente en acero que se corresponda con la sección original compuesta por acero y concreto, tal como se describió en la sección 2.2. Para determinar esto se requiere conocer el módulo de elasticidad del concreto y de acuerdo al ACI (American Concrete Institute) para el concreto de 250 Kgf/cm² (3550 psi) su módulo de elasticidad es de 24,6 GPa aproximadamente. Usando este valor se transforma la sección compuesta:

Licencia Creative Commons:

56

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

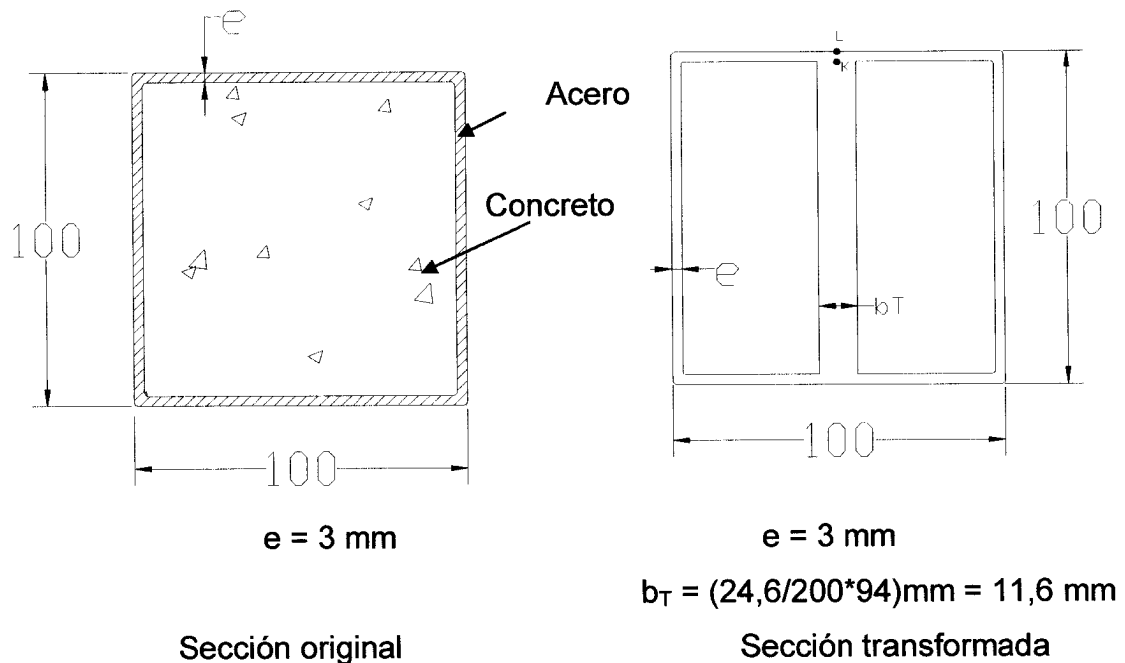


Figura N° 3.5 Sección compuesta y sección equivalente en acero

El área de esta nueva sección será:

$$A = 1133 \text{ mm}^2 + (94 \cdot 11,6) \text{ mm}^2 = 2220 \text{ mm}^2$$

Su momento de inercia (aplicando teorema de Steiner):

$$I = (1,751 \cdot 10^{-6} + 11,6 \cdot 94^3 / 12) \text{ mm}^4$$

$$I = 2,554 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

Conocidos estos valores se halla el radio de giro:

$$r = \sqrt{I / A}$$

$$r = 33,92 \text{ mm}$$

Considerando por otra parte que el esfuerzo en el punto K de la sección transformada será el esfuerzo de rotura del concreto y tomando este valor de 24,5 MPa se halla el esfuerzo correspondiente al punto L, el cual debido a la

distribución lineal de esfuerzos que se puede presentar viene dado por la siguiente relación:

$$\sigma_L = \sigma_k \cdot y_L/y_k, \text{ entonces } \sigma_L = (24,5 \times 50/47)(200/25.6)\text{MPa} = 212 \text{ MPa}$$

Tomando este valor como valor máximo de esfuerzo y usando de nuevo la fórmula de la secante se tiene para:

$$\begin{aligned} e &= 300 \text{ mm.} \\ C &= 50 \text{ mm.} \\ r &= 33,92 \text{ mm.} \\ A &= 2220 \text{ mm}^2 \\ L &= 1000 \text{ mm.} \\ \sigma_{\max} &= 212 \text{ N/ mm}^2 \\ E &= 200.10^3 \text{ N/ mm}^2 \end{aligned}$$

Y sustituyendo:

$$212 \frac{N}{\text{mm}^2} = \frac{P}{2220\text{mm}^2} \left[1 + \frac{300 \times 50}{(33,92)^2} \times \frac{1}{\cos\left(\frac{1000}{67,84} \times \sqrt{\frac{P}{2000.10^3 \times 2220}}\right)} \right]$$

Reordenando términos:

$$P = \frac{470640N}{\left[1 + \frac{13,037057}{\cos(6,995563 * 10^{-4} \sqrt{P})} \right]}$$

Aplicando de nuevo ensayo y error se obtiene el siguiente resultado para la carga:

$$P = 33271.1 \text{ N } \text{ ó } P = 3395.4 \text{ Kgrf.}$$

Licencia Creative Commons:

58

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Ahora considerando que la falla se produce cuando se alcanza el esfuerzo de fluencia en el acero de 3515 Kgrf/cm² ó 358,7 MPa y sustituyendo este valor en la fórmula de la secante:

$$358,7 \frac{N}{mm^2} = \frac{P}{2220mm^2} \left[1 + \frac{300,50}{(33,92)^2} x \frac{1}{\cos\left(\frac{1000}{67,84} x \sqrt{\frac{P}{2.10^5 \times 2220}}\right)} \right]$$

Y reordenando términos:

$$P = \frac{796314N}{\left[1 + \frac{13,037057}{\cos(6,99556 * 10^{-4} \sqrt{P})} \right]}$$

De nuevo por medio de ensayo y error se obtiene la siguiente solución para P:

$$P = 56008,3 \text{ N} \quad \text{ó} \quad P = 5715 \text{ Kgrf.}$$

3.5 CÁLCULO DE LOS ESFUERZOS MÁXIMOS EN LOS BRAZOS DE LAS PROBETAS

Los brazos de las probetas tal como se explicó en el punto 3.1 se colocaron para poder transmitir un momento flector y carga axial a la columna en sí. Para hallar los esfuerzos en ellos se considera que uno de sus extremos está empotrado y sobre el otro se aplica la carga.

Haciendo un esquema del brazo se tiene lo siguiente:

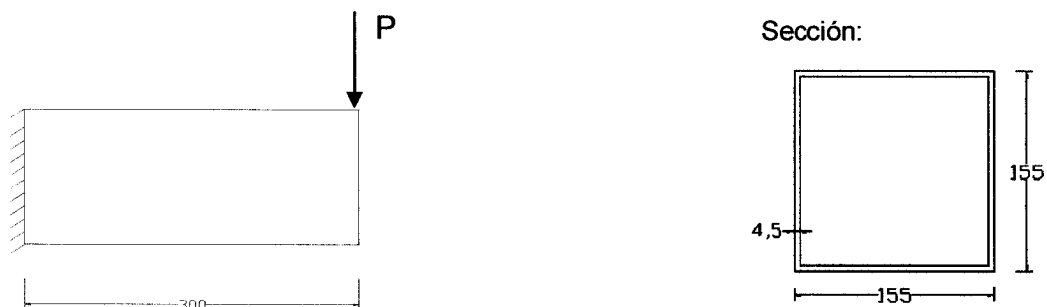


Figura N° 3.6 Esquema del brazo de la probeta

Según la tabla de propiedades de la sección $I_x = 9,8243 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$; $S_x = 126,77 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$. Si se toma para P un valor de 60000 N, aun mayor que el valor máximo calculado en el punto 3.4 anterior se tiene:

$$M_{\max} = (300 \cdot P)_{\text{mm}} \text{ y } P = 60000 \text{ N}$$

$$M_{\max} = 18 \cdot 10^6 \text{ N-mm}$$

$$\sigma_{\max} = M_{\max} / S_x$$

$$\sigma_{\max} = 142 \text{ MPa} = 1392 \text{ Kgrf/cm}^2$$

Este resultado indica que en las condiciones más desfavorables el esfuerzo sobre los brazos de la probeta estará muy por debajo del esfuerzo de fluencia del acero. Por otra parte para asegurar aún más la resistencia del brazo, este estará reforzado con concreto, lo que conduce todavía más a mantener mayor confianza en que sobre el brazo de la probeta no se presentará falla.

3.6 DETERMINACIÓN DEL DESPLAZAMIENTO ENTRE EL TUBO DE ACERO Y EL NÚCLEO DE CONCRETO

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Un detalle que interviene en los resultados del comportamiento de las columnas reforzadas, es el posible desplazamiento entre la pared interna del tubo de acero y la pared externa del núcleo de concreto. Para determinar este posible desplazamiento se dejan sobre el tubo unos agujeros de $\frac{1}{2}$ pulgada de diámetro que sirvan de guía como “ventanas” de observación y sobre el núcleo del concreto y a través de los agujeros se fijará, un pequeño elemento (clavo de sección cuadrada), que sirva como punto de referencia. Luego se fija un comparador de precisión al tubo, que se mantiene en contacto con el clavo de referencia para que de esta manera al aplicar el proceso de carga se pueda registrar los desplazamientos que ocurran. Para entender mejor el procedimiento descrito, se presenta a continuación una figura que ilustra este proceso.

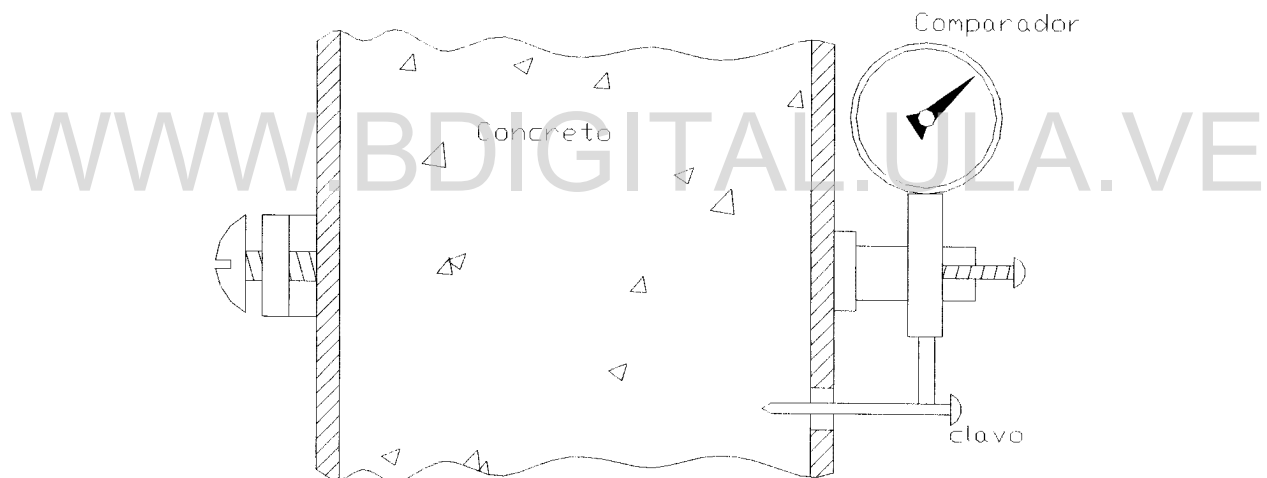


Figura N° 3.7 Dispositivo para medir desplazamiento entre concreto y tubo

3.7 CÁLCULO TEÓRICO DE LOS ESFUERZOS EN FUNCIÓN DE LA CARGA

Debido a lo ya explicado en cuanto a la altura máxima permitida por la maquina de ensayos, a la columna probeta se le soldaron 2 brazos para producir flexo-compresión en ella, tal como se muestra.

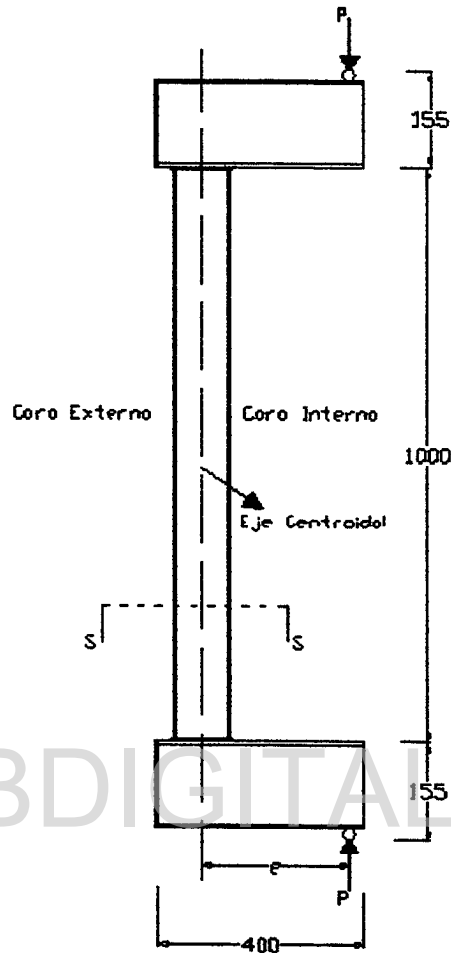


Figura N° 3.7 Vista Lateral de la columna

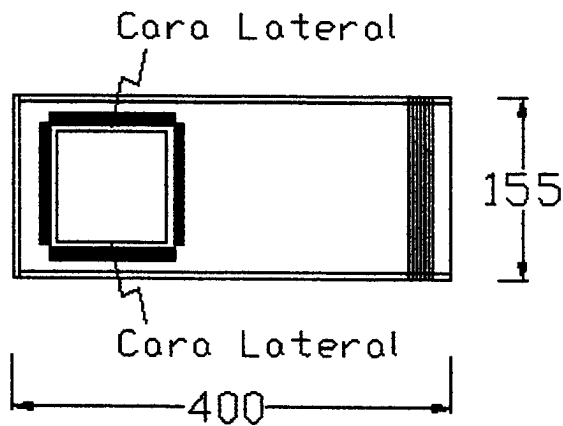
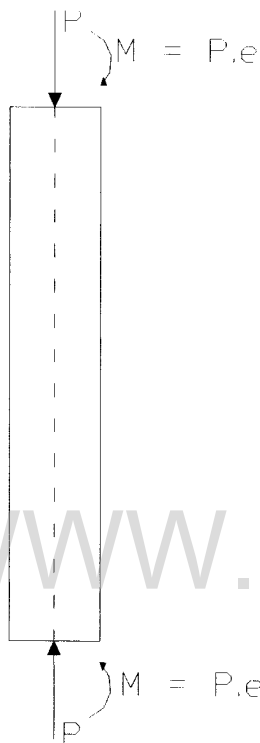


Figura N° 3.8 Sección de corte S-S

Licencia Creative Commons:

En función de la geometría del elemento y a las cargas que se aplican se puede tener el siguiente diagrama, de cuerpo libre para la columna sí al trasladar la carga a los extremos de la columna sobre el eje centroidal de la misma.



$e =$ excentricidad de la carga (300 mm), tal como se consideró en el punto 2.3.5, al elemento en estudio se le puede aplicar la fórmula de la secante, donde el término:

$$\sec\left(\frac{L}{2r}\sqrt{\frac{P}{EA}}\right)$$

Resulta del siguiente valor en función de las cargas máximas calculadas:

a) Para la columna de sección hueca:

$$\text{Sec}\left(\frac{L}{2r}\sqrt{\frac{P}{EA}}\right) = 1,01353$$

Figura N° 3.9 Diagrama de cuerpo libre de la columna

b) Para la columna de sección reforzada:

$$\text{Sec}\left(\frac{L}{2r}\sqrt{\frac{P}{EA}}\right) = 1,01386$$

Observando los resultados para la secante, en ambos casos, se puede considerar un valor aproximadamente igual a uno y al hacer esta aproximación se considera que el elemento objeto de estudio se comporta como una columna corta sometida a flexo-compresión, tal como se indica en el diagrama de cuerpo libre de la figura.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Para cualquiera de los elementos a ensayar se consideraran que los esfuerzos vendrán entonces dados por la siguiente relación:

$$\sigma_{\max} = \frac{P.e.c}{I} \pm \frac{P}{A}$$

Es decir el esfuerzo resultante corresponderá a la suma algebraica de un esfuerzo por flexión más un esfuerzo axial; y los valores máximos para el acero aparecerán sobre la superficie de la cara interna y externa para la columna. Estos resultados corresponden a los siguientes valores:

a) Para la columna vacía:

$$\sigma_{\max \text{ comp}} = (321,070 + 33,080) \text{ MPa} = 354,15 \text{ MPa}$$

(en la cara interna de la columna)

$$\sigma_{\max \text{ tracc}} = (321,070 - 33,080) \text{ MPa} = 287,99 \text{ MPa}$$

(sobre la cara externa de la columna)

b) Para la columna reforzada con concreto

$$\sigma_{\max \text{ comp}} = (328,945 + 25,229) \text{ MPa} = 354,17 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\max \text{ tracc}} = (328,945 - 25,229) \text{ MPa} = 303,72 \text{ MPa}$$

Como era de esperarse los valores máximos de esfuerzo en compresión están muy cercanos al esfuerzo de fluencia del acero tomando como base para los cálculos de la carga máxima a aplicar.

Para hallar los esfuerzos máximos en el concreto, correspondientes a la columna reforzada, se efectúa el cálculo en el plano de unión de los dos

Licencia Creative Commons:

64

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

materiales, es decir, se toma un valor de $y = 47$ mm para calcular los esfuerzos por flexión, y análogamente se aplica:

$$\sigma_{concreto} = \left[\frac{P.e.y}{I} \pm \frac{P}{A} \right] \cdot \frac{E_{concreto}}{E_{acero}}$$

al sustituir datos se tiene:

$$\sigma_{max\ concreto} = (309,21 \pm 25,23) \cdot \frac{24,6}{200} MPa$$

$$\sigma_{max\ comp} = 41,14 MPa$$

$$\sigma_{max\ tracc} = 34,93 MPa$$

Como se observa en los resultados anteriores, los esfuerzos máximos en el concreto resultan superiores al valor de 24,5 MPa (250 Kgrf/ cm²) que se supone es el esfuerzo de ruptura en compresión para el concreto; sin embargo debido al efecto de confinamiento que se debe presentar sobre este material, este efecto le imprimirá valores de resistencia mucho más elevados, lo que podrá ser evaluado al aplicarle las cargas a cada una de las probetas reforzadas con concreto.

3.8 UBICACIÓN DE EXTENSÓMETROS

Para ubicar los extensómetros se considerará al elemento sometido a cargas flexo-compresión y en función de esta condición se desean analizar cuatro puntos de interés:

- 1) El primer punto donde se requiere medir la deformación unitaria y por ende conocer los esfuerzos que se originan, debe ser un punto ubicado sobre el eje longitudinal de la cara interna de la columna. Esto debido a que sobre esta cara se presentan los máximos esfuerzos de compresión.

Licencia Creative Commons:

2) Un segundo extensómetro se debe colocar sobre el eje longitudinal de la cara externa de la columna para que de esta forma se puedan medir los esfuerzos máximos de tracción que se originan.

3) Un tercer extensómetro se colocará sobre el plano centroidal de la columna, y a su vez sobre la cara lateral de la misma, y con este se estaría midiendo el efecto de compresión directa debido únicamente a la carga actuando axialmente sobre el eje de la columna, es decir, al efecto de P/A.

4) El cuarto extensómetro se colocará en el plano correspondiente a esfuerzos nulos y también sobre la cara lateral de la columna. Para ubicar la posición de este plano se considera que el efecto de compresión directo será anulado por el efecto de tracción generado por flexión, es decir:

$$\frac{P}{A} = \frac{P.e.y.}{I} \Rightarrow y = \frac{I}{A.e}, \text{ entonces:}$$

a) Para la columna sin reforzar:

$$y_{oa} = \frac{1,751 \cdot 10^6 \text{ mm}^4}{1133 \text{ mm}^2 \cdot 300 \text{ mm}} = 5,15 \text{ mm}$$

b) Para la columna reforzada:

$$y_{oa} = \frac{2,554 \cdot 10^6 \text{ mm}^4}{2220 \text{ mm}^2 \cdot 300 \text{ mm}} = 3,83 \text{ mm}$$

Ambas distancias medidas a partir del eje o plano centroidal y hacia la cara externa.

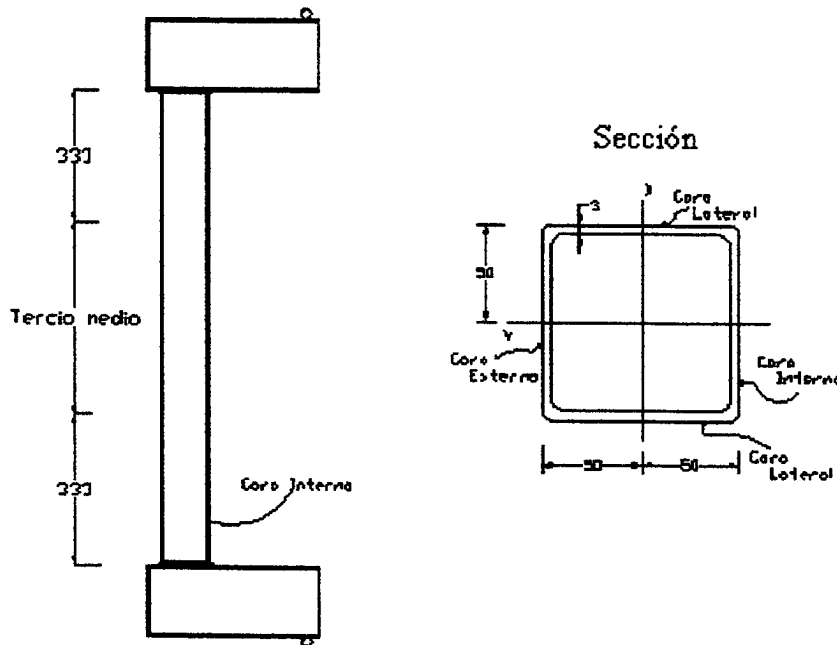
Todos los extensómetros se colocarán sobre el tercio medio de la columna, que corresponderá al espacio en el cual se deben presentar los mayores esfuerzos debido al pandeo de esta.

Licencia Creative Commons:

66

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

En función de aclarar mejor lo descrito aquí se anexa un gráfico donde se indica la ubicación de los extensómetros a colocar.



Vista Lateral

Figura N° 3.10 Ubicación de los extensómetros en la probeta

3.9 EQUIPOS A EMPLEAR

A fin de efectuar el proceso y evaluación de las cargas a aplicar sobre las probetas se deben emplear los siguientes equipos:

- Máquina universal de ensayos para aplicar y registrar las cargas.
- Puente de Wheatstone para registrar las deformaciones unitarias sobre cada uno de los extensómetros colocados a cada probeta.
- Comparadores de precisión para determinar la deflexión en el punto medio de la columna y para registrar los desplazamientos entre tubo y núcleo de concreto.

Licencia Creative Commons:

- Dispositivo para registrar la deflexión de la columna en conjunto con un comparador de precisión. Este dispositivo fue diseñado y construido especialmente para estos ensayos y se pueden apreciar sus características en la figuras que se muestran a continuación.

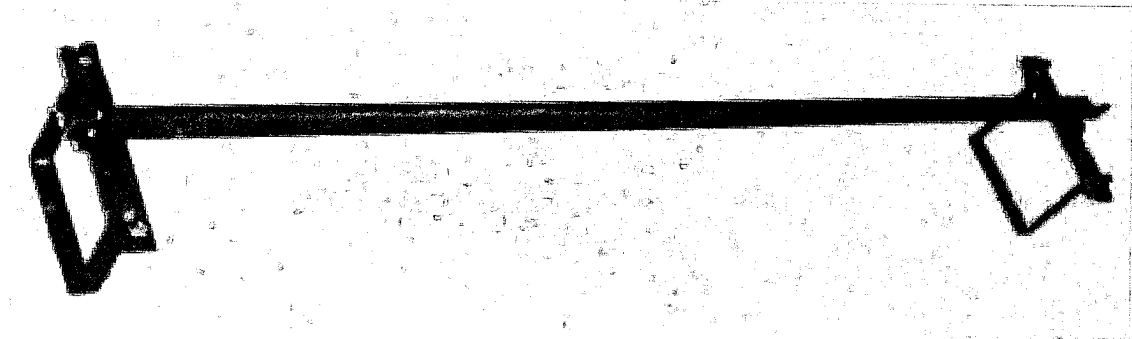


Figura N° 3.11 Dispositivo para medir deflexión

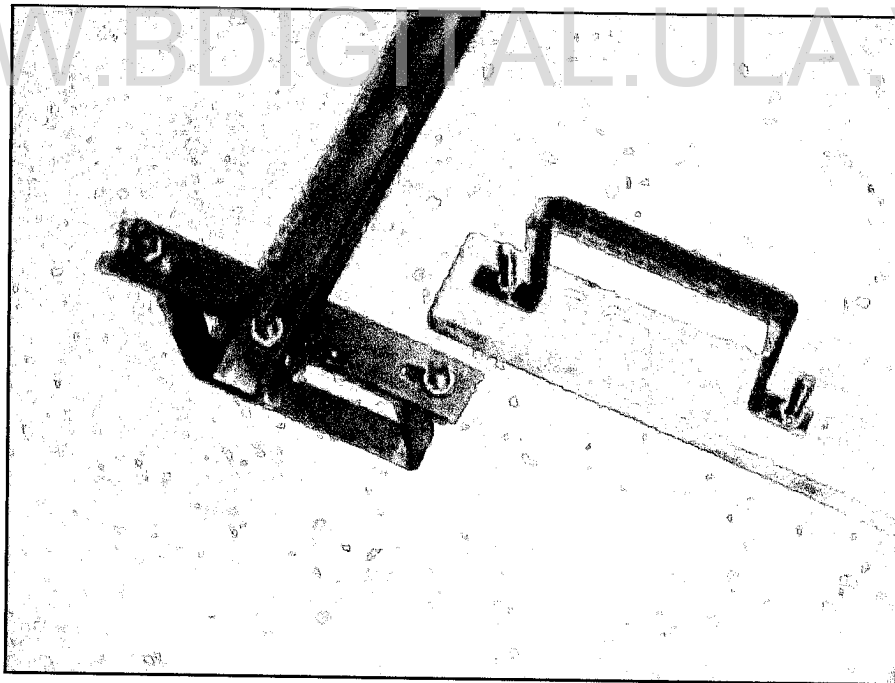


Figura N° 3.12 Detalle de dispositivo para medir deflexión (extremo inferior)

- Extensómetros o deformímetros de resistencia eléctrica para medir las deformaciones unitarias.
- Cables de conexión de extensómetros al puente de Wheatstone.
- Fuente eléctrica.

3.10 VARIABLES A MEDIR EN EL ENSAYO

Uno de los objetivos básicos del ensayo es el determinar las cargas máximas que puede soportar cada columna probeta y el efecto que produce el reforzamiento descrito, a fin de comparar la capacidad de carga de cada tipo columna, por lo que se puede considerar que las cargas serán las principales variables de medir. También se deben registrar las deformaciones unitarias en cada uno de los extensómetros colocados a cada probeta.

Otra variable o punto de interés a registrar corresponde a la deflexión máxima de la columna, que debe ocurrir en el punto medio de la misma y en función de la carga.

Finalmente se requiere también determinar los posibles deslizamientos que se presenten entre el tubo y la pared externa del núcleo de reforzamiento.

A continuación se detallan cada una de estas variables:

Carga Aplicada:

La carga a aplicar a cada columna o probeta será ejercida por la máquina Universal de Ensayos a través de la presión hidráulica que se le imprime al cilindro de la máquina. Esta carga puede leerse a través del indicador correspondiente, y será aplicada

Licencia Creative Commons:

69

de manera cíclica, es decir mediante aumentos y reducciones de carga que vayan aumentando progresivamente hasta alcanzar los valores de carga requeridos para que se produzca la falla en la columna. Este proceso de aplicación de carga con el fin de que el comportamiento de la columna se acerque un poco más a los casos de carga real que ella pudiera soportar.

Los intervalos de aumento de carga deben estar entre 200 a 350 kgrf., sin embargo para lograr un proceso de aplicación de cargas más práctico se considerarán los ciclos en función de intervalos de deflexión que correspondan a valores de carga que se ubiquen dentro del rango previsto.

Una vez que se inicia el proceso, se aumenta y reduce la carga, pero para evitar que la probeta se desplace de su posición inicial, en la descarga no se llega a reducir la carga aplicada a cero, pues como se acaba de mencionar esta última condición pudiese producir desplazamientos laterales respecto a la posición inicial.

Un comportamiento gráfico de este proceso se explica con el esquema siguiente:

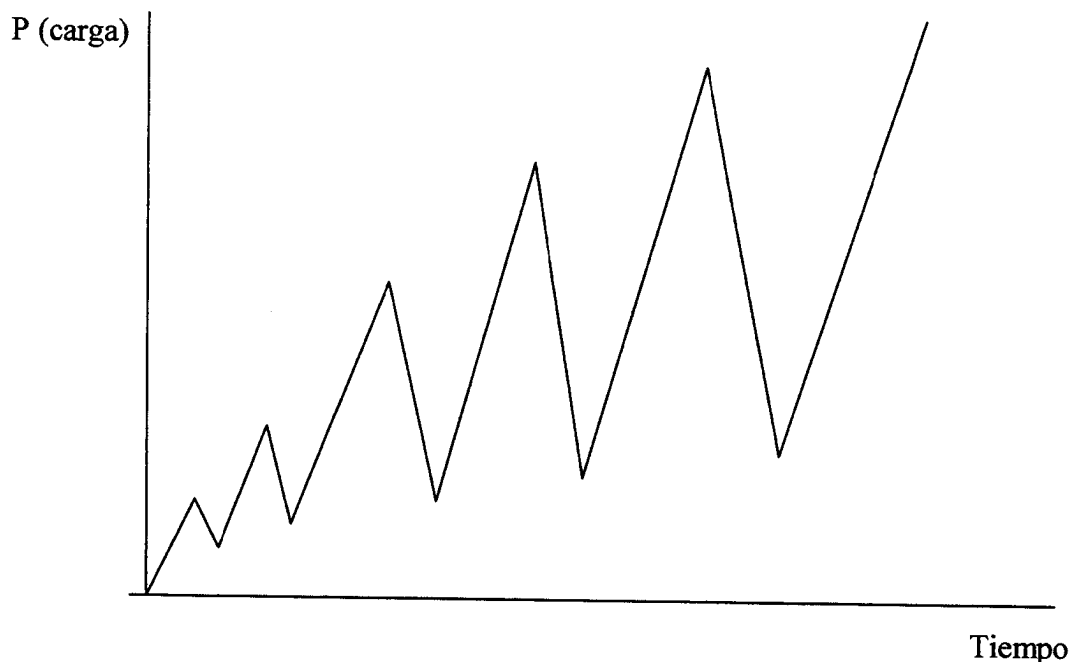


Gráfico 3.2 Proceso de carga de la columna:

Se puede observar que a medida que aumentan los ciclos de carga y descarga, el valor de la carga aplicada, en el proceso de descarga, cada vez más se aleja de cero, esto se debe a que la columna va acumulando deformaciones plásticas, por lo que la deflexión de la columna se hace permanente.

Con el procedimiento de cargas cíclicas aplicado se desea que los resultados se acerquen a procesos más reales, tal como pudiese suceder a cargas debidas a un sismo o en casos más extremos a procesos de fatiga.

Deformaciones Unitarias:

Al aplicar la carga de manera excéntrica, la cara interna, o cercana a la carga, de la columna estará sometida a esfuerzos de compresión, la cara externa a esfuerzos de tracción y existirá un plano intermedio entre estas dos caras que debe poseer esfuerzos nulos. También sobre el plano centroidal de la columna se debe presentar determinados esfuerzos.

Para determinar esfuerzos, por lo menos en el rango elástico, se colocarán en cada uno de los planos descritos extensómetros o deformímetros de resistencia eléctrica, los cuales al estar conectados por cables a un puente de Wheatstone registrarán las deformaciones que allí se presentan.

En conclusión se determinarán deformaciones unitarias en los siguientes puntos de interés:

a) Sobre la cara externa a la carga de la columna y en una posición correspondiente al tercio medio de su longitud. En este punto se producirán los máximos esfuerzos de tracción por lo tanto se deben registrar las máximas deformaciones unitarias “positivas”.

b) Sobre la cara interna e igualmente sobre el tercio medio de la longitud. En este punto se producirán los máximos esfuerzos de compresión sobre el tubo y por ende se registrarán las máximas deformaciones unitarias “negativas”.

c) Sobre un punto de la cara lateral, también sobre el tercio medio de la longitud, y adicionalmente ubicado sobre el “eje neutro teórico”, para así comprobar la posición del mismo. Esta posición tal como se describió, en el punto 3.8 se determinó considerando que la columna se encuentra sometida a flexo-compresión, y en función de las dimensiones físicas de la sección, de la excentricidad de la carga, se definió la posición del plano correspondiente a esfuerzos nulos, por lo que un extensómetro colocado en este plano no debería registrar deformaciones unitarias.

d) El cuarto extensómetro se colocó sobre el plano centroidal de la sección, también sobre el tercio medio de la longitud, y correspondería al plano neutro por flexión de la sección si el elemento estuviese sometido a flexión únicamente; por lo que para flexo-compresión deberá registrar únicamente deformaciones unitarias debidas a esfuerzos de compresión directos, es decir, debido a la relación P/A . Este registro permite establecer también relaciones de proporcionalidad entre los esfuerzos y las deformaciones.

Deflexión o Pandeo de la Columna:

Esta variable permite establecer una relación directa con la carga y sirve como referencia en el proceso de aplicación del ciclo de cargas. Adicionalmente permite visualizar un comportamiento elástico o plástico del elemento, en el caso de reducirse o no la deflexión a cero.

Para registrarla se diseñó y construyó un mecanismo que unido a la columna permitía establecer mediciones de la deflexión en función de la recta o eje neutro original de la columna sin deformaciones, empleando un comparador de precisión, el cual iba fijado al punto central de la columna.

Desplazamientos entre Tubo de Acero y Núcleo de Concreto:

También se explicó en el punto 3.6 que uno de los parámetros que se pretenden estudiar en este ensayo, es el de determinar posibles desplazamientos entre la pared interna del tubo y la pared externa del núcleo de concreto, desplazamientos que deben tener origen debido a los esfuerzos cortantes que se presentan cada vez que se tiene un efecto de flexión en un material. En este caso, de columnas reforzadas, debido a que se tienen dos materiales diferentes podría esperarse que, debido al efecto de flexión, esa unión entre los dos materiales presente deslizamiento y este fenómeno es el que se quiere determinar.

Para comprobar el posible deslizamiento se fijó al tubo de acero un comparador de precisión y el pie del comparador se puso en contacto con un elemento (clavo) de sección cuadrada que estaba unido fijamente al núcleo de concreto y que sobresalía de este último a través de un agujero de $\frac{1}{2}$ " de diámetro que se dejó previsto para este fin.

En caso de que se llegara a presentar un eventual deslizamiento, el mismo sería detectado al producirse alguna diferencia en la medida inicial indicada por el comparador de precisión.

Todas las variables a medir se fueron registrando a medida que se fue aplicando la carga a las probetas y como es lógico, los desplazamientos entre tubo y concreto sólo tendrían aplicación en las probetas o columnas con núcleo de concreto.

CAPITULO IV

ANALISIS DE RESULTADOS

WWW.BDIGITAL.UCLA.VE

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

ANÁLISIS DE RESULTADOS

A objeto de evaluar los efectos que tiene el concreto en el reforzamiento de las columnas, una vez que las probetas construidas se sometieron a carga en la máquina universal de ensayos, se realizaron los gráficos de carga aplicada en función de deformaciones, para los cuatro tipos de probetas ya descritos, obteniéndose los gráficos que se presentan a continuación en el orden siguiente (gráficos del 4.1 al 4.16):

- a) Columna vacía
- b) Columna con concreto y con aditivo
- c) Columna con concreto de 250 Kg/cm²
- d) Columna con concreto y con clavos

Es de hacer notar que con cada tipo de columna evaluada se realizaron dos ensayos y por cada ensayo se efectuaron dos gráficos. En el primer gráfico se detalla el comportamiento de la carga en función de la deformación unitaria de un punto sobre la pared del tubo sometido a esfuerzo de compresión y con el extensómetro colocado sobre la longitud media de la probeta. En el segundo gráfico se representa el comportamiento de la carga aplicada, pero en función de la deformación unitaria de un punto sometido a esfuerzo de tracción y con el extensómetro colocado también sobre la longitud media del tubo.

Los datos a partir de los cuales se realizaron los gráficos ya mencionados están indicados en las tablas del anexo A, incluido al final del presente informe.

Seguidamente a la presentación de los gráficos se encuentran los resultados del análisis del ensayo del concreto empleado en el reforzamiento y al final del capítulo se presenta una evaluación o revisión de los resultados obtenidos en las pruebas realizadas.

4.1 GRÁFICOS CORRESPONDIENTES AL COMPORTAMIENTO DE CADA UNA DE LAS COLUMNAS EN FUNCIÓN DE LAS DEFORMACIONES UNITARIAS Y DE LA DEFLEXIÓN.

4.1.1 COLUMNA VACIA (Columna 4)

Columna 4A vacia
Extensometro 1

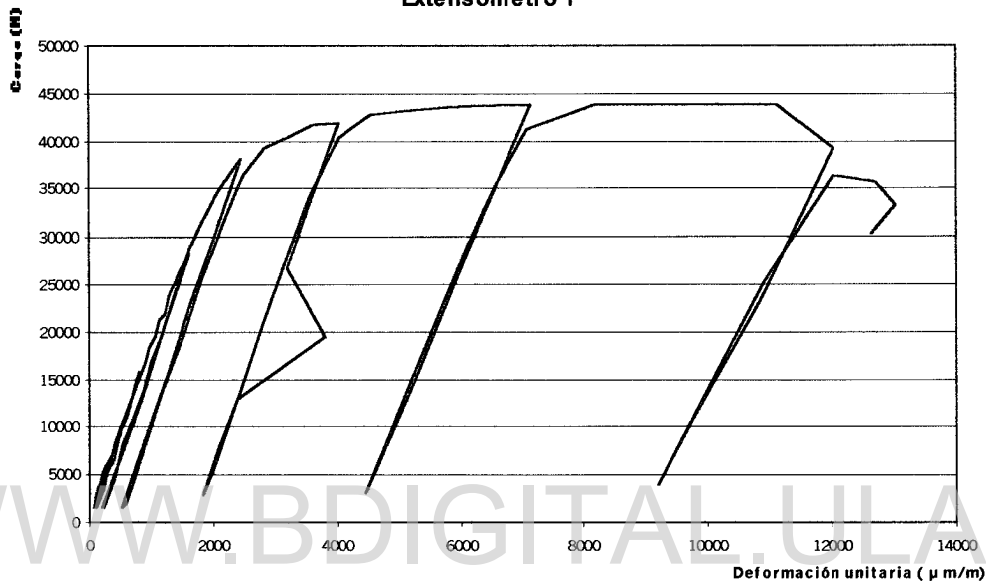


Gráfico 4.1 Carga Vs Deformación para Columna 4A (Ext. 1, compresión)

Columna 4A Vacía
Extensometro 3

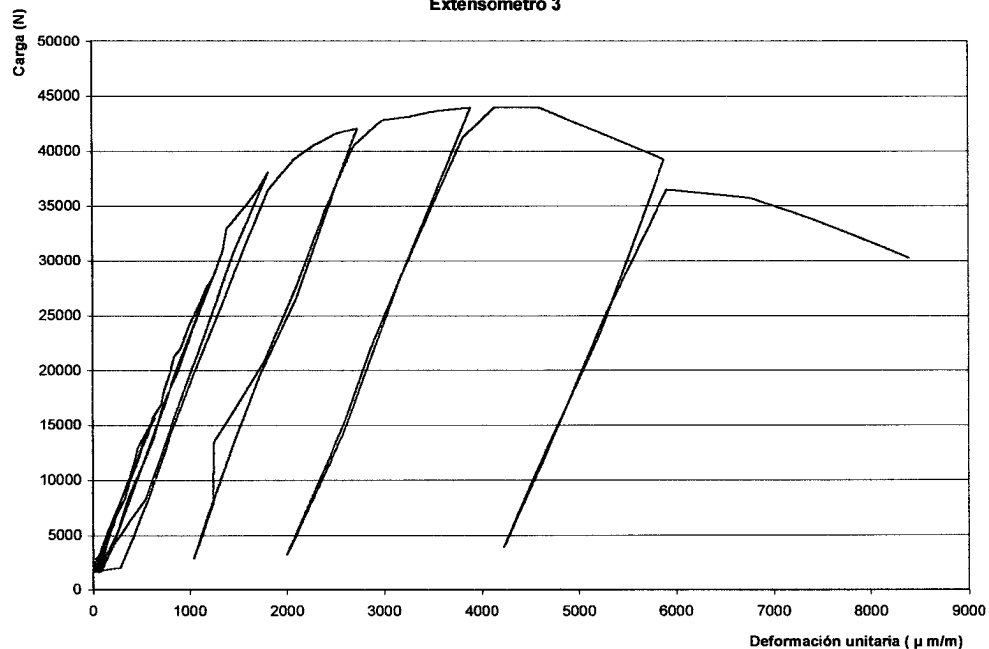


Gráfico 4.2 Carga Vs Deformación para Columna 4A (Ext. 3, tracción)

Licencia Creative Commons:

76

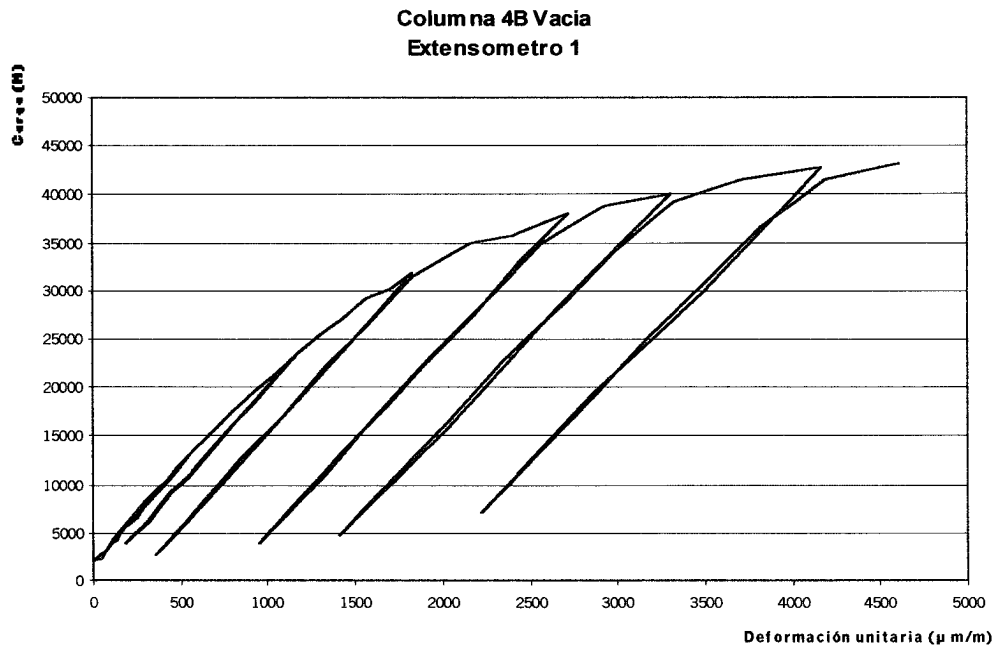


Gráfico 4.3 Carga Vs Deformación para Columna 4B (Ext. 1, compresión)

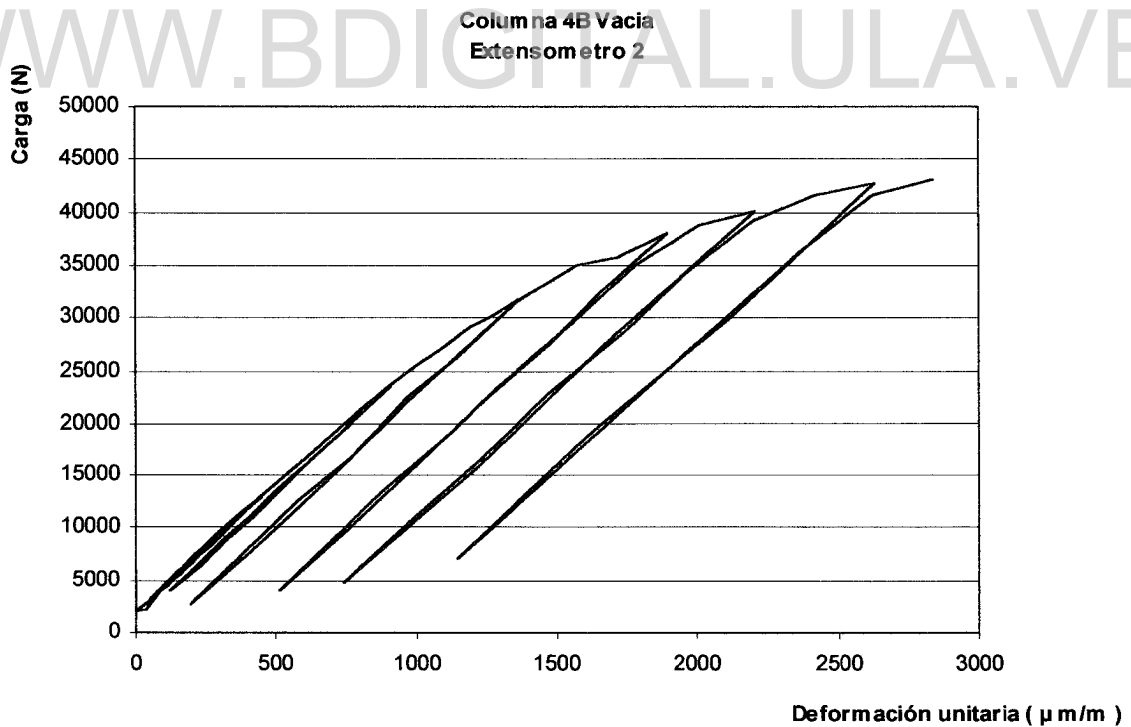


Gráfico 4.4 Carga Vs Deformación para Columna 4B (Ext. 2, Tracción)

4.1.2 COLUMNA CON CONCRETO CON ADITIVO (Columna 3)

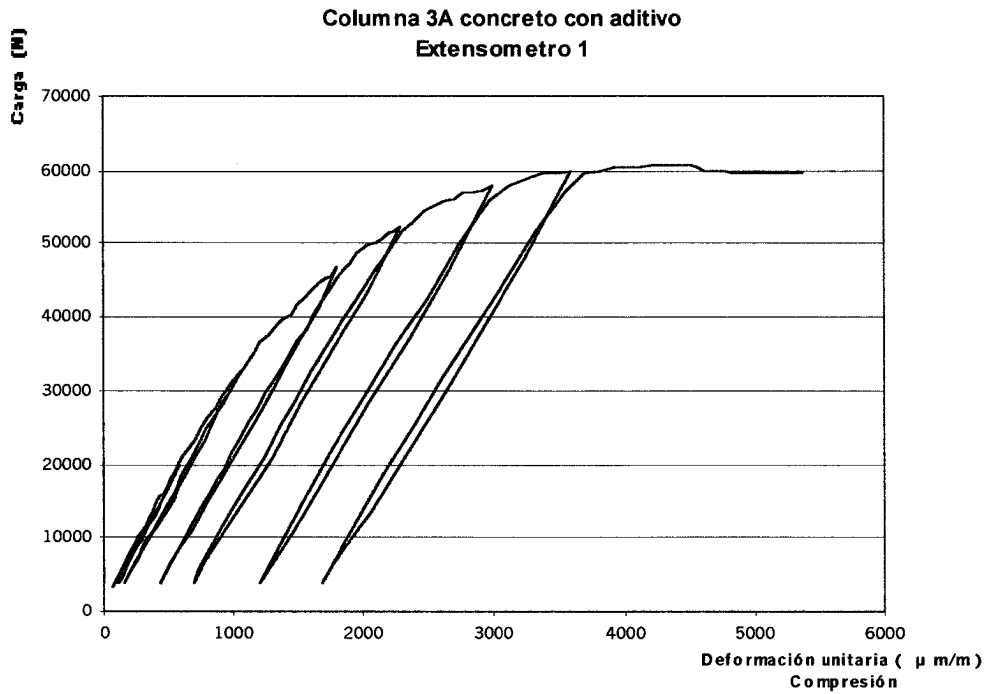


Gráfico 4.5 Carga Vs Deformación para Columna 3A (Ext. 1, compresión)

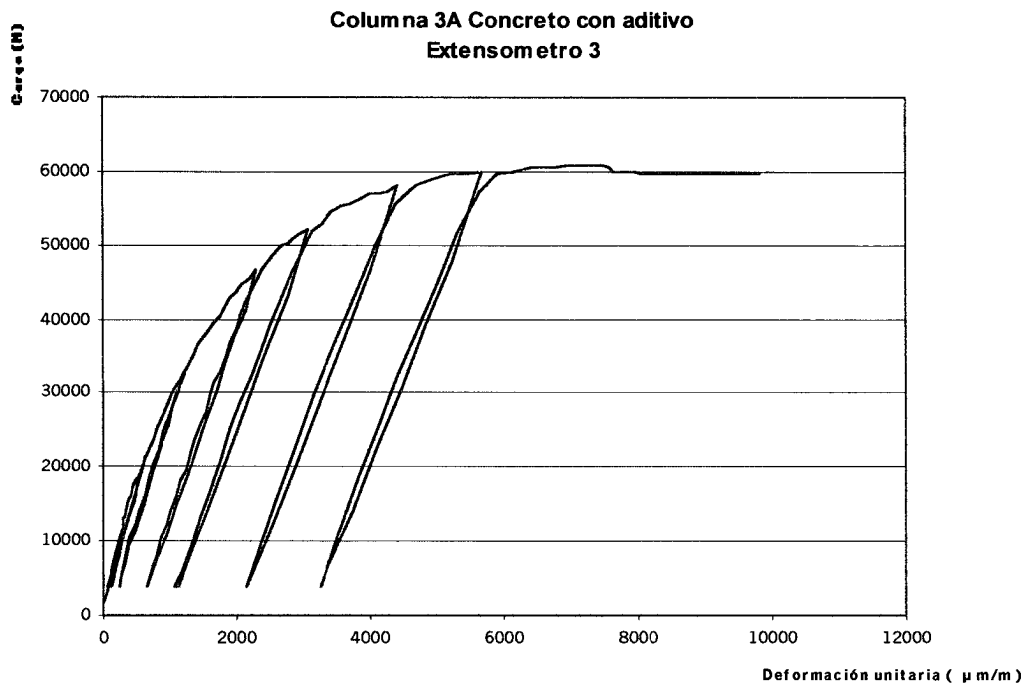


Gráfico 4.6 Carga Vs Deformación para Columna 3A (Ext. 3, Tracción)

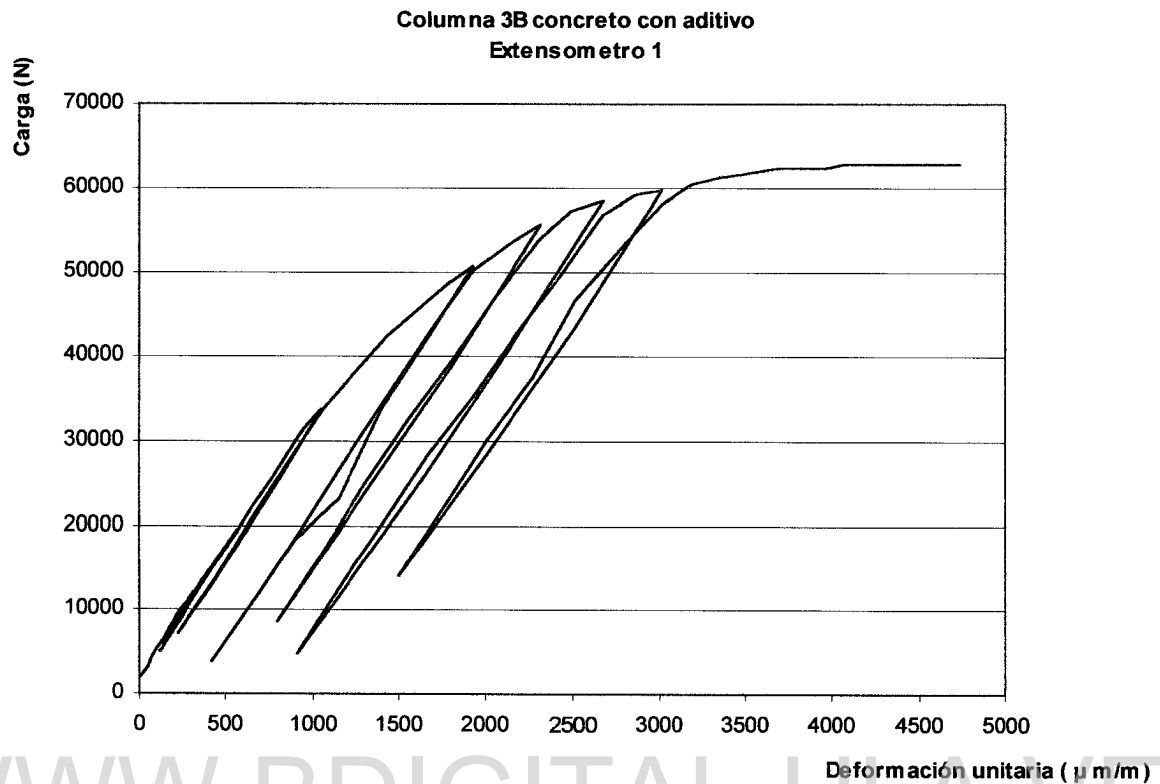


Gráfico 4.7 Carga Vs Deformación para Columna 3B (Ext. 1, compresión)

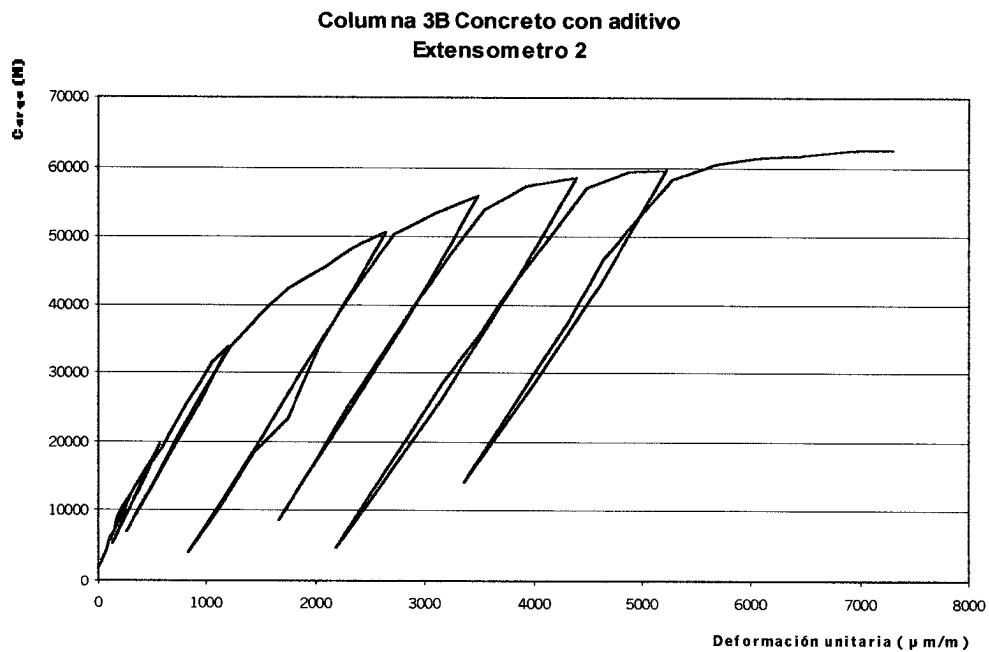


Gráfico 4.8 Carga Vs Deformación para Columna 3B (Ext. 2, tracción)

4.1.3 COLUMNA CON CONCRETO DE 250 Kgf./cm² (Columna 1)

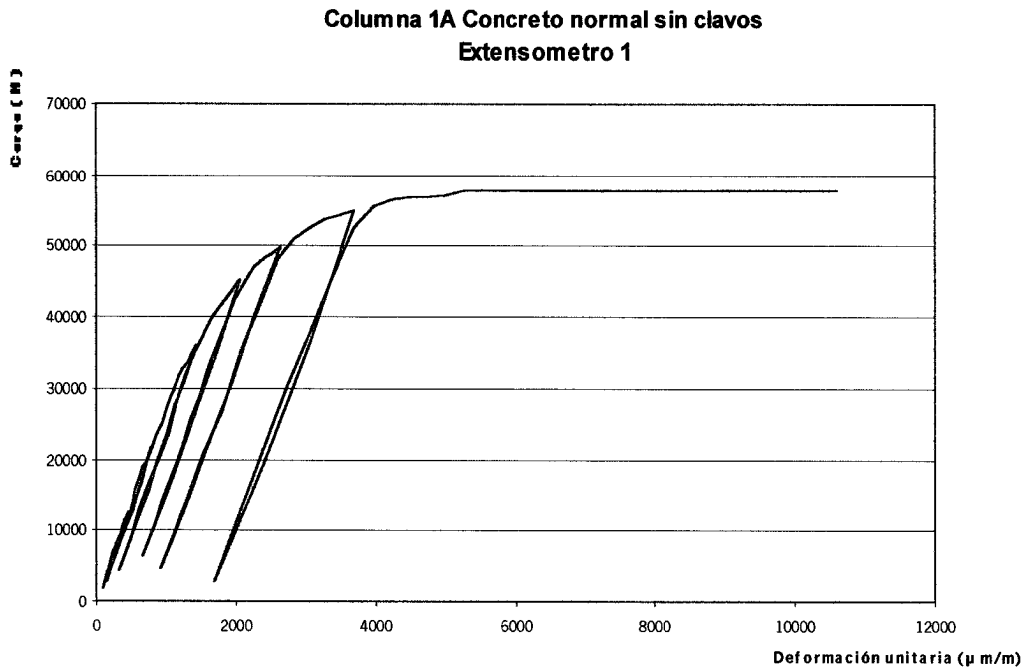


Gráfico 4.9 Carga Vs Deformación para Columna 1A (Ext. 1, compresión)

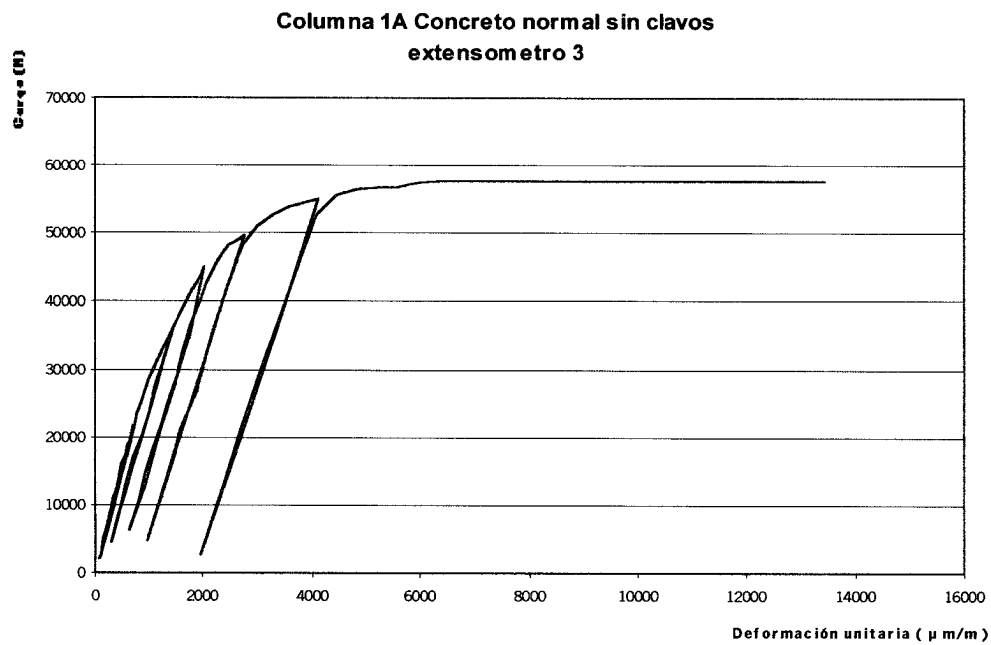


Gráfico 4.10 Carga Vs Deformación para Columna 1A (Ext. 3, tracción)

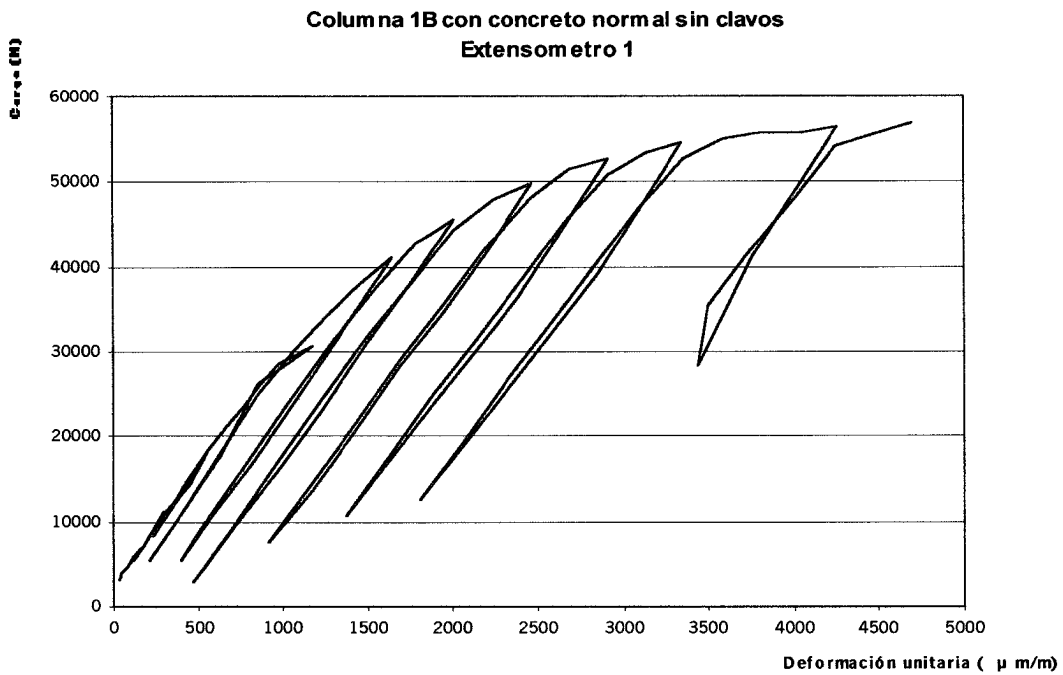


Gráfico 4.11 Carga Vs Deformación para Columna 1B (Ext. 1, compresión)

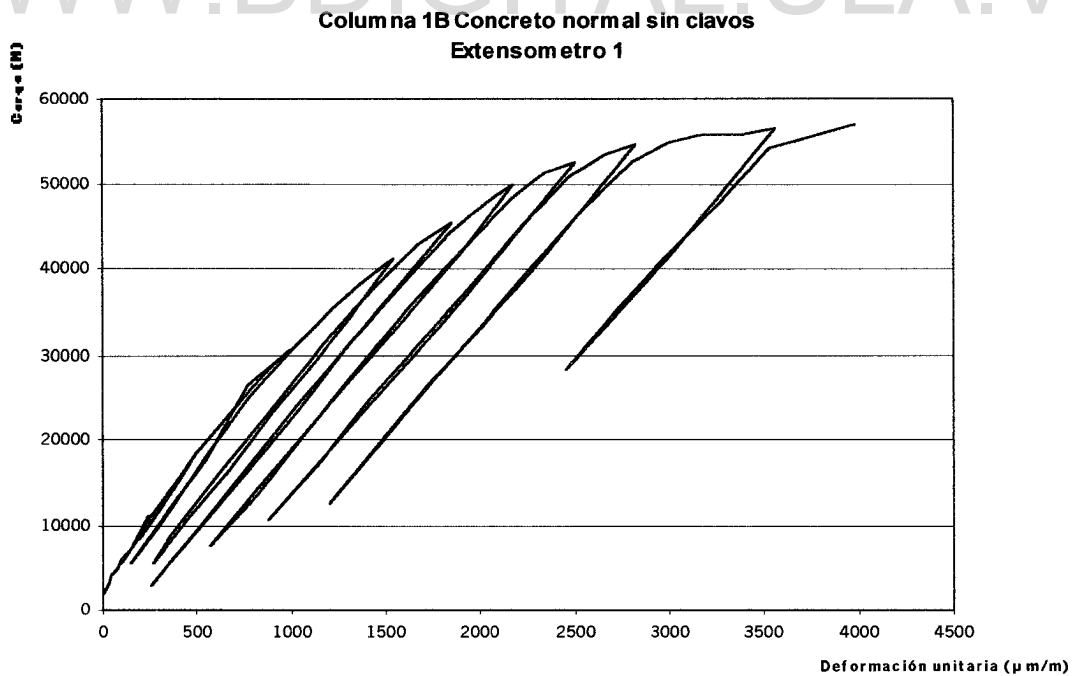


Gráfico 4.12 Carga Vs Deformación para Columna 1B (Ext. 2, tracción)

4.1.4 COLUMNA CON CONCRETO CON CLAVOS (Columna 2)

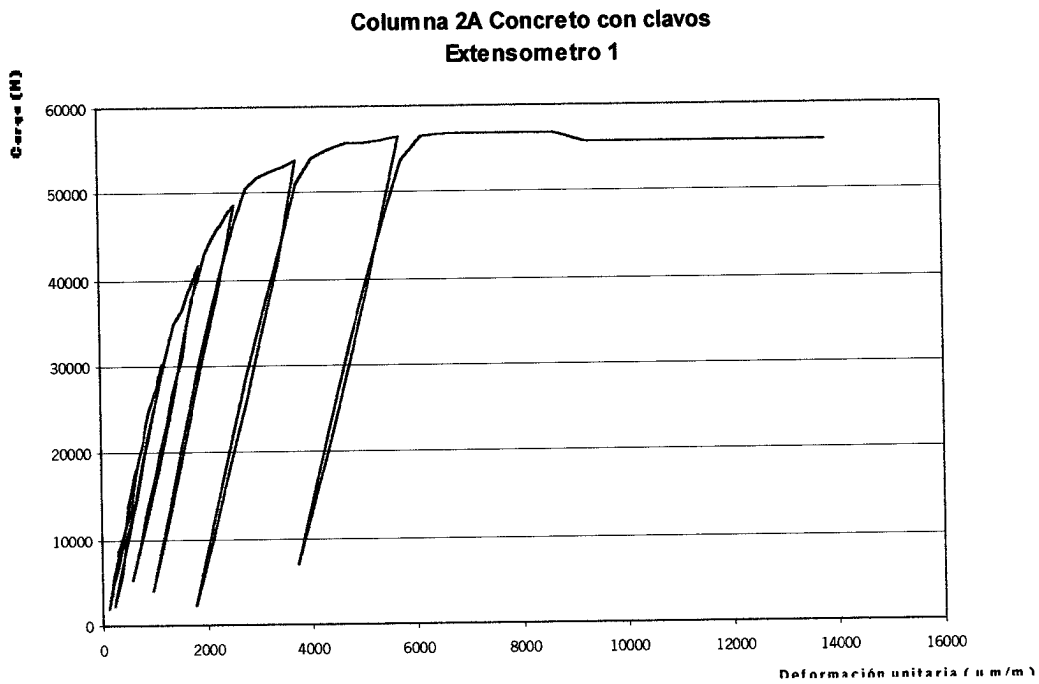


Gráfico 4.13 Carga Vs Deformación para Columna 2A (Ext. 1, compresión)

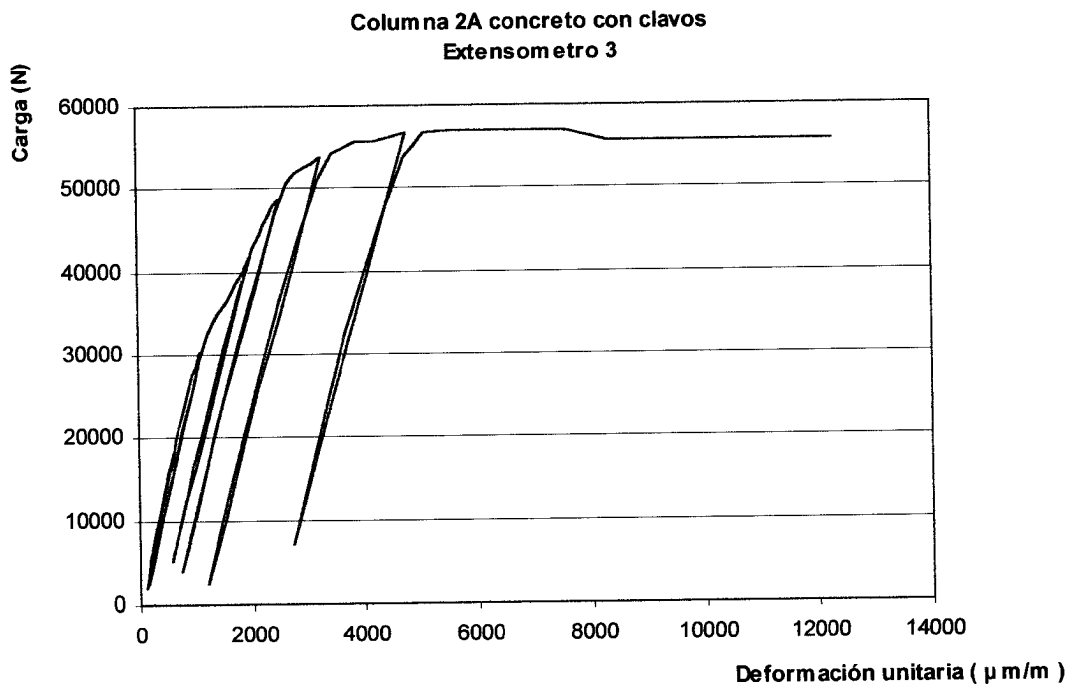


Gráfico 4.14 Carga Vs Deformación para Columna 2A (Ext. 3, tracción)

Licencia Creative Commons:

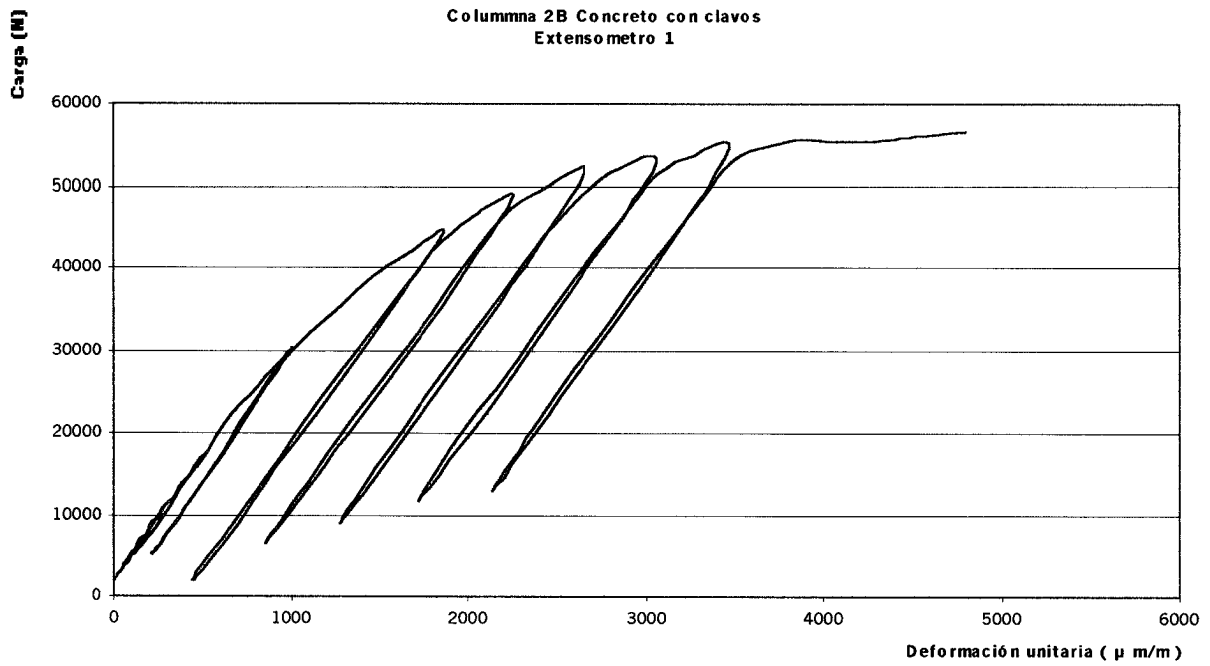


Gráfico 4.15 Carga Vs Deformación para Columna 2B (Ext. 1, compresión)

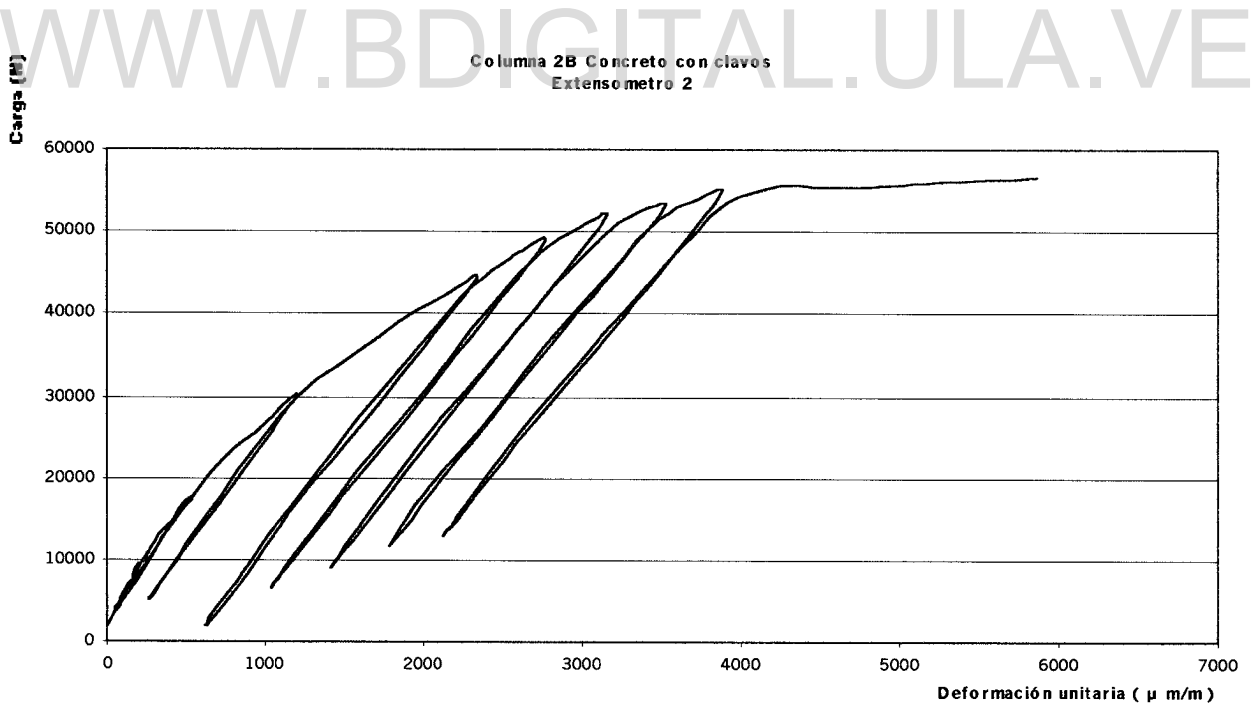


Gráfico 4.16 Carga Vs Deformación para Columna 2B (Ext. 2, tracción)

4.2 RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LA RESISTENCIA DEL CONCRETO EMPLEADO EN EL REFORZAMIENTO

Al concreto que se empleó para el reforzamiento, diseñado según manual del concreto para 250 Kgrf./ cm², de resistencia de ruptura, se le tomaron 3 cilindros de muestra (cilindros numerados 01, 02, y 04) y al concreto con el aditivo agregado se le tomó un cilindro de muestra (cilindro N° 03), esto con el fin de ser ensayados en el mismo laboratorio para así comprobar y determinar su resistencia de ruptura real, los resultados de estos ensayos fueron los siguientes:

N° Cilindro	Peso (gr.)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Área (cm ²)	Carga de ruptura (Kgrf.)	Esfuerzo de Ruptura (Kgrf./ cm ²)
01	12010	14,8	30,0	172,0 3	71250	414
02	11990	14,8	30,0	172,0 3	70750	411
03	12220	14,8	30,0	172,0 3	126000	732
04	12020	15,0	30,0	176,7 1	74000	419

Gráfico 4.17 Características del concreto empleado en el reforzamiento, obtenidas en el laboratorio de materiales de ULA

Es de hacer notar que el ensayo se realizó a los 20 meses después de haberse tomado la muestra, debido a carencias en la disponibilidad equipos requeridos, sin embargo éste tiempo de espera no afecta los resultados del ensayo.

4.3 REVISIÓN DE RESULTADOS

4.3.1 OBSERVACIONES GENERALES EN LOS ENSAYOS

Se efectuarán los ensayos en dos grupos en función de la disponibilidad de los extensómetros de resistencia eléctrica.

En el primer grupo se ensayaron los cuatro tipos de probetas. Se efectuó el proceso de carga a la primera columna sin reforzamiento. Se determinó en este primer ensayo que en el proceso de descarga no se debería regresar a valores cercanos a la carga inicial con la cual se logró colocar a la probeta en alineamiento pues cuando se intentó regresar a este valor inicial la columna tendía a salirse de su posición inicial y se requería comenzar de nuevo el proceso después de alinearse nuevamente. Este proceso de “aprendizaje” se aplicó en todos los ensayos sucesivos.

Se determinó en el primer ensayo que al comenzar a cargar la columna se produjeron ciertos asentamientos en la carga debido a que no existió un perfecto paralelismo entre los dos planos de los brazos que transmitían la carga a la columna en sí, y debido a esto se notó cierto pandeo con respecto al otro plano vertical de la sección, produciéndose a su vez valores de deformaciones unitarias sobre el plano neutro y sobre el plano centroidal de la columna. Esto se puede apreciar en las lecturas de deformación unitaria del extensómetro N° 2. Este efecto se notó también en las pruebas siguientes aunque en menores proporciones.

En el primer ensayo con la columna sin reforzar se presentó la falla por un pandeo local bastante acentuado sobre todo en la cara interna de la probeta donde se observó un profundo hundimiento de la superficie del tubo y notables

abombamientos en las dos caras laterales y sobre la región cercana al pandeo local. Este detalle se observa en la figura N° 4.1.



Figura N° 4.1 Pandeo local en columna vacía con 2 extensómetros

En la prueba siguiente se evaluó la columna reforzada con concreto con aditivo expansor. El proceso de carga se efectuó igualmente como en las demás columnas, en forma cíclica con descargas que se mantuvieran alejadas de la carga inicial mínima. Sobre esta columna se colocó el dispositivo descrito para medir los deslizamientos entre tubo y concreto; sin embargo se determinó que en el proceso de carga se mantuvo una unión rígida entre ambos materiales y no fue sino hasta un punto muy cercano a la carga máxima alcanzada cuando se notaron ciertos desplazamientos que alcanzaron un valor extremo de 0,41 mm.; sin embargo es de hacer notar que fue en este punto de la columna donde se colocó el dispositivo para medir desplazamientos (ver figura N° 3.7), en el cual ocurrió un agrietamiento tanto en el concreto como en el tubo, lo que por supuesto condujo a los desplazamientos ya indicados. Esos agrietamientos se pudieran considerar que fueron productos de elevadas concentraciones de esfuerzos, debido al agujero efectuado y al “clavo testigo”, lo que a su vez trajo como consecuencia que la columna prácticamente se partiera en ese punto descrito y no se presentara una deformación en forma de arco.

La siguiente columna a ensayar correspondió a la columna reforzada con concreto de 250 Kgrf./ cm² y sin colocación de clavos. Igual que las anteriores se sometió al mismo proceso de carga cíclica y se alcanzó la carga máxima presentándose también una deformación en forma de arco.

Esta columna presentó igualmente un comportamiento monolítico entre tubo y concreto y de la misma manera que las otras, sólo fue en un punto muy cercano a la carga de falla, cuando se empezaron a registrar ciertos desplazamientos entre el tubo y el concreto, aunque aquí el máximo desplazamiento fue de 0,15 mm. y al final la deformación o pandeo de la columna adoptó una forma arqueada muy uniforme sin presentarse agrietamientos pronunciados en el agujero o “ventana de registro”.

Finalmente en este grupo se ensayó la columna reforzada con concreto de 250 Kgrf/ cm² y con clavos de acero a lo largo de ella. En este ensayo se aplicó igualmente el mismo proceso de carga cíclica y se colocó el dispositivo de registro de desplazamiento entre tubo y concreto. Se observó al igual que la segunda columna ensayada que la deformación o pandeo no adoptó finalmente una forma de arco sino que la columna prácticamente se partió en el punto medio debido a concentraciones de esfuerzo tanto debidas al agujero dejado en el tubo como a los clavos colocados para evitar el desplazamiento entre los dos materiales. En esta columna se llegó a alcanzar un desplazamiento máximo de 0,4 mm., sin embargo fue en esta columna donde si se observó a lo largo del proceso de carga ciertos deslizamientos entre los dos materiales en puntos todavía no cercanos a la carga de falla (ver anexo B.7).

Es importante recalcar que en estos tres últimos ensayos se observó sobre el tubo de acero notables abombamientos indicativos del pandeo local que se produjo sobre este elemento, pero a diferencia de la columna vacía o sin reforzar, en estos últimos no se presentaron hundimientos en el tubo, tal como

era de esperarse, debido a que el núcleo de concreto los impide (ver anexo B.4).

También es importante resaltar que se observó en las columnas reforzadas que la falla se produjo en forma casi simultánea a la aparición del pandeo local y esto hace suponer que, debido a que se presentan separaciones y abombamientos entre tubo y concreto, esta situación conduce a la pérdida del efecto de confinamiento en el concreto lo que a su vez se traduce en una reducción del máximo esfuerzo que hasta ese momento estaría soportando este material.

Otro detalle a destacar es el que al descubrir parte del concreto al cortar mecánicamente determinada porción del tubo se pudo observar que los agrietamientos en el concreto se presentaron, básicamente, donde se produjo el pandeo local del tubo y donde se colocaron clavos de acero para impedir el deslizamiento y para poder medir los desplazamientos entre tubo y concreto (ver anexo B.9).

El siguiente grupo de columnas se ensayo seis meses después del primero debido a la carencia de extensómetros de resistencia eléctrica.

Las características observadas en este segundo grupo de columnas ensayadas fueron muy similares a las del primer grupo. Quizás uno de los pocos detalles a comentar consistió en que el pandeo local de la columna sin reforzar de este grupo no se presentó en el punto medio de la columna, sino 15 cm por debajo de ese punto, y se hizo aun más notorio en cuanto al ensanchamiento y hundimiento de las paredes donde se presentó.

4.3.2 ANÁLISIS DEL PROCESO DE CARGA

Al observar y comparar el proceso de carga se tiene los siguientes resultados para las diferentes columnas, los cuales fueron obtenidos mediante ensayos efectuados en el Laboratorio de Materiales de ULA:

Tipo de Columna	Nº	Carga Máxima Soportada	
		(Kgf.)	(N)
Columna sin reforzar	4A	4480	43904
	4B	4480	43904
Columna reforzada con concreto con aditivo	3A	6200	60760
	3B	6400	62720
Columna reforzada con concreto de 250 Kgf/cm ²	1A	5880	57624
	1B	5920	58016
Columna reforzada con concreto de 250 Kgf/cm ² y con clavos	2A	5800	56840
	2B	5800	56840

Gráfico 4.18 Resultados experimentales de la carga máxima soportada por cada columna

En el gráfico 4.18 los resultados indican un aumento considerable de la carga máxima. Con respecto a la columna vacía la carga máxima aumenta hasta en un 43% en la columna reforzada con concreto y aditivo; hasta en 32% en la columna con concreto de 250 Kgf/cm² y en 29% en la columna con concreto de 250Kgf/ cm² y con clavos de acero en las paredes laterales. También es importante resaltar que las diferencias entre las cargas de falla de las columnas del mismo tipo resultaron nulas o muy reducidas.

Se encontró que los valores de las cargas de falla se acercan ligeramente a los valores de cargas de falla teóricos calculados para la columna vacía, en este caso se determinó como valor teórico, 3824 Kgf y la columna falló a los 4480 Kgf en ambos casos, lo que corresponde a un 17% de

diferencia con respecto al valor calculado. Para la columna reforzada con concreto de 250 Kgf / cm^2 y sin clavos, la carga calculada fue de 5715 Kgf y la carga promedio real de falla fue de 5900 Kgf lo que corresponde a una diferencia de apenas el solo 3.2% con respecto al valor calculado.

Se observa que las cargas de falla para las columnas a las que se le colocaron clavos de acero en sus paredes fueron menores que las obtenidas para las que no se le colocaron, lo que indica que este procedimiento no contribuye a mejorar el comportamiento de las columnas frente a las cargas; una razón de esto radica en el hecho de que los clavos producen concentraciones de esfuerzo en las zonas que se encuentran sometidas a esfuerzos de tracción, situación que se evidencia al descubrir el tubo de acero y observar sobre el núcleo de concreto grandes grietas coincidiendo exactamente con los clavos colocados, ubicados en la zona de compresión de la columna (ver anexo B.9).

Otro detalle que se pudo evidenciar fue el que en el dispositivo colocado para registrar desplazamientos entre tubo y concreto no se llegaron a registrar desplazamientos notables mientras la carga aplicada estuvo por debajo de la carga de falla y fue solo en la zona cercana a la falla cuando se notaron ciertos registros en el comparador de precisión colocado para esto, que alcanzaron valores máximos de 0,41 mm., pero fueron principalmente producto del agrietamiento que se presentó en este punto debido a que aquí se colocó un pequeño clavo de “testigo” y adicionalmente sobre el tubo se dejó un agujero de $\frac{1}{2}$ pulg. de diámetro situación que igualmente condujo a la presencia de concentraciones de esfuerzo en ambos materiales.

El par de columnas que soportó la mayor carga, tal como se mostró, lo constituyeron las columnas reforzadas con concreto y aditivo “SIKACRETE”, y de esto se puede concluir que esta carga máxima fue alcanzada por la alta resistencia del concreto que se logró al añadirle aditivo la cual alcanzó un valor

muy elevado (732 Kgf / cm^2) y por otra parte se supone que también le confirió una mejor adhesión a la unión entre tubos y concreto. Es importante mencionar que este aditivo le da a la mezcla de concreto una consistencia muy fluida lo que permite un mejor manejo de la mezcla y menor esfuerzo de vibrado (ver gráfico 4.18).

Al descubrir la “envoltura” del tubo sobre el núcleo de concreto se observó después de 21 meses de vaciado una corrosión del tubo internamente casi inexistente lo que indica una ventaja adicional del reforzamiento con concreto, pues en la práctica estos tubos sin reforzar sufren una corrosión interna severa, sobre todo cuando están expuestos a la intemperie debido a que internamente no pueden ser protegidos.

Se observa en los resultados de las deformaciones unitarias registradas sobre el eje neutro teórico calculado, la presencia de pequeños valores de deformación (ver anexo A, extensómetro 2). Esta situación tiene su justificación en el hecho que la carga aplicada no cae exactamente sobre el otro plano centroidal, y esto conduce a que haya cierta excentricidad con respecto a este otro plano vertical y debido a que el extensómetro colocado sobre el plano neutro teórico, también se encuentra a 50 mm. del plano centroidal, entonces la excentricidad de la carga produce pequeños esfuerzos sobre la cara lateral de la columna. Esta excentricidad a su vez se debe a que, a pesar de las previsiones tomadas, los brazos de transmisión de carga no quedaron completamente paralelos entre si.

Una situación similar a la descrita en el punto anterior sucede con los esfuerzos en el plano centroidal de la columna, ya que no existe una relación directa entre la carga aplicada y los esfuerzos en el plano centroidal que deberían corresponder a esfuerzos axiales únicamente y al determinarlos experimentalmente empleando los extensómetros colocados en el plano centroidal, el valor del esfuerzo resulta más elevado. La justificación de este

resultado se debe a que en ese punto donde está colocado el extensómetro se presenta también un momento flector debido a la excentricidad de la carga en el otro plano centroidal de la columna que conduce a momentos flectores que cambian el valor del esfuerzo debido únicamente a carga axial.

Al considerar intervalos de carga y aplicar la fórmula de la secante, para los incrementos de carga resultantes, se obtienen valores de esfuerzo teóricos que se aproximan a los incrementos de esfuerzo que resultan de los valores correspondientes a los registrados por los extensómetros, tanto en tracción como en compresión, esto se manifiesta con mayor aproximación en la columna vacía o sin reforzar, la cual como es de esperarse presenta un comportamiento más predecible debido a que está formada por un solo material teóricamente homogéneo. En el caso de la columna reforzada las diferencias son algo más pronunciadas y esto se debe quizás a la no homogeneidad del material y debido también a que en los cálculos teóricos se trabaja con un módulo de elasticidad para el concreto que no están comprobado experimentalmente, y este valor constituye un requisito básico para poder obtener una sección equivalente más aproximada al valor real. Estas consideraciones se efectúan para cargas relativamente bajas, menores al 60% de la carga de falla, debido a que como es conocido, al aumentar la carga y pasar los esfuerzos a alcanzar valores correspondientes al rango plástico, la relación lineal entre los esfuerzos y las deformaciones unitarias se pierde.

Un efecto que no se considera en teoría, y que en estos ensayos de flexión tiene un significado importante, es el aumento del momento flector debido al aumento de excentricidad de la carga cuando la deflexión aumenta. Este efecto trae también como consecuencia que en la columna los esfuerzos de tracción alcancen valores aun más elevados y en el caso de las columnas reforzadas, los esfuerzos de tracción en el concreto traen como consecuencia agrietamiento que contribuye a alcanzar rápidamente la carga de falla en la

columna, a pesar de que en estos ensayos se tiene la presencia de un alto efecto de confinamiento.

Para cada columna se midió la deflexión en el punto medio de la misma, la cual debía corresponder a la deflexión máxima del elemento cargado, como resultado de esas mediciones se pudo observar que en las columnas reforzadas se presentaron las mayores deflexiones comparadas con la columna vacías sin reforzar (ver anexo A, datos de deflexión) . Este resultado aparenta no ser lógico pues se supone que el reforzamiento le debe conferir mayor rigidez a la columna sin embargo la explicación de esto se debe a que en las columnas reforzadas el fenómeno del pandeo local se produjo a cargas mucho más elevadas, pues el reforzamiento contribuye a evitarlo y al no presentarse tempranamente este pandeo, el aumento en la carga aplicada condujo a que las deflexiones se hiciesen muy pronunciadas y por lo tanto mayores a las que se midieron en la columna vacía.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

CAPITULO V
MANTENIMIENTO DE
ESTRUCTURAS

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

5.1 INTRODUCCION

Son diversas las definiciones que se establecen para indicar la vida útil de una estructura, una de ellas es la que la define como “El lapso durante el cual la estructura conserva todas las características mínimas de funcionalidad, resistencia y aspecto externo exigible”⁶. A fin de poder prolongar la vida útil de cualquier instalación o equipo el hombre se ha basado en la aplicación técnica de lo que conocemos como mantenimiento.

Se puede definir al mantenimiento como un conjunto de actividades que permiten mantener o restablecer las condiciones originales mediante las cuales una instalación o equipo fue diseñado, a un costo mínimo y con máxima seguridad. Al considerar esta definición como base, se puede decir que se supera el concepto de mantenimiento aplicado hasta la década de los años sesenta, en donde su objetivo principal consistía en la reposición de fallas aplicando procedimientos que hoy en día pueden resultar obsoletos. Con el paso del tiempo y a fin de mejorar la labor de mantenimiento se comenzaron a aplicar otras técnicas, tratando de prevenir las fallas originándose lo que conocemos como mantenimiento preventivo, técnicas muy aplicadas en la década del setenta y parte de los ochenta; sin embargo con el fin de reducir los altos costos que estas técnicas traían consigo y a fin de aumentar el rendimiento de maquinarias y equipos, aparece la tendencia a mejorar la “mantenibilidad” y a aumentar la “disponibilidad” lo que dio lugar a la aparición de un nuevo tipo de mantenimiento denominado Predictivo, el cual a su vez se basa en la condición del equipo. Esta nueva corriente tuvo desarrollos notables al apoyarse en los nuevos avances que ha tenido la computación y la informática; por lo que aunado a ello han surgido ciertas técnicas de mantenimiento que han tenido una aplicación muy extendida como son el MCC (Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad) y el MPT (Mantenimiento

⁶ Andrade C. Manual de Inspección de Obras. Instituto Educativo Torreja, España 1998.

Productivo Total), técnicas o filosofías de mantenimiento que están dirigidas o aplicadas básicamente a procesos y equipos industriales, donde el concepto de la productividad y el mínimo desperdicio tiene una importancia muy relevante.

En este capítulo se trata de plantear una relación estrecha entre los resultados indicados en los capítulos previos con la labor de mantenimiento en estructuras, para así poder prolongar la vida útil de estas últimas.

5.2 FUNDAMENTO

Es bien conocido por todos que tradicionalmente el sistema de construcción civil más comúnmente empleado en nuestro medio es el basado en el concreto y ladrillos o bloques de arcilla; sin embargo en los últimos años se ha notado una marcada tendencia a utilizar acero como elemento estructural en vigas y columnas y no como material de refuerzo en esos elementos que tradicionalmente eran vaciados en concreto.

Entre las razones que motivan a emplear a este material se pueden citar:

- El costo del acero se encuentra muy por debajo del de otros materiales, por ejemplo aluminio, con propiedades y características similares.
- Se puede considerar 100% reciclable, (66% del acero producido a nivel mundial es reciclado) por lo que las construcciones de acero se pueden catalogar como ecológicas.

- El costo de construcción es reducido, pues se puede obtener elementos prefabricados que pueden ser ensamblados fácilmente, lo que trae como consecuencia ahorros en tiempo y mano de obra.
- Posee alta ductilidad, por lo que proporciona alto grado de confiabilidad frente a golpes o movimientos sísmicos. Las fallas que pudiesen presentarse en la estructura generalmente no llegan a ser catastróficas.
- Posee alta resistencia, pues resiste elevados esfuerzos, lo que conduce a obtener estructuras más livianas comparadas con las que emplean concreto armado.
- Se pueden soldar fácilmente entre sí o pueden unirse también empleando tornillos o remaches. Esto reduce los tiempos de construcción.
- En el mercado se presenta una diversidad muy amplia de perfiles tanto tubulares como perfiles en I, en C, o en ángulos.
- Es incombustible lo que hace que las estructuras de acero presenten buen comportamiento frente al fuego a temperaturas inferiores al punto de fusión, aunque al elevarse su temperatura se vuelve muy plástico.
- Es durable pues es resistente a la acción de ciertos agentes naturales como hongos, termitas o roedores.
- Su gran desventaja, en el caso de aceros comerciales, estriba en la corrosión a que puede quedar sometido, sin embargo efectuando un buen esfuerzo de mantenimiento en su protección frente a esta, resulta en un material de muy larga durabilidad.

El otro material que interviene en este estudio es el concreto el cual también fue descrito en el capítulo 2. Para efectos de su utilización en la construcción de estructuras presenta también ciertas ventajas tales como:

- Un costo relativamente económico.
- Moldeable muy fácilmente.

Presenta una alta resistencia frente a los esfuerzos de compresión aunque muy baja frente a los esfuerzos de tracción, por lo que debe ser reforzado con acero.

- Presenta una durabilidad prolongada.

- Su mantenimiento es muy reducido.

- Excelente comportamiento frente al fuego.

Considerando al acero y concreto como materiales de una alta aplicabilidad en el desarrollo de nuevas construcciones de edificaciones así como en ampliaciones de las ya existentes, se plantea en este trabajo la justificación de emplear ambos materiales aprovechando las ventajas que estos presentan.

A manera de ejemplo y a fin de destacar la utilización de acero y concreto, se efectuó un muestreo de un grupo de 132 viviendas desarrolladas por el Instituto Nacional de la Vivienda en los años 80, en la ciudad de San Cristóbal, y que forman parte de la urbanización Pirineos, situada al este de esta ciudad. Del total de viviendas integrantes de la muestra se observó que 97 de ellas habían sido objeto de modificaciones o mejor dicho ampliaciones

Licencia Creative Commons:

98

respecto al área original de construcción. En algunas de ellas se construyó un segundo piso o planta adicional a la única planta que la conformaba originalmente y otras fueron ampliadas horizontalmente. El detalle importante a destacar consiste en que de las 97 viviendas reformadas, 48 emplearon perfiles de acero en su ampliación y se nota que el perfil tubular de 100mm x 100mm es uno de los que últimamente tienden a imponerse sobre otros perfiles tales como el perfil I o el perfil en U o C.

En función del ejemplo citado y a fin de lograr mejores resultados en la utilización de los perfiles tubulares y básicamente los de sección de (100 x 100) mm² o de mayor dimensión, es por lo que se trata de desarrollar aquí con el presente trabajo las ventajas que trae consigo el reforzamiento de dichos perfiles así como los beneficios que se presentan en la labor de mantenimiento de las estructuras donde se emplean los ya mencionados perfiles.



Figura N° 5.1 Ejemplo de una ampliación de vivienda que emplea perfiles tubulares de (100x100) mm²

5.3 OBJETIVOS

Los objetivos que se persiguen a fin de mantener a una determinada estructura con las características de diseño con que fue concebido y construida se pueden considerar como:

- Garantizar que el mantenimiento que se efectúe se lleve de una manera optima.
- Determinar y jerarquizar las necesidades de rehabilitación y ejecución de los trabajos de mantenimiento.
- Determinar y racionalizar los costos. Trabajar en función de presupuestos correspondiente periodos fijos, como presupuestos semanales, mensuales, anuales.
- Proyectar y planificar los trabajos a ejecutar, así como los requerimientos presupuestarios en función a periodos a mediano plazo, por ejemplo a tres o cinco años.
- Optimizar los criterios de evaluación de los proyectos de mantenimiento a fin de que los trabajos que se efectúen cumplan con todas las expectativas planteadas o en otras palabras, que se aplique un control de calidad a los trabajos de mantenimiento.

En cualquier estructura construida en base a concreto y acero es común que la misma tienda a deteriorarse con el tiempo debido a la acción agresiva de diferentes agentes naturales, lo cual no es mas que el proceso mediante el cual la naturaleza trata de revertir el procedimiento artificial empleado por el hombre para la elaboración de los diferentes materiales empleados en la

Licencia Creative Commons:

100

construcción. En el caso del concreto, que pudiese ser considerado como una roca artificial formada por agregados unidos por el cemento y el agua se tiene que este material tiende con el tiempo a agrietarse y disgregarse debido a los cambios de temperatura y al intemperismo, para convertirse de nuevo en arena, grava y cemento separados. También el acero formado por hierro y carbono es un material artificial inexistente en la naturaleza y por efecto de la oxidación se convierte en un material más estable tal como se encuentra en forma natural.

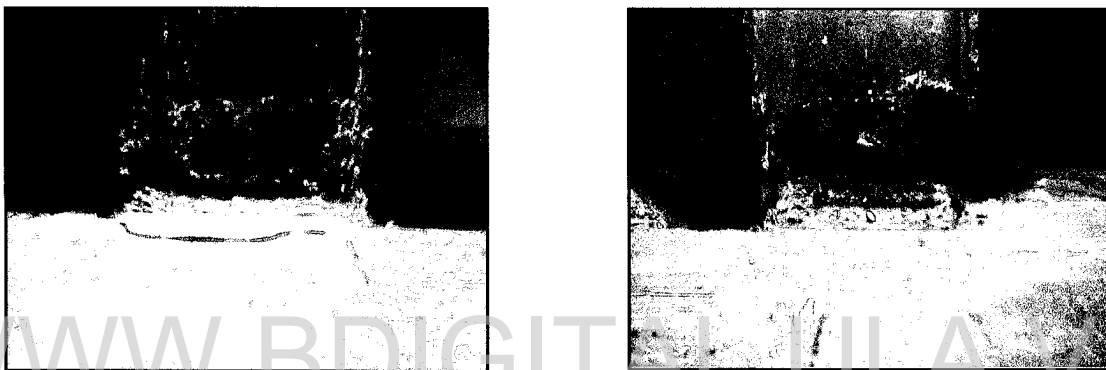


Figura N° 5.2 Casos típicos de columnas de acero afectadas por la corrosión

Los procedimientos que se establecen para el mantenimiento y conservación de las estructuras tienen por objeto preservar la vida útil de las mismas, mantener las condiciones de seguridad mínimas y también las condiciones de aspecto y presencia. Para ello es necesario que se efectúen periódicamente una revisión e inspección de las condiciones mínimas y así definir los trabajos que puedan llegar a requerirse básicamente en:

- Elementos de unión.
- Sistemas o mecanismos de protección contra la corrosión.
- Estado y condiciones de carga o de sobrecarga u otras condiciones diferentes a las estimadas para el uso inicial de la estructura.

- Condiciones y estado de los apoyos.
- Sistemas y factores que intervienen en la protección contra el fuego o contra otras condiciones que produzcan riesgos contra la seguridad.

En principio debido a la crisis económica que afecta al país, también debido a la carencia de una cultura conservacionista y quizás también debido a la falta de reglamentaciones y ordenanzas, una gran cantidad de obras y estructuras tanto públicas como privadas, carecen de planes o programas de mantenimiento bien organizados por lo que el deterioro de dichas obras es un hecho muy común en nuestro medio. Una manera de solventar esta situación consiste en aplicar planes de mantenimiento y conservación bien formulados, bajo esquemas técnicos donde a partir de evaluaciones e inventario de las obras y de las condiciones de las mismas se lleguen a definir prescripciones para solventar las deficiencias detectadas y donde adicionalmente se definan otros trabajos de mantenimiento programados con una priorización de necesidades; para así lograr una optimización de los recursos tanto en materiales, equipos y mano de obra disponibles.

5.4 INSPECCIÓN

Se puede considerar a la inspección como la primera fase a efectuar cuando se requiere aplicar de manera técnica el mantenimiento de una estructura y consiste en un conjunto de acciones llevadas a cabo en función de una planificación previa y efectuada por personal capacitado, de tal modo que se puedan obtener los datos e información necesaria para así evaluar el estado físico y funcional de una estructura.

Como el concepto de seguridad está estrechamente relacionado con las fallas y el deterioro que una estructura pudiera presentar, se puede considerar

que como resultado de la inspección se deben de determinar los riesgos a la seguridad a fin de que cualquier estructura este exenta a que sobre ella se pueda presentar un colapso; sin embargo debido a ciertos factores como es el caso de los sismos o incendios ese riesgo de colapso puede en cualquier momento considerarse factible.

En una estructura se pueden definir dos tipos de fallas, la mas crítica sería la falla catastrófica, caracterizada por ser completa y repentina y en muchos casos no anticipable por alguna inspección y el otro grupo de fallas estaría conformado por fallas por degradación, cuya característica principal es la de ser graduables y parciales y por lo tanto son factibles de ser detectadas en forma temprana mediante una inspección sistemática.

También vinculado al concepto de seguridad se tiene al concepto de funcionalidad el cual propende a mantener a la estructura bajo determinadas condiciones de servicio; y si el mantenimiento se efectúa a partir del mismo momento en que se construye a la estructura, es obvio que se debe efectuar una inspección continua que asegure que se tomen las medidas adecuadas para efectuar así su mantenimiento, logrando a su vez la máxima economía. Es por esto que en la labor de mantenimiento se deben considerar no solo los costos directos de reparación sino también los costos indirectos que resultan de retrasar las reparaciones que deban y no llegan a efectuarse.

Un programa de inspección sistemática deberá proporcionar los datos necesarios que sirvan de base en la toma de decisiones sobre los trabajos de mantenimiento tanto en reparación rutinaria como en la sustitución de algún elemento estructural o en la estructura completa.

5.4.1 INSPECCIÓN DE ESTRUCTURAS

Tal como ya fue mencionado, la manera de conocer el estado y la condición exacta de una estructura es mediante un programa organizado de inspecciones. La inspección es una actividad que debe realizarse de manera sistemática, ya que de ella dependen las sugerencias y recomendaciones de los trabajos a realizar para corregir daños y defectos de la estructura o en el deterioro que se haya acumulado y que pudiese convertirse en daño severo si no es corregido a tiempo.

A fin de que la información que se recopile sea satisfactoria y confiable, la inspección debe realizarse con una determinada periodicidad.

Las inspecciones se pueden clasificar en inspecciones rutinarias, inspecciones para evaluación estructural y en inspecciones por emergencia.

Las inspecciones para evaluación estructural se recomienda efectuarlas cada dos o cuatro años. Generalmente requieren de equipos especializados, o pueden ser contratados a empresas especialistas.

Las inspecciones por emergencia se efectúan en casos excepcionales debido a la presencia de lluvias torrenciales, inundaciones y sismos de relativa intensidad o en terremotos; ya que estos fenómenos pueden generar daños importantes a la estructura debido a socavaciones, derrumbes, deslaves, etc., que deben evaluarse inmediatamente.

5.4.2 REPORTE DE INSPECCIÓN

Con el fin de elaborar los reportes producto de las inspecciones que se efectúen, se debe llevar a cabo una identificación precisa y un inventario de la estructura. Esta información debe ser recopilada y archivada de tal manera que pueda formarse un banco de datos o historial para la estructura y que a su vez sea la base en la programación de la labor de mantenimiento. En la información que se compile deben disgregarse dos tipos de datos unos que normalmente permanecen invariables tales como la identificación de la estructura, su ubicación, sus características físicas y funcionales y por otra parte se debe recopilar los datos específicos del estado de conservación de la estructura, estos últimos pueden variar con el tiempo y constituyen la información básica de la inspección.

A fin de que la información recopilada sea lo más objetiva y confiable, quien realice la inspección debe ser personal capacitado y entrenado para tal efecto.

Es importante también en la inspección incluir un reporte fotográfico de los elementos mas importantes, ya que este sirve de gran ayuda a la hora de mostrar los detalles de la labor de inspección y por otra parte sirve de soporte al informe que se presente.

5.4.3 REPORTE DE FALLAS

Consiste en describir detalladamente los daños o fallas que presente la estructura. En el es conveniente emplear los planos de la misma para ubicar de manera precisa las fallas detectadas tales como grietas, corrosión, desconchamientos, etc. En este reporte se deben dar detalles como por

ejemplo dimensiones de una grieta, su avance; las áreas donde se ubiquen resquebrajamientos de frisos, defectos de pintura etc.

De esta actividad depende no solo la identificación de las necesidades de mantenimiento sino también la obtención de información que permita la planificación y diseño de los planes de mantenimiento a corto y a mediano plazo.

5.4.4 JERARQUIZARON DE LAS NECESIDADES DE MANTENIMIENTO

Al disponer de un banco de datos para la estructura se pueden definir determinados aspectos como por ejemplo la estimación de la vida útil remanente de la misma o se puede disponer de información para evaluar el aspecto estructural o el funcional e igualmente junto con los resultados de la inspección permite definir las acciones que se deban tomar. Dentro de estas acciones se pueden presentar los siguientes casos:

- *Acciones nulas*: es decir no efectuar ninguna acción, lo cual en determinadas circunstancias pudiese corresponder a una medida técnicamente válida.
- *Acciones preventivas*: Son acciones que deben definir cierto comportamiento por ejemplo el monitoreo de grietas, o también al efectuar otras inspecciones o inspecciones mas frecuentes, determinar capacidad de carga, etc.
- *Acciones ejecutivas o de mantenimiento*: son aquellas referidas a la realización de ciertos trabajos en la estructura. Estos trabajos estar sujetos a diferentes niveles de atención o prioridad, todo en función de las consecuencias que su no ejecución pueda acarrear. A su vez esa

jerarquizaron debe ser llevada a la programación de los trabajos de mantenimiento que se estiman a corto o mediano plazo.

Para efectuar o establecer el programa de mantenimiento se debe de disponer de un listado de las actividades que recomienda la inspección, especificando la naturaleza y el grado de urgencia sugerido. También es importante mencionar que adicionalmente a las necesidades detectadas en la inspección se deben ejecutar otras tareas de mantenimiento que pueden ser consideradas como rutinarias o de mantenimiento preventivo que se tengan previamente programadas.

5.5 CORROSIÓN

La corrosión es un fenómeno que se nos presenta de manera muy común en nuestra vida diaria; ciertos utensilios y herramientas domésticas deben ser cuidadosamente limpiados o deben ser pintados para poder conservarlos y así poder utilizarlos por mucho mas tiempo.

En general la corrosión es un fenómeno que afecta considerablemente la economía de un país. Según datos del programa de desarrollo científico y tecnológico de la O.E.A., las incidencias de la corrosión se sitúan entre el 1,5 y el 3 % del producto nacional bruto en numerosos países latinoamericanos. En las edificaciones es el factor crítico determinante en la reducción de la durabilidad del concreto estructural debido a la falta de su control en los aceros de refuerzo.

En las estructuras metálicas, por lo general, su inicio y avance es observable con mucha claridad, lo que permite tomar medidas oportunas para su control, mientras que en las estructuras de concreto este fenómeno

Licencia Creative Commons:

permanece encubierto y cuando se descubre quizás es demasiado tarde para subsanar el daño, sólo en casos muy excepcionales se aplican otros procedimientos como rayos X ó Ultrasonido. También la corrosión en estructuras pre o post tensadas pueden provocar el colapso de la misma, pues cuando ocurren fallas en ellas estas suelen ser catastróficas; un ejemplo de ello lo constituye el colapso del puente "Silver", sobre al río Ohio en Estados Unidos, ocurrido en el año 1967 y el cual costo la vida a 46 personas.

5.5.1. DEFINICIÓN Y CARACTERÍSTICAS

Se define a la corrosión como la acción química, electromecánica, mecánico-química o biológica de la naturaleza que degrada y destruye a los materiales. Este fenómeno se presenta con más evidencias en cuerpos sólidos como metales, cerámicas, polímeros artificiales, agregados, etc.

Su presencia en la materia sólida, básicamente consiste en la pérdida del equilibrio de las fuerzas cohesivas, fuerzas que son de naturaleza eléctrica. Estas fuerzas son el resultado del equilibrio entre los núcleos atómicos con carga positiva y los electrones con carga negativa; y las fuerzas repulsivas de los electrones entre sí y de los núcleos atómicos entre sí.

5.5.2 TIPOS Y FORMAS DE CORROSIÓN

Para evaluar y prevenir los daños producto de la corrosión es conveniente clasificarlos de acuerdo a como se producen: cuando la superficie del metal se corroe de una forma casi uniforme se dice que la corrosión es del tipo superficial. Esta es la forma menos perjudicial pues el material se va gastándose de manera gradual extendiéndose la corrosión de manera homogénea sobre toda la superficie metálica y su penetración media es casi

igual para cualquier punto. Un daño en esta forma permite evaluar sin dificultad la vida útil o de servicio de los materiales expuestos a él.

En otras ocasiones el ataque por la corrosión se profundiza más en ciertas áreas, pero sin dejar de ser general, lo que constituye un caso intermedio entre corrosión general y corrosión localizada en este caso se le llama corrosión “en placas”.

Existe otra forma de corrosión conocida como “Corrosión por picadura” que se presenta cuando la superficie metálica que ha sido pasivada eléctricamente se expone a un medio agresivo. En este caso el ataque se localiza en puntos aislados y se prolonga hacia el interior formando túneles microscópicos.

Por otra parte la corrosión se puede presentar en las siguientes formas en las cuales existe una diferencia en su apariencia:

- *Corrosión General*: Es la forma más común y la más importante en función de los costos. Se caracteriza por un ataque aproximadamente uniforme con pocas diferencias en la profundidad del daño. En las estructuras se pueden usar recubrimientos especiales para minimizarla.
- *Corrosión Galvánica*: Se presenta cuando 2 o más metales distintos se acoplan eléctricamente y se presenta una diferencia de potencial entre los dos metales, lo que causa un flujo de corriente entre ellos. El metal más activo sufre una corrosión acelerada mientras que la corrosión en los metales menos activos se retarda o se elimina.

- *Corrosión por Hendiduras*: Es un tipo de corrosión que se presenta en espacios confinados o hendiduras que se forman cuando los componentes se encuentran en contacto. Estos componentes deben ser metálicos.

- *Corrosión por Picaduras*: Este es un tipo de corrosión donde el ataque está confinado a muchas cavidades pequeñas en la superficie del metal, estas cavidades pueden variar en forma tamaño y cantidad. Si este ataque se hace severo puede conducir a fallas generales del elemento, sobre todo si está sometido a esfuerzos de tracción elevados. Este tipo de corrosión es frecuente en aceros inoxidables y aleaciones de aluminio.

5.5.3 PROTECCIÓN DEL ACERO CONTRA LA CORROSIÓN

El problema más común con la utilización del acero es su susceptibilidad a la corrosión. En un mismo material, debido al origen electroquímico de la corrosión se presentan áreas con diferencias de potencial, lo cual es atribuible a la capa de óxido remanente propia del proceso de laminación del acero empleado en su fabricación, en donde las áreas oxidadas son catódicas respecto a otras áreas sin óxido o respecto también a diferencias en el oxígeno disuelto en el agua u otro electrolito en el cual se puede encontrar inmerso. Por lo tanto para que el acero se corra no hace falta más que el mismo quede expuesto al oxígeno del aire o al estar expuesto a otros agentes como el agua de lluvia o de mar. Este fenómeno es más notorio si el ambiente corresponde a un ambiente marino donde hay presencia de sal en forma de iones cloruro.

Para evitar la corrosión se presentan cinco alternativas posibles a aplicar:

- Utilizar acero inoxidable en lugar de acero normal, el acero inoxidable es una aleación de acero con otros metales como cromo y níquel que crean una característica particular en la que la aleación no se corroe pues no se mezcla

Licencia Creative Commons:

110

con el oxígeno del medio. Sin embargo el alto costo de este tipo de acero no lo hacen práctico para ser empleado a gran escala en estructuras y su uso se restringe a utensilios y herramientas de pequeñas dimensiones.

- *Recubrir el Acero con Zinc*: al recubrir el acero con otro metal mas activo como el zinc constituye lo que es el proceso de galvanizado, ya que en este caso, el acero se comporta como ánodo y el zinc como cátodo. La desventaja de este procedimiento es que muchas veces no es práctico pues el acero a recubrir debe ser introducido en un recipiente de zinc fundido, lo cual debe efectuarse en talleres especializados. Esto hace que este proceso sea aplicado solo a pequeños objetos fabricados de acero. También , sobre una pieza que ha sido galvanizada no se le puede efectuar ninguna operación de corte o taladrado ya que se destruye la integridad del recubrimiento.

- *Recubrimiento con Plásticos*: El recubrimiento con plásticos es otra alternativa para evitar la corrosión pero al igual que el galvanizado, su aplicación se da en talleres especializados y generalmente a piezas pequeñas lo que lo hace también un procedimiento poco práctico.

- *Recubrimiento con Pinturas Anticorrosivas*: Este es el procedimiento mas común para proteger elementos y estructuras de gran tamaño. Para este proceso se debe limpiar la superficie a pintar muy cuidadosamente con cepillos de alambre u otro proceso mecánico como por ejemplo el chorro de arena. Se debe aplicar una primera capa imprimante preferiblemente basada en zinc y luego aplicar dos capas más de pintura epóxica sobre una base de brea.

- *Protección Catódica*: Esta es una protección que se aplica básicamente a estructuras que están generalmente sumergidas en agua de mar. Aquí se emplean ánodos de zinc los cuales se conectan eléctricamente de tal manera que el proceso electrolítico no afecte el acero.

5.6 ACCIONES DE MANTENIMIENTO

Como objetivo básico, al efectuar el mantenimiento en las estructuras se pretenden conservar a las mismas con todas las condiciones iniciales de servicio con los cuales fueron diseñadas y construidas.

El no efectuar el mantenimiento adecuadamente da lugar a problemas de funcionalidad y seguridad que pudieren llegar a alcanzar niveles graves, por ejemplo riesgo en la seguridad de la estructura, acortamiento en la vida útil, etc. También existen otras razones o causas por las cuales es necesario efectuar el mantenimiento tales como:

- Errores en el proyecto o en la construcción.
- Empleo de materiales no adecuados o deterioro y degradación de los mismos.
- Agentes naturales de tipo físico, mecánico o químico por ejemplo cambios notorios en la temperatura, presencia de agua, corrosión, etc.
- Efectos externos como inundaciones explosiones, derrumbes, etc.
- Deterioro por uso.

En función a la intensidad del deterioro que pudiese presentarse o a su acumulación se pueden considerar tres tipos de acciones de mantenimiento:

- Mantenimiento preventivo o rutinario.
- Mantenimiento correctivo o reparaciones.

Licencia Creative Commons:

112

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

- Reforzamientos.

Con el mantenimiento preventivo se persigue mantener la vida útil de la estructura evitando una acumulación del deterioro, con el mantenimiento correctivo y con los reforzamientos se pretende que la estructura recupere su nivel de servicio similar al de su condición original o en ciertos casos aún mejorarlo.

5.6.1 MANTENIMIENTO PREVENTIVO

Las tareas de mantenimiento preventivo son aquellas que se programan con anticipación y se llevan a cabo con una periodicidad fija o se ejecutan en ciertas oportunidades en función de la evolución del estado o condición de cierto elemento y debido a que este así lo requiera; es por lo que estas tareas pueden dividirse en dos grupos, tareas ordinarias y tareas extraordinarias. En el primer grupo se ejecutan labores que como se dijo, se efectúan con cierta periodicidad fija, por ejemplo inspección general, limpieza, pintura. En el segundo grupo se tienen las actividades que se realizan ocasionalmente y por lo general, como resultado de detectar una evolución en las condición de la estructura, por ejemplo rehabilitación de concreto degradado, impermeabilización, aplicación de pintura anticorrosiva en ciertos elementos, protección de apoyos, etc.

5.6.2 MANTENIMIENTO CORRECTIVO

Comprende todas aquellas actividades que se deban ejecutarse para devolver a la estructura a su condición original de servicio y por lo general corresponder a respuestas a eventos que se presentan de manera intespestiva.

Para las estructuras se considera que este tipo de mantenimiento debe ser muy reducido pues se debe esperar que cualquier daño pueda ser detectado a tiempo para así evitar reparaciones más costosas; sin embargo en casos de ocurrencia de sismos, inundaciones, derrumbes, etc., se pueden presentar daños que no pueden ser previstos.

Dentro de las actividades de mantenimiento correctivo o reparaciones comunes que se efectúan se tiene:

- Eliminar el concreto cuarteado o desagregado y sustituirlo por un mortero de reparación.
- Reparación de grietas.
- Rehabilitación de concreto degradado
- Colocación de refuerzos en unión de elementos estructurales.
- Reparación de vigas y columnas golpeadas.

5.6.3 REFORZAMIENTOS

Se consideran reforzamientos a actividades que se ejecutan sobre una estructura y que le permiten a la misma subsanar alguna deficiencia debido a fallas en el diseño y construcción o mejorar sus condiciones originales en el aspecto estructural debido a cambios que ocurran en el aspecto funcional.

Para llevar a cabo la tarea de reforzamiento se emplean a su vez reforzamientos en el concreto armado y en los elementos estructurales metálicos, En el concreto armado se puede efectuar aplicando un refuerzo

adicional o recrecido de las dimensiones de los elementos, aplicando concreto proyectado o mediante la unión al concreto de placas y perfiles metálicos.

En los elementos estructurales metálicos se logran reforzamientos al unir a los mismos, generalmente mediante soldadura, elementos como placas, perfiles, armaduras ó tirantes; de tal manera que se logren reducir los esfuerzos en los elementos estructurales al aumentar el área de las secciones transversales de estos o en consecuencia al aumentar los momentos de inercia de la sección.

5.7 APLICACIÓN PRÁCTICA DEL REFORZAMIENTO DE COLUMNAS AL MANTENIMIENTO DE ESTRUCTURAS

En el presente trabajo se han encontrado resultados que muestran las ventajas que presenta el emplear el reforzamiento de columnas de sección tubular mediante el vaciado de un núcleo de concreto. Dentro de algunas de esas ventajas se pueden citar las siguientes:

- Con el reforzamiento se aumenta la resistencia de la columna. Tal como se comprobó con los resultados indicados en el capítulo IV, la carga máxima, que puede soportar la columnas antes de la falla, puede llegar a aumentar hasta 43% con respecto a la carga máxima que puede soportar la columna vacía sin reforzar. Este resultado corresponde al caso estudiado, donde la columna tiene una relación de esbeltez que la ubica dentro del grupo de columnas cortas. En otros estudios⁷ aplicados sobre el mismo tipo de tubo de acero, pero a columnas esbeltas o largas, la capacidad portante del elemento llega a aumentar hasta cuatro veces y media con respecto al elemento vacío. La razón de esto se debe a que se obtiene, en ese caso, un aumento significativo en la

⁷ Metodología para el diseño de columnas tubulares de acero con núcleo de concreto. Tesis de postgrado por Ing. Jesús Flores ULA. Mérida 1998

rigidez del elemento o indirectamente se logra reducir la relación de esbeltez de la columna.

- Se encontró también como un resultado adicional en este trabajo, que después de un periodo relativamente largo después del vaciado (21 meses), al cortar longitudinalmente la pared del tubo y descubrir así el núcleo de concreto, que la presencia de corrosión en la pared interna del tubo era casi nula a pesar de que la pared externa, aun no expuesta a la intemperie, presentaba una marcada oxidación. Este fenómeno puede decirse que se debe a la ausencia de oxígeno libre en el concreto o en el interior del tubo. Este hecho es de importancia vital ya que en una estructura donde se emplee tubulares estructurales vacíos, la corrosión es inminente y se haría más pronunciada si por alguna razón el tubo, queda abierto a la atmósfera, o si se llega a acumular agua en su interior, situación esta que puede ser de factible ocurrencia en muchas estructuras de este tipo. Por otra parte la gran desventaja que ello implica estriba en el hecho de que esa corrosión que se desarrolla queda encubierta, pues no esta a la vista para ser detectada y así poder ser efectuada una reparación en el material (acero) y luego al llegar a descubrirse el daño, debido a una corrosión ya muy avanzada, que se visualiza hasta en la pared externa, es quizás ya muy tarde para su reparación.

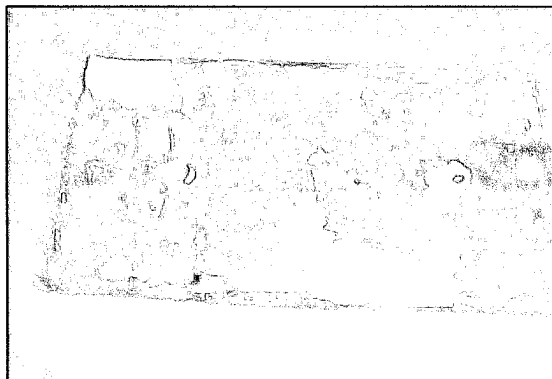


Figura N° 5.3 Vista de la pared interna del tubo, al cortar la probeta, sin muestras aparentes de corrosión

- Otra gran ventaja del vaciado de concreto a la columna tubular es el que la columna se hace mucho más resistente al fuego. En el caso de una edificación donde sus columnas están construidas por tubulares vacíos y que quede circunstancialmente sometida a la acción de un incendio en su interior, la resistencia de estas columnas puede reducirse enormemente debido al cambio de las propiedades físicas del acero con el aumento de la temperatura, pues el mismo se vuelve muy plástico. Un ejemplo patético de esta situación lo constituye el caso del derrumbamiento de las torres del "World Trade Center", el 11 de Septiembre del 2001, en U.S.A. Según un análisis preparado por la Asociación de Ingenieros designada para efectuar el estudio de las causas de la caída de las torres, se concluyó que: "... un núcleo de concreto en las columnas podría haber mantenido las torres en pie por lo menos por mucho más tiempo" y "La inversión que ello hubiere requerido, hubiese sumado tan sólo un 1 % o máximo 2% de los costos originales"⁸.

- Los costos de aplicar el reforzamiento con concreto a tubos de acero son muy bajos. Cuando este procedimiento se aplica en el proceso de construcción, el costo es casi ínfimo, pues no se requiere de encofrados, o de cualquier equipo especial, se puede utilizar cualquier tipo de concreto, inclusive con agregados de piedra con tamaños diferentes. En el caso de estructuras que posean tubulares como columnas y que se encuentren ya construidas, el reforzamiento se puede efectuar utilizando un concreto con un aditivo que lo haga más fluido y por una abertura o "ventana" que se le efectúe a la parte superior de la columna tubular, se le puede vaciar el concreto bien sea por gravedad utilizando un recipiente plástico que posea una manguera para efectuar el vaciado, o también pudiese emplearse un equipo de bombeo para concreto.

- También es importante mencionar que al estar la columna tubular llena o vaciada se evita la acumulación de cualquier sustancia, especialmente agua, ya

⁸ Diario el Nacional, pag. F-4, miércoles 19 de Septiembre de 2001, traducción de artículo del "The wall street Journal" por T. Burton y J. Eig.

que como se mencionó, la misma se convierte en un factor altamente corrosivo para la columna.

- Otra ventaja intrínseca del reforzamiento de columnas tubulares, lo constituye el hecho de que aplicar el mismo, la estructura mejora su capacidad de carga y esta situación permite en el caso de edificaciones ya construidas, otras aplicaciones funcionales o cambios de uso para la estructura en los cuales se requieran mayores sollicitaciones a los elementos estructurales. También en el caso de situaciones imprevistas como sismos, derrumbes, choques, inundaciones, etc., el comportamiento de la estructura resultará mucho más favorable frente a esos imprevistos.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

CAPITULO VI
CONCLUSIONES Y
RECOMENDACIONES

WWW.BIBLIOTECADIGITAL.VE

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

6.1 CONCLUSIONES

a) El reforzamiento de columnas tubulares de acero al incorporarles un núcleo de concreto conduce a un aumento significativo de la resistencia de la columna. En los ensayos realizados a pesar de haber aplicado flexo-compresión a un elemento relativamente corto, con una relación de esbeltez muy pequeña este mostró una mejoría considerable en su comportamiento. Es importante señalar que, en la realidad y en aplicaciones prácticas, las relaciones de esbeltez de las columnas que se emplean son considerablemente más elevadas, esto trae como consecuencia que la carga crítica sea mucho menor que la carga que produce la falla en un elemento de una relación de esbeltez baja. Una manera de conseguir el poder aplicar mayores cargas en una columna es, entonces, poder tener menores valores para la relación de esbeltez y esto a su vez se logra aumentando el momento de inercia de la sección, situación que se presenta al reforzar la columna cuando se le vacía un núcleo de concreto.

En este trabajo de investigación experimental se determinaron aumentos de hasta 43% en la carga de falla de la columna reforzada con respecto a la de la columna vacía, sin embargo en los casos de columnas largas, sometidas a carga axial solamente, se deben de lograr aumentos muy por encima de los valores alcanzados aquí, de acuerdo a los resultados obtenidos por Flores, Jesús, en su tesis de grado: Metodología para el Diseño de Columnas Tubulares de Acero con Núcleo de Concreto, ahora debido a las limitaciones de la máquina universal de ensayos, no se pudo estudiar columnas con mayores relaciones de esbeltez, pues se requerirían de columnas con longitudes de aproximadamente 2 metros o más, para lo cual no se disponía de equipos para esos fines (ver nota nº 7 de pie de página).

b) En las columnas empleadas en la práctica, aunque estas lleguen a cargarse excéntricamente, los valores de los momentos flectores ensayados

Licencia Creative Commons:

120

superan exageradamente los valores que se pueden presentar en esos casos de la vida real, esta situación condujo a la aparición de pandeos elevados en la columna-probeta y tal como se explicó, en la teoría de las columnas, el pandeo produce esfuerzos tanto de tracción en la cara externa como de compresión en la cara interna de la muestra y en consecuencia los esfuerzos de tracción que también se presentan en el concreto conducen a agrietamientos en este material y reducen su capacidad portante de carga. Sin embargo es importante reiterar que aquí se compensa esa debilidad del concreto debido al efecto de confinamiento que se presenta en este tipo de reforzamiento, al actuar el tubo como una camisa de presión que hace que se generen presiones triaxiales sobre el concreto, aumentando por ende su resistencia tanto a las cargas como a la posibilidad de aparición de grietas.

c) Se determinó experimentalmente que los deslizamientos entre el tubo de acero y el núcleo de concreto prácticamente son inexistentes hasta valores cercanos a la carga de falla y es solamente cuando se acerca la carga aplicada a este valor de falla cuando se notan estos desplazamientos; y se observó también que dichos desplazamientos aparecen cuando comienzan a presentarse agrietamientos sobre el concreto lo cual, como se dijo, ocurre a valores muy cercanos a la carga de falla.

d) Otro hecho que tiene una relación muy estrecha con la conclusión anterior lo comprende la simultaneidad que se presenta, en la aparición del pandeo local y la falla en la columna, y es de suponer que como en el pandeo local se presentan abombamientos o abultamientos en las paredes laterales del tubo, esta característica conduce a su vez a que la presión del confinamiento se reduzca o desaparezca, y por ende se pierda el aumento de resistencia alcanzado adicionalmente por el concreto, lo que conlleva a la aparición de las grietas y a la falla en este material.

e) La mezcla formal empleada para el reforzamiento fue diseñada a partir del manual del concreto fresco utilizado ampliamente en la construcción y comprobado en la práctica en diversos laboratorios; sin embargo se comprobó que las resistencias obtenidas a partir de los cilindros testigos resultaron muy por encima de los valores de diseño. Esta particularidad debe ser justificada por el hecho que el concreto vaciado dentro de los tubos no presenta pérdidas del agua de la mezcla, lo que contribuye según la teoría del concreto a mejorar su resistencia, y esto se puede considerar como una ventaja apreciable al adoptarse este tipo de reforzamiento en las columnas y otros elementos estructurales.

f) Se comprobó, en función de las cargas máximas soportadas por cada tipo de columnas ensayadas, que el efecto de colocar clavos de acero atravesando las paredes del tubo y penetrando sobre el núcleo del concreto, en lugar de mejorar el comportamiento resistente de la columna lo perjudica pues estos clavos a pesar de estar separados entre sí por distancias razonables, generan concentraciones de esfuerzo sobre el concreto y a su vez se producen agrietamientos en los puntos donde se colocaron, situación que fue comprobada cuando se destaparon o se descubrió el concreto al cortar el tubo de acero y de nuevo es importante reiterar que a pesar de que la columna estuvo sometida a elevados esfuerzos cortantes no se presentaron desplazamientos notables entre los dos materiales, situación que indica la inutilidad de colocar esos clavos.

g) Un detalle de mucha relevancia lo constituyó el hecho de comprobar al descubrir el concreto, que la corrosión del acero en las paredes internas no estaba presente, a pesar de que cuando se efectuó este procedimiento ya habían transcurrido cerca de 21 meses de la fecha del vaciado del concreto. Esta característica constituye una ventaja muy apreciable al adoptarse este reforzamiento en la práctica.

h) Aunque no fue materia tratada en esta investigación, otra ventaja que se encuentra de manera palpable a aplicar este tipo de reforzamiento, lo constituye el hecho de que al poseer las columnas un núcleo de concreto, esta característica le confiere un mejor comportamiento frente al fuego que pudiese llegar a presentarse en la edificación, puesto que el acero puede llegar a fundirse a temperaturas (2230°C) en las que el concreto aún presenta una solidez muy marcada.

i) Otro aspecto relevante en este tipo de reforzamiento es que presenta un costo muy económico y muy fácil de realizar, sobre todo en el caso de construcciones nuevas. Para columnas pertenecientes a edificaciones ya realizadas aún pudiese adoptarse este sistema, aunque no con las mismas facilidades que se pueden aplicar para nuevas construcciones. En el caso de aplicarse reforzamientos con concreto y aditivo "SIKACRETE", se llega a obtener con este aditivo una mezcla muy fluida la cual pudiese ser bombeada a través de una pequeña abertura que se efectúe sobre la parte superior de la columna, lo cual solventaría relativamente las dificultades de aplicar este reforzamiento en columnas pertenecientes a estructuras ya construidas.

j) El reforzamiento de por sí debe conferirle a la comuna una mayor rigidez. En este trabajo se midió la deflexión máxima para cada carga en todas las pruebas efectuadas, sin embargo, se obtuvo en las columnas reforzadas valores de deflexión más elevadas que en las columnas sin reforzar. Esta situación se debió al hecho de que en las columnas reforzadas el pandeo local fue más restringido debido al reforzamiento, lo que a su vez condujo a que al aumentar la carga a valores más altos se llegasen a alcanzar valores más elevados de deflexión. Un beneficio que se logra al reforzar las columnas es el que se obtienen elementos más rígidos frente a cargas reducidas o que estén muy por

debajo de las cargas de fluencia y se dice que esto resulta beneficioso puesto que las estructuras que emplean acero en sus elementos estructurales son muy flexibles en su conjunto y esto acarrea problemas de agrietamientos en pisos, paredes, frisos, etc., debido a las deflexiones que se presentan en vigas y columnas.

6.2 RECOMENDACIONES

a) Como principal recomendación puede decirse que las ventajas que se lograron con el reforzamiento de columnas de acero de sección tubular al vaciarse el concreto, son considerables lo cual debe ser una modalidad que debería ser promovida en todas aquellas personas y entes que tengan relación con esta área.

b) Estos trabajos de investigación relativos al área considerada deben ser promovidos en profesionales y empresas ligados al diseño y construcción civil, ya que conducen a soluciones muy efectivas y de aplicación práctica muy simple.

c) Es recomendable profundizar mas en esta área, pero para ser más realista con los objetivos que se persiguen, se sugiere efectuar los estudios empleando equipos que permitan ensayar modelos de longitudes mayores, puesto que no existe la posibilidad de trabajar a escala ya que los resultados que se obtendrían no serían realistas en vista que intervienen una serie de aspectos que no pueden manejarse de otra manera, tal es el caso de las mezclas de concreto.

d) Otra razón para recomendar profundizar en este estudio es el hecho en que en el mercado existen diferentes tipos de tubos o perfiles estructurales, que aún poseyendo dimensiones similares, poseen espesores de pared diferentes y

también con otras calidades de acero, entonces resulta necesario evaluar otras diferentes alternativas. También es importante considerar reforzamientos con mezclas de concreto diseñadas para otras resistencias y así poder recopilar mayor información y más generalizada , que pueda ser utilizada en la práctica.

e) Debido a que los aumentos en la rigidez de los elementos estructurales, resulta ventajoso en edificaciones, es recomendable efectuar un estudio más específico donde se analice el efecto que el reforzamiento produce con relación a la rigidez adicional que se le confiere al elemento estructural.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

WWW.BDIGITAL.ULA.VE **ANEXOS**

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

ANEXO A

RESULTADOS EXPERIMENTALES DEL PROCESO DE CARGA

A continuación se presentan los datos recopilados de la aplicación de carga a cada uno de los cuatro tipos de columnas.

A1.- COLUMNA VACIA

DATOS COLUMNA VACÍA CON 4 EXTENSÓMETROS					
Carga (Kgr.)	deflexión (10-4 pulg)	Ext 2 ($\mu\text{in/in}$)	Ext 3 ($\mu\text{in/in}$)	Ext 1 ($\mu\text{in/in}$)	Ext 4 ($\mu\text{in/in}$)
200	valor de precarga				
160	0	0	0	-70	-24
160	10	0	40	-92	-26
240	20	0	86	-118	-28
280	30	0	86	-121	-28
320	40	0	102	-138	-30
320	50	0	100	-152	-30
280	20	0	30	-104	-28
160	0	0	10	-58	-24
160	10	0	24	-94	-28
240	20	0	60	-110	-28
280	30	0	80	-124	-28
320	40	0	100	-142	-30
320	50	0	100	-156	-32
360	60	0	112	-170	-32
400	70	0	120	-184	-34
400	80	0	138	-202	-36
400	90	0	138	-220	-40
480	100	0	148	-236	-40
400	60	2	94	-164	-36
280	30	2	60	-120	-30
160	-10	-10	30	-52	-26
160	20	0	20	-82	-28
240	40	0	44	-112	-28
380	60	0	94	-142	-30
360	80	0	92	-172	-34
440	100	0	136	-202	-38
480	120	6	156	-238	-42
560	140	6	190	-268	-46
600	160	6	212	-298	-48
680	180	8	224	-330	-52

Licencia Creative Commons:

127

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

DATOS COLUMNA VACÍA CON 4 EXTENSÓMETROS					
Carga	deflexión	Ext 2	Ext 3	Ext 1	Ext 4
(Kgr.)	(10-4 pulg)	($\mu\text{in/in}$)	($\mu\text{in/in}$)	($\mu\text{in/in}$)	($\mu\text{in/in}$)
720	200	10	254	-360	-54
560	120	4	160	-230	-44
400	80	4	112	-170	-38
280	40	0	46	-106	-30
160	-10	0	64	-60	-28
280	50	0	70	-128	-32
440	100	2	120	-204	-40
600	150	2	212	-286	-48
720	200	4	244	-364	-56
880	250	8	310	-434	-64
1170	350	8	440	-584	-78
1320	400	12	500	-664	-86
1480	450	16	576	-752	-96
1600	500	18	640	-824	-106
1320	400	14	472	-664	-90
1000	300	8	372	-516	-78
720	200	8	240	-358	-64
440	100	2	116	-212	-50
160	25	0	20	-94	-38
200	50	0	66	-138	-42
360	100	0	130	-218	-48
560	150	2	180	-294	-58
680	200	12	242	-372	-64
840	250	8	330	-448	-70
1000	300	8	380	-524	-78
1160	350	12	450	-602	-84
1320	400	14	512	-674	-90
1440	450	16	568	-754	-98
1600	500	18	618	-830	-106
1720	550	20	710	-902	-114
1880	600	22	750	-986	-122
2000	650	24	796	-1058	-132
2170	700	24	850	-1146	-140
2240	750	26	920	-1224	-150
2440	800	30	998	-1304	-164
2560	850	32	1066	-1380	-176
2680	900	34	1120	-1464	-184
2800	950	36	1180	-1546	-196
2880	1000	36	1236	-1626	-206
2120	750	10	906	-1220	-162
1320	500	6	578	-830	-132
600	250	-4	288	-454	-100
160	90	-10	60	-210	-76

Licencia Creative Commons:

128

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

DATOS COLUMNA VACÍA CON 4 EXTENSÓMETROS					
Carga (Kgr.)	deflexión (10-4 pulg)	Ext 2 ($\mu\text{in/in}$)	Ext 3 ($\mu\text{in/in}$)	Ext 1 ($\mu\text{in/in}$)	Ext 4 ($\mu\text{in/in}$)
160	100	-10	82	-240	-78
440	200	-8	230	-388	-90
840	300	-4	366	-554	-106
1120	400	0	498	-698	-118
1400	500	4	626	-878	-132
1720	600	8	730	-1010	-146
2000	700	10	878	-1158	-158
2320	800	18	1000	-1310	-170
2600	900	30	1100	-1470	-194
2920	1000	34	1256	-1626	-208
3160	1100	36	1350	-1784	-226
3360	1200	36	1388	-1946	-250
3560	1300	38	1582	-2112	-274
3720	1400	38	1710	-2270	-302
3880	1500	42	1820	-2456	-344
3120	1250	30	1456	-2054	-318
2360	1000	20	1162	-1654	-288
1560	750	-2	832	-1254	-248
840	500	-10	552	-880	-212
160	255	-20	0	-506	-176
200	0	12	286	-574	-184
520	100	-2	430	-736	-206
840	200	6	576	-892	-226
1440	400	22	810	-1206	-262
2000	600	40	1050	-1516	-294
2640	800	64	1336	-1828	-336
3200	1000	76	1582	-2152	-368
3720	1200	92	1820	-2480	-412
4000	1400	110	2080	-2840	-506
4120	1600	112	2278	-3210	-590
4240	1800	108	2514	-3616	-674
4280	2000	108	2740	-4028	-740
3440	1750	82	2380	-3600	-724
2720	1500	64	2108	-3198	-698
2000	1250	34	1732	-3806	-656
1320	1000	22	1446	-2404	-626
560	750	10	1140	-2008	-586
280	630	-2	1040	-1832	-566
800	800	12	1246	-2114	-592
1360	1000	22	1248	-2414	-618
2120	1250	40	1772	-2808	-648
2840	1500	66	2112	-3210	-690
3520	1750	84	2398	-3602	-720

Licencia Creative Commons:

129

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

DATOS COLUMNA VACÍA CON 4 EXTENSÓMETROS					
Carga (Kgr.)	deflexión (10-4 pulg)	Ext 2 (μ in/in)	Ext 3 (μ in/in)	Ext 1 (μ in/in)	Ext 4 (μ in/in)
4120	2000	98	2702	-4028	-760
4360	2250	96	2990	-4554	-828
4400	2500	86	3278	-5200	-916
4440	2750	80	3530	-5972	-984
4480	3000	86	3900	-7142	-1054
2880	2500	28	3166	-6110	-1040
1440	2000	-20	2584	-5220	-992
320	1570	-52	1996	-4462	-942
1520	2000	-20	2590	-5214	-984
2240	2250	4	2870	-5644	-1008
2960	2500	34	3206	-6102	-1030
3600	2750	56	3516	-6564	-1046
4200	3000	84	3820	-7080	-1064
4480	3250	110	4144	-8180	-1100
4480	3500	182	4610	-11120	-1280
4000	4000	410	5880	-12016	-1220
2400	3500	228	5230	-10870	-1384
1120	3000	66	4580	-9760	-1518
400	2690	-30	4230	-9170	-1596
1200	3000	60	4640	-9842	-1522
2560	3500	220	5286	-10906	-1394
3720	4000	420	5910	-12024	-1198
3640	4500	690	6770	-12700	-570
3400	5000	1120	7530	-13030	-800
3080	5500	1950	8400	-12640	-1580

DATOS COLUMNA VACÍA CON 2 EXTENSÓMETROS							
CARGA (Kgr.)	deflexión (10 ⁻³ mm)	Ext 2 Ext. μ mm/ mm	Ext 1 Int. μ mm/ mm	CARGA (Kgr.)	Deflexión (10 ⁻³ mm)	Ext 2 Ext. μ mm/ mm	Ext 1 Int. μ mm/ mm
280	5	34	38	1120	100	408	550
320	10	62	70	920	80	316	438
400	15	84	102	640	60	212	308
440	20	108	132	400	40	120	188
520	25	130	158	640	60	224	320
560	30	154	188	920	80	324	444
640	35	180	220	1120	100	420	560
680	45	186	230	1400	120	518	684
720	50	208	256	1680	140	628	826
600	40	156	184	1920	160	720	942
440	30	98	120	2170	180	806	1054
320	20	56	64	2400	200	904	1180
220	10	0	0	2600	220	1000	1310

Licencia Creative Commons:

130

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

DATOS COLUMNA VACÍA CON 2 EXTENSÓMETROS							
CARGA	deflexión	Ext 2 Ext.	Ext 1 Int.	CARGA	Deflexión	Ext 2 Ext.	Ext 1 Int.
(Kgr.)	(10 ⁻³ mm)	µmm/ mm	µmm/ mm	(Kgr.)	(10 ⁻³ mm)	µmm/ mm	µmm/ mm
240	15	38	42	2760	240	1088	1432
320	20	62	70	2960	260	1186	1572
400	25	84	100	3080	280	1276	1702
440	30	104	126	3240	300	1362	1830
560	40	152	186	2760	260	1176	1598
680	50	202	248	2240	220	968	1334
840	60	252	310	1720	180	774	1090
960	70	300	372	1280	140	576	842
1080	80	356	440	760	100	380	590
1200	90	398	496	280	60	190	350
1320	100	446	554	800	100	410	628
1200	90	390	482	1240	140	588	852
1080	80	344	428	1720	180	778	1092
960	70	290	364	2280	220	970	1336
840	60	242	300	2680	260	1148	1570
720	50	194	240	3200	300	1352	1832
560	40	142	176	3560	340	1568	2160
440	30	96	120	3640	380	1710	2400
320	20	52	64	3880	420	1890	2720
600	40	150	184	3320	380	1658	2430
840	60	260	326	2800	340	1470	2182
1080	80	352	438	1840	300	1250	1898
1320	100	444	552	1370	260	1080	1684
1560	120	538	674	880	220	884	1434
1760	140	632	788	880	180	692	1192
2000	160	724	924	400	140	510	952
2200	180	818	1050	1120	200	802	1326
2400	200	908	1180	1760	250	1050	1638
2120	180	798	1042	2360	300	1282	1934
1880	160	706	926	2960	350	1536	2260
1640	140	608	800	3560	400	1774	2576
1400	120	506	672	3960	450	2004	2930
4080	500	2206	3310	3040	500	2110	3484
2880	400	1704	2664	1980	400	1634	2860
1600	300	1214	2030	720	300	1148	2214
480	200	736	1406	1400	350	1424	2570
1120	250	996	1740	1960	400	1652	2874
1680	300	1228	2034	2560	450	1890	3186
2320	350	1470	2350	3120	500	2126	3490
2920	400	1740	2700	3720	550	2372	3824
3480	450	1958	2990	4240	600	2626	4190
4000	500	2194	3316	4400	650	2836	4610
4240	550	2416	3712	4480			fallo

Licencia Creative Commons:

A2.- COLUMNA REFORZADA CON CONCRETO CON ADITIVO

DATOS COLUMNA REFORZADA CON CONCRETO CON ADITIVO CON 4 EXTENSÓMETROS					
Carga	deflexión	Ext 3	Ext 4	Ext 1	Ext 2
(Kgr.)	(10 ⁻⁴ in)	μin/in	μin/in	μin/in	μin/in
160	0	0	0		
320	20	2	54	-56	0
440	40	2	80	-86	-2
520	60	4	106	-120	-4
600	80	6	126	-140	-4
720	100	6	154	-176	-4
840	120	6	180	-200	-6
920	140	6	206	-234	-8
1000	160	4	230	-260	-8
1120	180	4	258	-292	-10
1200	200	4	286	-318	-10
1040	160	6	236	-262	-8
800	120	4	176	-196	-8
560	80	2	124	-140	-6
400	40	0	74	-82	-4
480	60	0	108	-118	-6
600	80	0	128	-144	-6
720	100	0	156	-174	-6
800	120	0	180	-202	-8
880	140	2	206	-232	-8
1000	160	6	234	-264	-10
1120	180	6	260	-290	-10
1200	200	6	286	-320	-10
1320	220	6	310	-350	-12
1360	240	6	336	-372	-12
1520	260	6	364	-404	-12
1600	280	8	386	-428	-12
1640	300	8	416	-458	-10
1760	320	12	458	-484	-8
1840	340	16	492	-514	-4
1920	360	22	526	-536	-2
2000	380	24	556	-566	2
2040	400	28	586	-586	4
1840	360	22	518	-518	4
1600	320	20	466	-468	2
1440	280	16	412	-414	2
1280	240	12	356	-358	0

Licencia Creative Commons:

132

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

DATOS COLUMNA REFORZADA CON CONCRETO CON ADITIVO CON 4 EXTENSÓMETROS					
Carga (Kgr.)	deflexión (10 ⁻⁴ in)	Ext 3 μin/in	Ext 4 μin/in	Ext 1 μin/in	Ext 2 μin/in
1080	200	8	306	-304	-2
880	160	4	248	-248	-4
720	120	0	194	-190	-4
560	80	0	144	-136	-4
400	55	-2	112	-100	-4
480	75	-2	142	-134	-4
600	100	0	172	-168	-4
840	140	0	224	-226	-6
1000	180	4	282	-286	-4
1200	220	8	332	-340	-4
1370	260	12	396	-396	0
1560	300	16	448	-450	2
1760	340	20	502	-504	4
1960	380	26	562	-560	4
2160	420	32	626	-612	10
2280	460	38	674	-662	16
2400	500	46	740	-708	26
2560	540	56	800	-758	36
2680	580	66	862	-802	42
2800	620	76	926	-858	54
2920	660	90	982	-896	64
3080	700	104	1054	-946	74
3160	740	116	1110	-986	84
3320	800	136	1210	-1054	98
3040	750	126	1118	-972	92
2880	700	118	1050	-912	88
2640	650	104	972	-844	82
2400	600	96	900	-782	70
2200	550	86	830	-718	64
2000	500	82	760	-656	54
1760	450	72	672	-582	50
1560	400	64	616	-530	44
1320	350	52	536	-460	38
1160	300	46	464	-394	32
960	250	38	400	-314	28
720	200	28	324	-260	24
560	150	24	260	-194	20
400	125	22	224	-158	18

Licencia Creative Commons:

133

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

DATOS COLUMNA REFORZADA CON CONCRETO CON ADITIVO CON 4 EXTENSÓMETROS					
Carga	deflexión	Ext 3	Ext 4	Ext 1	Ext 2
(Kgr.)	(10 ⁻⁴ in)	μin/in	μin/in	μin/in	μin/in
560	150	22	264	-204	18
800	200	24	332	-276	20
1040	250	30	400	-346	24
1240	300	38	472	-410	28
1440	350	48	540	-470	34
1640	400	58	614	-536	40
1880	450	70	690	-600	48
2080	500	80	760	-666	52
2280	550	86	830	-724	62
2520	600	92	900	-788	72
2720	650	104	986	-858	78
2880	700	116	1056	-920	84
3080	750	126	1130	-984	92
3280	800	138	1206	-1044	100
3440	850	150	1280	-1102	110
3600	900	168	1366	-1166	122
3720	950	182	1440	-1202	134
3840	1000	200	1522	-1270	150
3960	1050	218	1600	-1330	164
4040	1100	236	1676	-1380	174
4120	1150	256	1750	-1436	192
4240	1200	272	1834	-1486	206
4360	1250	292	1916	-1546	222
4440	1300	310	1994	-1594	238
4560	1360	336	2086	-1660	258
4600	1400	352	2162	-1710	270
4640	1450	368	2222	-1754	284
4770	1500	390	2306	-1798	300
4200	1400	364	2138	-1662	284
3840	1300	336	1982	-1534	270
3440	1200	312	1830	-1414	256
3080	1100	288	1694	-1298	240
2640	1000	262	1534	-1164	224
2280	900	236	1390	-1044	208
1880	800	222	1240	-920	182
1520	700	198	1092	-796	168
1120	600	176	944	-672	150
800	500	156	804	-554	136

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

DATOS COLUMNA REFORZADA CON CONCRETO CON ADITIVO CON 4 EXTENSÓMETROS					
Carga (Kgr.)	deflexión (10 ⁻⁴ in)	Ext 3 μin/in	Ext 4 μin/in	Ext 1 μin/in	Ext 2 μin/in
400	400	136	654	-422	118
680	450	148	740	-504	124
840	500	154	808	-564	130
1040	550	162	880	-626	138
1240	600	172	950	-686	146
1440	650	188	1026	-748	156
1640	700	196	1098	-810	164
1840	750	208	1176	-872	172
2000	800	222	1246	-932	180
2200	850	230	1312	-986	190
2400	900	238	1380	-1048	200
2640	950	248	1470	-1120	212
2800	1000	262	1544	-1184	220
3040	1050	274	1618	-1244	228
3200	1100	284	1686	-1304	234
3360	1150	298	1770	-1368	244
3560	1200	310	1840	-1430	250
3760	1250	324	1920	-1492	260
3920	1300	338	1996	-1560	268
4120	1350	350	2070	-1614	276
4320	1400	362	2150	-1682	284
4440	1450	376	2220	-1734	294
4600	1500	398	2306	-1800	308
4760	1550	410	2384	-1852	320
4840	1600	430	2458	-1898	332
4960	1650	452	2540	-1956	352
5040	1700	480	2628	-2006	370
5080	1750	500	2694	-2046	386
5120	1800	522	2782	-2106	404
5160	1850	542	2850	-2146	418
5240	1900	570	2928	-2196	438
5280	1950	590	3010	-2238	458
5320	2000	620	3082	-2286	476
4400	1800	560	2764	-2018	444
3640	1600	504	2452	-1768	408
2880	1400	452	2140	-1518	372
2120	1200	406	1858	-1282	336
1400	1000	362	1552	-1034	296

Licencia Creative Commons:

135

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

DATOS COLUMNA REFORZADA CON CONCRETO CON ADITIVO CON 4 EXTENSÓMETROS					
Carga	deflexión	Ext 3	Ext 4	Ext 1	Ext 2
(Kgr.)	(10 ⁻⁴ in)	μin/in	μin/in	μin/in	μin/in
720	800	314	1260	-790	260
400	715	292	1136	-690	246
600	800	310	1182	-734	240
1000	900	338	1332	-860	250
1360	1000	364	1472	-972	264
1720	1100	390	1612	-1092	276
2120	1200	418	1768	-1220	294
2560	1300	442	1920	-1348	314
2920	1400	468	2074	-1470	330
3320	1500	500	2224	-1592	346
3680	1600	524	2384	-1720	362
4000	1700	550	2514	-1826	376
4320	1800	578	2670	-1946	390
4720	1900	612	2832	-2084	408
5000	2000	640	2988	-2192	426
5280	2100	682	3130	-2302	446
5400	2200	730	3280	-2386	470
5560	2300	790	3440	-2476	506
5640	2400	840	3590	-2556	540
5680	2500	884	3710	-2626	572
5720	2600	938	3860	-2700	608
5800	2700	990	4002	-2768	646
5800	2800	1038	4140	-2844	680
5840	2900	1082	4260	-2920	714
5920	3000	1132	4420	-2994	754
4720	2750	1050	3990	-2654	710
3800	2500	972	3618	-2360	670
2880	2250	900	3224	-2048	624
2000	2000	840	2858	-1750	578
1120	1750	770	2490	-1456	540
400	1525	708	2160	-1190	504
1520	1800	788	2580	-1530	550
2280	2000	834	2872	-1770	586
3040	2200	890	3174	-2020	620
3720	2400	944	3472	-2254	654
4360	2600	1004	3774	-2498	682
5080	2800	1064	4082	-2732	720
5680	3000	1140	4382	-2956	756

Licencia Creative Commons:

136

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

DATOS COLUMNA REFORZADA CON CONCRETO CON ADITIVO CON 4 EXTENSÓMETROS					
Carga (Kgr.)	deflexión (10 ⁻⁴ in)	Ext 3 μin/in	Ext 4 μin/in	Ext 1 μin/in	Ext 2 μin/in
5920	3200	1232	4690	-3126	826
6000	3400	1320	4932	-3252	894
6080	3600	1412	5200	-3370	970
6080	3800	1500	5440	-3500	1040
6120	4000	1580	5674	-3590	1106
4880	3750	1490	5220	-3236	1054
4000	3500	1410	4840	-2942	1010
3120	3250	1336	4468	-2650	970
2280	3000	1270	4100	-2360	928
1400	2750	1200	3720	-2052	878
680	2500	1136	3366	-1766	836
400	2415	1110	3246	-1670	820
1120	2600	1166	3536	-1906	854
1880	2800	1222	3830	-2156	886
2560	3000	1266	4114	-2384	928
3240	3200	1320	4394	-2610	958
3960	3400	1382	4716	-2862	992
4600	3600	1440	5006	-3100	1024
5280	3800	1504	5320	-3336	1062
5840	4000	1580	5628	-3558	1104
6080	4200	1650	5910	-3700	1164
6120	4400	1740	6148	-3822	1230
6170	4600	1832	6410	-3936	1302
6160	4800	1900	6574	-4020	1356
6160	5000	1974	6770	-4110	1412
6200	5200	2048	6940	-4202	1470
6200	5400	2120	7100	-4284	1522
6200	5600	2190	7220	-4372	1580
6200	5800	2254	7380	-4450	1634
6200	6000	2320	7490	-4528	1672
6160	6200	2330	7570	-4566	1696
6120	6400	2370	7650	-4624	1722
6120	6600	2400	7754	-4670	1760
6120	6800	2440	7846	-4728	1790
6120	7000	2490	7960	-4792	1828
6080	7200	2520	8056	-4840	1856
6080	7400	2590	8240	-4904	1910
6080	7600	2638	8386	-4978	1960

Licencia Creative Commons:

137

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

DATOS COLUMNA REFORZADA CON CONCRETO CON ADITIVO CON 4 EXTENSÓMETROS					
Carga	deflexión	Ext 3	Ext 4	Ext 1	Ext 2
(Kgr.)	(10 ⁻⁴ in)	μin/in	μin/in	μin/in	μin/in
6080	7800	2696	8580	-5022	2008
6080	8000	2750	8764	-5108	2048
6080	8200	2808	9008	-5166	2100
6080	8500	2910	9338	-5260	2174
6080	9000	3050	9812	-5370	2286
6080	9500	3130	□	□	□
6000	10000	□	□	□	□
6000	10500	□	□	□	□
5960	11000	□	□	□	□
5880	11500	□	□	□	□
5800	12000	□	□	□	□
5600	12500	□	□	□	□
5400	13000	□	□	□	□
4800	14200	□	□	□	□

WWW.DIGITALLLAVE

DATOS COLUMNA REFORZADA CON CONCRETO CON ADITIVO CON 2 EXTENSÓMETROS

Carga	deflexión	Ext 2 ext.	Ext 1 int.	Carga	Deflexión	Ext 2 ext.	Ext 1 int.
(Kgr.)	(10 ⁻³ mm)	(μmm/mm)	(μmm/mm)	(Kgr.)	(10 ⁻³ mm)	(μmm/mm)	(μmm/mm)
200	0	0	0	1120	45	246	278
320	5	40	42	1240	50	286	310
440	10	66	70	1000	40	222	240
560	15	92	102	800	30	166	178
640	20	114	130	600	20	112	122
720	25	144	160	800	30	174	190
880	30	170	192	1000	40	230	250
960	35	184	220	1200	50	282	310
1080	40	224	252	1360	60	332	356
1520	70	402	420	3600	300	2080	1434
1680	80	460	470	4400	350	2396	1688
1840	90	518	520	5120	400	2716	1932
2000	100	574	566	5440	450	3090	2138
1600	80	454	444	5680	500	3494	2320
1240	60	342	336	3960	400	2872	1798
880	40	226	222	2400	300	2264	1296
520	20	120	114	880	200	1662	800
920	40	238	240	1720	250	1986	1060

Licencia Creative Commons:

138

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

DATOS COLUMNA REFORZADA CON CONCRETO CON ADITIVO CON 2 EXTENSÓMETROS

Carga (Kgr.)	deflexión (10 ⁻³ mm)	Ext 2 ext. (µmm/mm)	Ext 1 int. (µmm/mm)	Carga (Kgr.)	Deflexión (10 ⁻³ mm)	Ext 2 ext. (µmm/mm)	Ext 1 int. (µmm/mm)
1280	60	350	348	2560	300	2302	1310
1640	80	468	460	3320	350	2610	1562
1960	100	580	562	4080	400	2912	1820
2280	120	694	660	4840	450	3228	2072
2600	140	814	762	5480	500	3544	2312
2920	160	932	854	5840	550	3944	2498
3200	180	1056	952	5960	600	4392	2684
3440	200	1192	1050	4240	500	3762	2158
2680	160	954	834	2640	400	3148	1656
2000	120	712	624	1200	300	2514	1158
1320	80	486	420	480	250	2186	910
720	40	264	214	1360	300	2530	1174
1440	80	510	450	2120	350	2850	1422
2120	120	738	650	2920	400	3166	1674
2800	160	980	860	3600	450	3490	1928
3440	200	1220	1062	4360	500	3806	2180
3880	240	1478	1242	5080	550	4132	2436
4320	280	1756	1428	5800	600	4482	2678
4640	320	2070	1602	6040	650	4880	2860
4960	360	2372	1776	6080	700	5230	3016
5160	400	2652	1932	4400	600	4610	2504
4320	350	2350	1670	2920	500	4006	2008
3480	300	2042	1412	1440	400	3370	1506
2380	250	1738	1160	2280	450	3692	1766
1880	200	1438	906	3080	500	4002	2014
1120	150	1142	662	3840	550	4320	2272
400	100	832	412	4760	600	4632	2520
1200	150	1160	676	5400	650	4978	2782
2000	200	1472	930	5920	700	5284	3010
2800	250	1774	1180	6160	750	5682	3184
6240	800	6080	3340	6400	1050		4070
6280	850	6456	3486	6400	1100		4220
6360	900	6970	3684	6400	1150		4350
6360	950	7296	3806	6400	1200		4460
6360	1000		3964	6400	1250		4736

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

A3.- COLUMNA REFORZADA CON CONCRETO DE 250 kgf./cm²

COLUMNA REFORZADA CON CONCRETO DE 250 kgf./cm ² CON 4 EXTENSÓMETROS					
Carga (Kgr.)	deflexión (10 ⁻⁴ in)	Ext 3 μm/m	Ext 4 μm/m	Ext 1 μm/m	Ext 2 μm/m
200	0	72	0	-86	6
280	50,8	100	0	-120	6
400	101,6	130	0	-150	8
480	152,4	158	0	-184	12
600	203,2	180	0	-210	12
680	254	206	0	-242	12
760	304,8	232	0	-270	12
840	355,6	256	-30	-300	12
960	406,4	282	-40	-330	14
1000	457,2	308	-40	-364	14
1120	508	332	-60	-388	14
1200	558,8	360	-88	-422	16
1280	609,6	388	-68	-452	16
1080	508	316	-60	-374	14
880	406,4	260	-36	-310	10
720	304,8	210	-30	-254	8
520	203,2	152	-40	-188	6
280	101,6	100	-35	-130	0
480	203,2	160	-20	-200	4
680	304,8	214	-20	-266	6
880	406,4	270	-54	-322	8
1080	508	324	-50	-384	10
1140	609,6	378	-70	-449	14
1440	711,2	430	-70	-504	16
1600	812,8	486	-70	-558	22
1760	914,4	536	-60	-614	26
1920	1016	590	-60	-668	30
2000	1117,6	646	-60	-726	34
2200	1219,2	700	-44	-776	38
1800	1016	576	-40	-646	30
1320	762	440	-60	-504	18
1080	609,6	358	-60	-416	12
720	406,4	252	-62	-300	6
400	203,2	142	-60	-180	0
720	381	248	-80	-298	4
960	508	310	-80	-370	8
1200	635	384	-60	-450	14
1380	762	452	-60	-518	18
1600	889	518	-60	-588	20
1760	1016	584	-40	-660	26

Licencia Creative Commons:

140

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

COLUMNA REFORZADA CON CONCRETO DE 250 kgf./cm ² CON 4 EXTENSÓMETROS					
Carga (Kgr.)	Deflexión (10 ⁻⁴ in)	Ext 3 μm/m	Ext 4 μm/m	Ext 1 μm/m	Ext 2 μm/m
2000	1143	654	-36	-726	32
2240	1270	722	-44	-800	40
2400	1397	790	-48	-864	46
2560	1524	864	-70	-934	56
2760	1651	928	-50	-990	62
2920	1778	1000	-64	-1062	70
3040	1905	1070	-60	-1120	76
3200	2032	1136	-60	-1180	86
3320	2159	1206	-40	-1238	94
3440	2286	1278	-40	-1304	102
3560	2413	1348	0	-1364	104
3680	2540	1420	20	-1430	120
3160	2286	1256	0	-1270	104
2800	2032	1106	0	-1126	88
2400	1778	978	0	-1006	74
2000	1524	828	0	-866	54
1600	1270	692	0	-732	42
1200	1016	548	-30	-590	28
800	762	412	-40	-450	18
440	508	280	-34	-308	10
880	762	434	-40	-476	16
1320	1016	570	-42	-612	28
1720	1270	708	-40	-750	42
2040	1524	846	-54	-884	56
2400	1778	986	-40	-1020	76
2840	2032	1126	-20	-1154	88
3280	2286	1274	-22	-1296	102
3600	2540	1406	-20	-1422	116
3840	2794	1542	-18	-1546	136
4080	3048	1678	30	-1670	154
4280	3302	1816	40	-1792	176
4440	3556	1960	80	-1920	198
4600	3810	2006	90	-2048	220
3600	3302	1758	82	-1734	180
2840	2794	1474	30	-1464	142
2080	2286	1190	10	-1200	110
1320	1778	906	16	-926	82
640	1270	632	18	-660	58
1080	1524	792	10	818	72
1480	1778	932	20	-952	86
1840	2032	1070	20	-1082	102
2200	2286	1214	24	-1218	118

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

**COLUMNA REFORZADA CON CONCRETO DE 250 kgf./cm² CON 4
EXTENSÓMETROS**

Carga (Kgr.)	Deflexión (10 ⁻⁴ in)	Ext 3 μm/m	Ext 4 μm/m	Ext 1 μm/m	Ext 2 μm/m
2600	2540	1354	18	-1352	136
3320	3048	1632	48	-1614	166
3720	3302	1772	30	-1750	178
4360	3810	2050	60	-2010	210
4600	4064	2200	120	-2150	228
4800	4318	2336	116	-2268	254
4920	4572	2480	120	-2392	280
5000	4826	2612	120	-2508	306
5080	5080	2750	160	-2622	332
4080	4445	2368	138	-2272	288
3160	3810	2010	110	-1944	242
2240	3175	1658	82	-1610	200
1320	2540	1290	72	-1266	160
480	1905	946	50	-928	127
1440	2540	1318	70	-1286	166
2160	3048	1592	84	-1542	196
2720	3556	1876	120	-1814	230
3600	4064	2160	128	-2078	262
4280	4572	2436	140	-2344	290
4920	5080	2722	160	-2606	328
5200	5588	2990	186	-2842	370
5360	6096	3280	250	-3060	426
5480	6604	3550	280	-3276	484
5560	7112	3836	360	-3494	542
5600	7620	4120	392	-3704	602
3640	6350	3364	320	-3028	514
1920	5080	2658	240	-2374	430
280	3810	1956	230	-1704	358
1280	4445	2340	240	-2060	400
2160	5080	2684	280	-2384	438
3040	5715	3040	300	-2714	480
3800	6350	3388	306	-3044	518
4640	6985	3744	372	-3382	560
5360	7620	4090	400	-3696	594
5680	8255	4440	450	-3978	664
5760	8890	4812	510	-4238	750
5800	9525	5200	620	-4496	840
5800	10160	5566	660	-4750	920
5840	10795	5930	740	-5000	1008
5880	11430	6320	850	-5272	1100
5880	12065	6690	900	-5730	1176
5880	12700	7090	990	-5818	1264

Licencia Creative Commons:

142

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

COLUMNA REFORZADA CON CONCRETO DE 250 kgr./cm ² CON 4 EXTENSÓMETROS					
Carga (Kgr.)	Deflexión (10 ⁻⁴ in)	Ext 3 μm/m	Ext 4 μm/m	Ext 1 μm/m	Ext 2 μm/m
5880	13335	7422	1070	-6060	1336
5880	13970	7790	1100	-6334	1414
5880	14605	8149	1210	-6596	1490
5880	15240	8490	1300	-6856	1558
5880	15875	8880	1400	-7156	1644
5880	16510	9200	1480	-7418	1694
5880	17145	9520	1490	-7668	1764
5880	17780	9820	1500	-7930	1844
5880	18415	10240	1670	-8210	1908
5880	19050	10580	1770	-8490	1974
5880	20320	11300	1920	-8998	2122
5880	21590	11998	2080	-9530	2270
5880	22860	12664	2248	-10030	2390
5880	24130	13430	2460	-10584	2520

COLUMNA REFORZADA CON CONCRETO DE 250 kgr./cm ² CON 2 EXTENSÓMETROS							
Carga (Kgr.)	Deflexión (10 ⁻³ mm)	Ext 2 ext. μm/m	Ext 1 Int. μm/m	Carga (Kgr.)	deflexión (10 ⁻³ mm)	Ext 2 ext. μm/m	Ext 1 Int. μm/m
200		0		2400	140	698	770
320	5	30	36	2680	160	800	870
400	10	44	50	2920	180	896	970
480	15	74	86	3120	200	988	1168
600	20	100	118	2680	160	772	852
680	25	128	150	1800	120	552	632
720	30	152	180	1200	80	352	430
840	35	176	210	560	40	148	212
920	40	198	234	1200	80	354	440
1000	45	226	268	1880	120	556	640
1120	50	246	292	2560	160	778	862
920	40	194	232	3080	200	982	1070
720	30	146	176	3520	240	1182	1270
560	20	92	114	3880	280	1366	1456
720	30	150	180	4200	320	1544	1644
920	40	200	240	3520	280	1318	1426
1120	50	252	300	2920	240	1106	1226
1240	60	296	350	2320	200	888	1026
1560	80	398	460	1680	160	676	812
1880	100	498	568	1120	120	466	602
1480	80	390	452	560	80	262	396
1160	60	286	332	880	100	362	500

Licencia Creative Commons:

**COLUMNA REFORZADA CON CONCRETO DE 250 kgr./cm² CON 2
EXTENSÓMETROS**

Carga (Kgr.)	Deflexión (10 ⁻³ mm)	Ext 2 ext. μm/m	Ext 1 Int. μm/m	Carga (Kgr.)	deflexión (10 ⁻³ mm)	Ext 2 ext. μm/m	Ext 1 Int. μm/m
840	40	188	229	1680	150	636	770
1200	60	296	349	2400	200	894	1020
1520	80	394	452	3180	250	1174	1286
1880	100	498	568	3840	300	1440	1544
2160	120	600	672	4360	350	1670	1786
4640	400	1850	2002	1080	300	880	1376
3880	350	1576	1746	1800	350	1160	1632
3160	300	1300	1492	2520	400	1420	1882
2360	250	1020	1228	3200	450	1682	2140
1640	200	760	976	3920	500	1960	2406
960	150	504	720	4600	550	2226	2653
280	100	254	466	5170	600	2472	2906
1000	150	518	726	5440	650	2660	3136
1760	200	784	980	5560	700	2818	3350
2520	250	1060	1248	4000	600	2262	2850
3240	300	1326	1500	2680	500	1726	2342
3920	350	1598	1768	1280	400	1202	1812
4520	400	1840	2004	2040	450	1490	2086
4880	450	2028	2244	2760	500	1750	2340
5080	500	2176	2460	3440	550	2018	2594
4240	450	1886	2190	4120	600	2280	2846
3520	400	1616	1940	4800	650	2542	3100
2880	350	1360	1696	5360	700	2796	3354
2160	300	1088	1440	5600	750	2996	3590
1400	250	820	1174	5680	800	3170	3800
760	200	568	920	5680	850	3378	4046
1520	250	848	1184	5760	900	3564	4260
2240	300	1116	1444	4200	800	2986	3752
2970	350	1386	1696	2880	700	2450	3434
3640	400	1642	1950	3600	750	2724	3500
4320	450	1912	2200	4240	800	2990	3736
4920	500	2166	2460	4880	850	3262	4000
5240	550	2340	2690	5520	900	3530	4254
5360	600	2500	2908	5800	1000	3980	4692
3720	500	1910	2380	5920	1100	□	□
2400	400	1392	1880				

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

A4.- COLUMNA REFORZADA CON CONCRETO DE 250 kgf./cm² Y CON CLAVOS LATERALES

COLUMNA REFORZADA CON CONCRETO DE 250 kgf./cm ² Y CON CLAVOS LATERALES CON 4 EXTENSÓMETROS					
Carga	Deflexión	Ext 3	Ext 4	Ext 1	Ext 2
(Kgr.)	10 ⁻⁴ in	µin/in	µin/in	µin/in	µin/in
200	0	112	-4	-102	-8
320	20	146	-4	-146	-10
400	40	168	-4	-174	-10
480	60	194	-6	-204	-10
600	80	224	-8	-240	-10
680	100	246	-8	-268	-10
760	120	264	-8	-296	-14
880	140	288	-10	-322	-14
920	160	310	-10	-350	-14
1000	180	332	-10	-374	-12
1080	200	360	-10	-410	-14
880	160	288	-10	-332	-12
720	120	244	-10	-280	-12
560	80	192	-10	-218	-10
320	40	148	-10	-160	-10
560	80	204	-10	-230	-12
720	120	252	-10	-294	-12
960	160	320	-12	-368	-12
1080	200	360	-12	-410	-12
1200	240	402	-10	-458	-10
1400	280	452	-8	-510	-8
1580	320	496	-6	-556	-4
1720	360	552	-6	-618	6
1840	400	596	2	-664	8
1320	300	436	-4	-510	0
1160	250	372	-6	-450	-4
920	200	306	-10	-380	-8
720	150	246	-10	-310	-10
520	100	186	-12	-238	-12
760	150	260	-12	-326	-14
960	200	324	-10	-398	-10
1160	250	392	-8	-469	-6
1360	300	458	-4	-560	-4
1600	350	528	-2	-602	4
1760	400	590	2	-660	6
2000	450	650	8	-728	12
2160	500	708	10	-792	18
2320	550	766	12	-854	28

Licencia Creative Commons:

145

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

COLUMNA REFORZADA CON CONCRETO DE 250 kgf./cm ² Y CON CLAVOS LATERALES CON 4 EXTENSÓMETROS					
Carga	Deflexión	Ext 3	Ext 4	Ext 1	Ext 2
(Kgr.)	10 ⁻⁴ in	μin/in	μin/in	μin/in	μin/in
2520	600	830	20	-922	36
2800	700	956	32	-1048	52
2920	750	1030	40	-1114	60
3080	800	1100	50	-1176	66
2600	700	946	36	-1028	58
2200	600	802	26	-892	44
1800	500	664	20	-760	26
1440	400	532	10	-634	14
1000	300	398	2	-456	6
640	200	272	-4	-364	0
240	100	158	-4	-228	-6
720	200	294	-2	-384	-4
1120	300	438	4	-526	8
1480	400	562	16	-658	16
1880	500	682	24	-776	26
2240	600	816	30	-912	38
2600	700	948	32	-1040	52
3000	800	1082	48	-1170	64
3320	900	1230	60	-1300	78
3560	1000	1408	80	-1424	92
3720	1100	1598	94	-1544	108
3920	1200	1740	114	-1664	122
4080	1300	1860	130	-1778	138
4240	1400	1964	146	-1896	154
3400	1200	1656	118	-1608	140
2640	1000	1364	90	-1350	108
1880	800	1076	72	-1088	74
1200	600	816	52	-840	54
520	400	570	34	-576	36
920	500	704	46	-722	46
1280	600	836	52	-850	56
1680	700	966	68	-982	66
2000	800	1104	80	-1110	76
2400	900	1236	86	-1240	94
2760	1000	1372	90	-1368	108
3160	1100	1518	104	-1540	120
3480	1200	1656	116	-1630	130
3840	1300	1796	130	-1760	140
4120	1400	1934	144	-1886	150
4360	1500	2042	158	-2004	166
4520	1600	2138	180	-2124	184
4640	1700	2232	200	-2240	204

Licencia Creative Commons:

146

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

COLUMNA REFORZADA CON CONCRETO DE 250 kgf./cm² Y CON CLAVOS LATERALES CON 4 EXTENSÓMETROS

Carga (Kgr.)	Deflexión 10 ⁻⁴ in	Ext 3 μin/in	Ext 4 μin/in	Ext 1 μin/in	Ext 2 μin/in
4760	1800	2326	220	-2356	224
4880	1900	2406	242	-2470	240
4960	2000	2494	264	-2584	260
3880	1750	2082	222	-2234	226
3000	1500	1738	186	-1908	196
2160	1250	1388	154	-1584	168
1200	1000	1062	136	-1260	130
400	750	752	110	-936	104
1360	1000	1080	140	-1280	134
2040	1200	1342	164	-1538	156
2800	1400	1616	176	-1796	188
3520	1600	1894	202	-2062	210
4160	1800	2172	230	-2318	230
4760	2000	2444	256	-2574	250
5160	2200	2634	308	-2820	296
5280	2400	2780	370	-3054	342
5360	2600	2950	430	-3314	392
5400	2800	3120	470	-3544	444
5480	3000	3250	540	-3750	480
4320	2750	2826	482	-3412	430
3440	2500	2476	446	-3092	402
2640	2250	2130	410	-2770	374
1800	2000	1798	392	-2438	338
1000	1750	1502	360	-2116	310
240	1500	1214	336	-1794	280
1160	1750	1532	368	-2130	316
2000	2000	1832	398	-2450	344
2920	2250	2174	422	-2786	382
3720	2500	2512	452	-3110	408
4480	2750	2850	486	-3440	436
5200	3000	3206	522	-3780	466
5520	3250	3442	598	-4072	520
5600	3500	3654	692	-4386	608
5680	3750	3896	800	-4720	698
5680	4000	4188	892	-5072	789
5720	4250	4468	972	-5380	848
5760	4500	4772	1050	-5744	918
3840	4000	3996	962	-5068	840
2240	3500	3316	890	-4402	780
720	3000	2710	840	-3730	720
1600	3250	3026	878	-4078	754
2480	3500	3338	902	-4410	790

Licencia Creative Commons:

147

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

COLUMNA REFORZADA CON CONCRETO DE 250 kgf./cm ² Y CON CLAVOS LATERALES CON 4 EXTENSÓMETROS					
Carga (Kgr.)	Deflexión 10 ⁻⁴ in	Ext 3 μin/in	Ext 4 μin/in	Ext 1 μin/in	Ext 2 μin/in
3320	3750	3682	932	-4760	820
4080	4000	4018	968	-5092	846
4800	4250	4382	1004	-5430	874
5480	4500	4728	1042	-5774	898
5760	4750	5088	1124	-6170	964
5800	5000	5512	1260	-6622	1070
5800	5250	5870	1336	-7016	1140
5800	5500	6422	1469	-7524	1230
5800	5750	6900	1546	-8064	1292
5800	6000	7580	1650	-8700	1340
5680	6250	8320	1720	-9276	1434
5680	6500	9090	1830	-9784	1498
5680	7000	10990	2020	-11140	1696
5680	7500	12260	2230	-12410	1858
5680	8000	□	2430	-13810	2236

COLUMNA REFORZADA CON CONCRETO DE 250 kgf./cm ² Y CON CLAVOS LATERALES CON 2 EXTENSÓMETROS							
Carga (N)	deflexión (10 ⁻³ mm)	Ext 2 ext. (μ m/m)	Ext 1 int. (μ m/m)	Carga (N)	deflexión (10 ⁻³ mm)	Ext 2 ext. (μ m/m)	Ext 1 int. (μ m/m)
1962	0	0	0	7848	40	198	210
3139,2	5	36	42	5101,2	20	98	110
3924	10	58	66	8240,4	40	208	224
4708,8	15	84	96	11379,6	60	316	326
5886	20	112	126	14911,2	80	432	430
7063,2	25	134	152	17658	100	546	530
7455,6	30	160	176	20797,2	120	670	624
8632,8	35	180	202	23544	140	800	720
9417,6	40	208	232	25506	160	936	816
9810	45	232	258	27860,4	180	1068	912
10987,2	50	260	284	30214,8	200	1202	1008
9025,2	40	202	224	23544	160	956	800
7063,2	30	146	166	16873,2	120	710	602
5886	20	104	120	10987,2	80	482	412
3924	10	56	62	5101,2	40	260	210
5886	20	106	120	11772	80	490	426
7063,2	30	156	174	17658	120	722	618
9417,6	40	212	236	24328,8	160	962	814
10987,2	50	260	284	29822,4	200	1204	1004
12164,4	60	310	336	33746,4	240	1468	1194

Licencia Creative Commons:

148

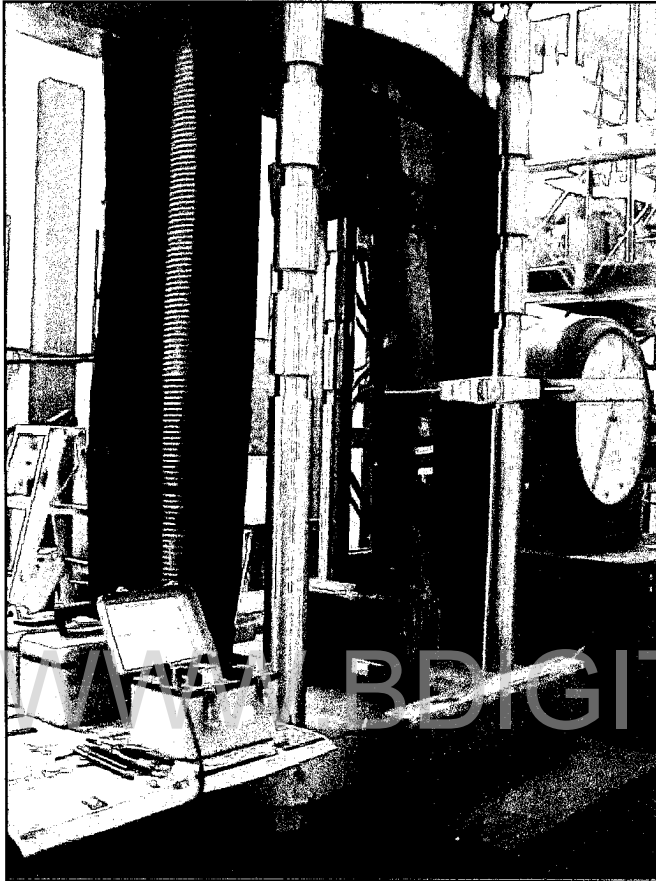
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

COLUMNA REFORZADA CON CONCRETO DE 250 kgf./cm² Y CON CLAVOS LATERALES CON 2 EXTENSÓMETROS

Carga	deflexión	Ext 2 ext.	Ext 1 int.	Carga	deflexión	Ext 2 ext.	Ext 1 int.
(N)	(10 ⁻³ mm)	(μ m/m)	(μ m/m)	(N)	(10 ⁻³ mm)	(μ m/m)	(μ m/m)
13734	70	364	386	37278	280	1718	1370
14911,2	80	422	434	40417,2	320	1952	1546
16873,2	90	480	482	42379,2	360	2140	1700
17658	100	538	528	44341,2	400	2340	1860
14518,8	80	422	420	36100,8	350	2010	1608
10987,2	60	306	312	29037,6	300	1720	1382
22366,8	250	1434	1150	49050	600	3110	2640
15696	200	1154	918	52189,2	650	3340	2864
8240,4	150	882	680	52974	700	3516	3064
1962	100	626	446	38062,8	600	2880	2610
9417,6	150	900	690	24328,8	500	2310	2164
16480,8	200	1166	924	11772	400	1780	1714
23544	250	1444	1156	18835,2	450	2040	1930
30607,2	300	1732	1396	25506	500	2336	2170
37278	350	2022	1626	32569,2	550	2618	2394
43164	400	2308	1854	39240	600	2910	2622
46695,6	450	2548	2060	45518,4	650	3204	2844
48657,6	500	2760	2254	51404,4	700	3484	3062
33354	400	2140	1780	53758,8	750	3690	3266
19620	300	1570	1322	54543,6	800	3870	3464
6670,8	200	1042	860	39240	700	3250	3024
13734	250	1320	1100	25898,4	600	2660	2580
21189,6	300	1590	1332	12949,2	500	2130	2136
27860,4	350	1880	1566	20404,8	550	2406	2366
34531,2	400	2170	1794	27468	600	2684	2586
41594,4	450	2462	2026	34138,8	650	2990	2820
47480,4	500	2740	2250	40417,2	700	3270	3032
50227,2	550	2966	2460	46695,6	750	3560	3250
51796,8	600	3152	2656	52974	800	3870	3484
36100,8	500	2520	2190	54543,6	850	4062	3662
22366,8	400	1950	1740	55720,8	900	4250	3844
9025,2	300	1420	1280	55328,4	950	4520	4030
16873,2	350	1690	1516	55328,4	1000	4670	4190
23936,4	400	1974	1748	55720,8	1050	4940	4358
30607,2	450	2262	1974	56113,2	1100	5260	4524
37278	500	2552	2204	56505,6	1200	5860	4802
43948,8	550	2846	2434	56898		□	□

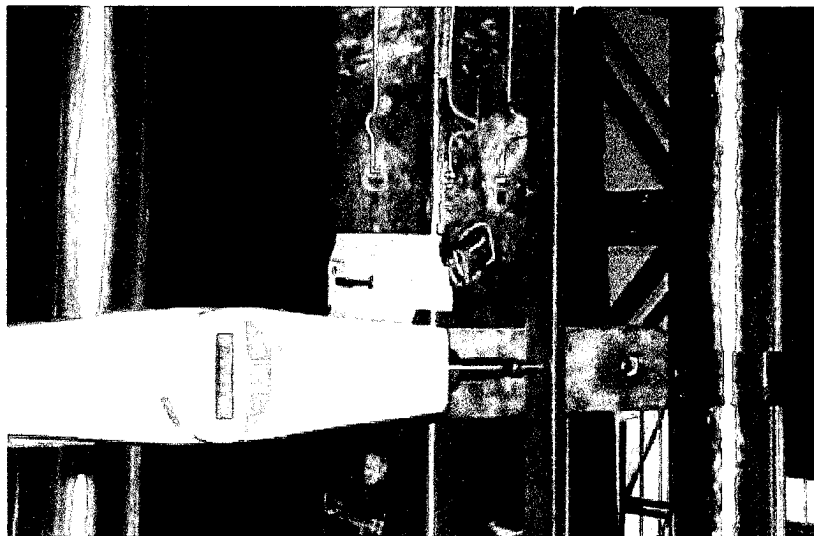
Licencia Creative Commons:

ANEXO B REPORTE FOTOGRÁFICO



B1.- VISTA GENERAL DEL
ENSAYO

B2.- DETALLE DE
MEDICION DE LA
DEFLEXION

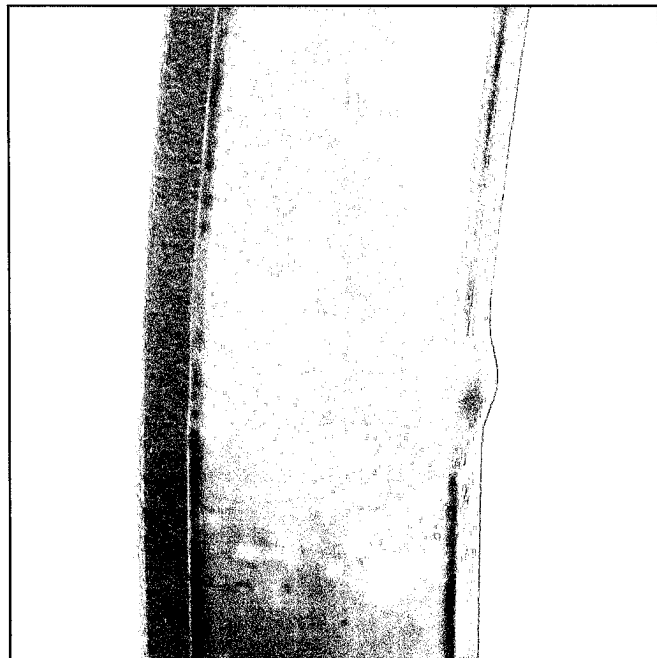




B3.- DETALLE DE PANDEO LOCAL EN COLUMNA SIN REFORZAR

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

B4.- DETALLE DEL PANDEO LOCAL EN COLUMNA REFORZADA



Licencia Creative Commons:

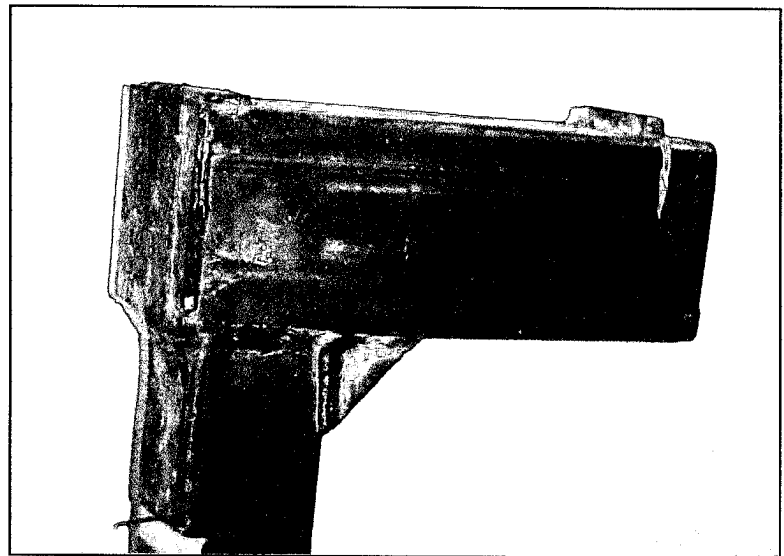
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

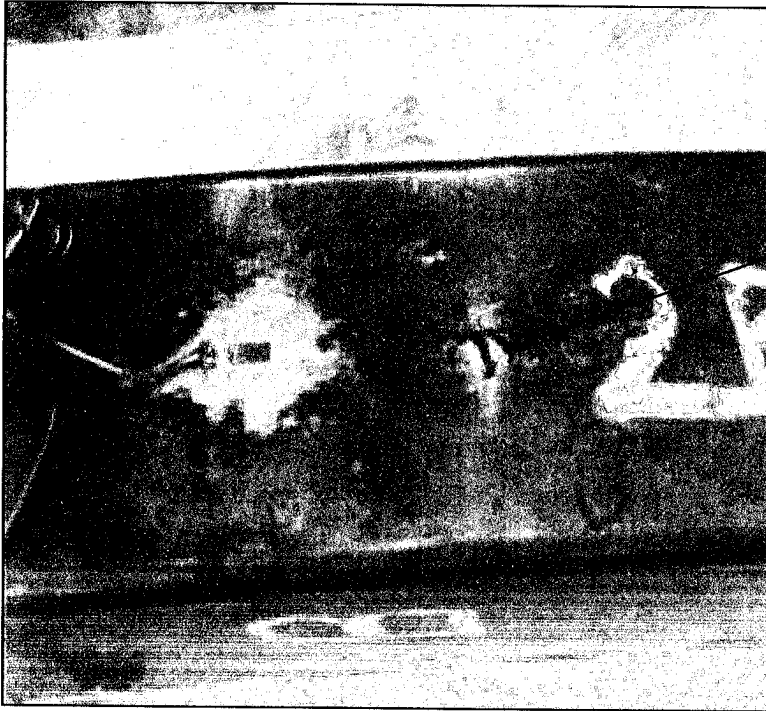


B5.- VISTA GENERAL DE LA COLUMNA
REFORZADA DESPUES DE LA FALLA

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

B6.- BRAZO DE LA PROBETA
PARA TRANSMITIR LA
CARGA

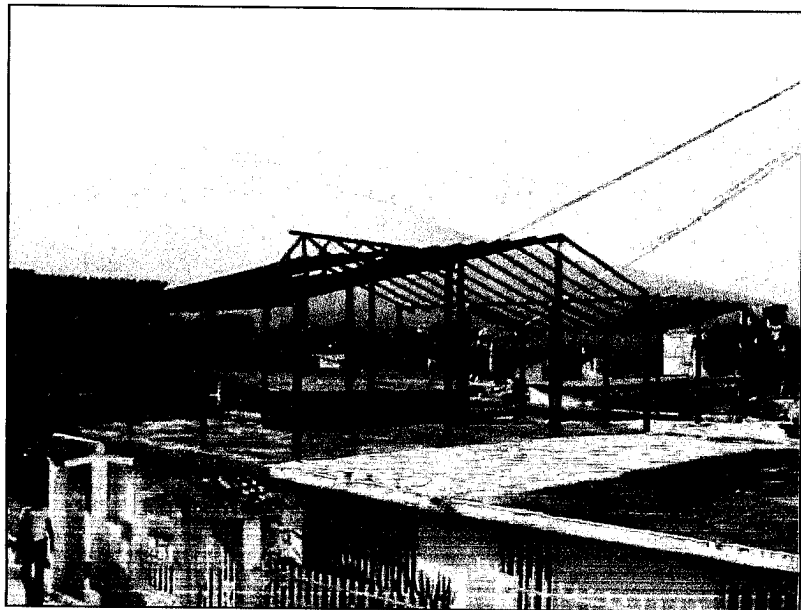


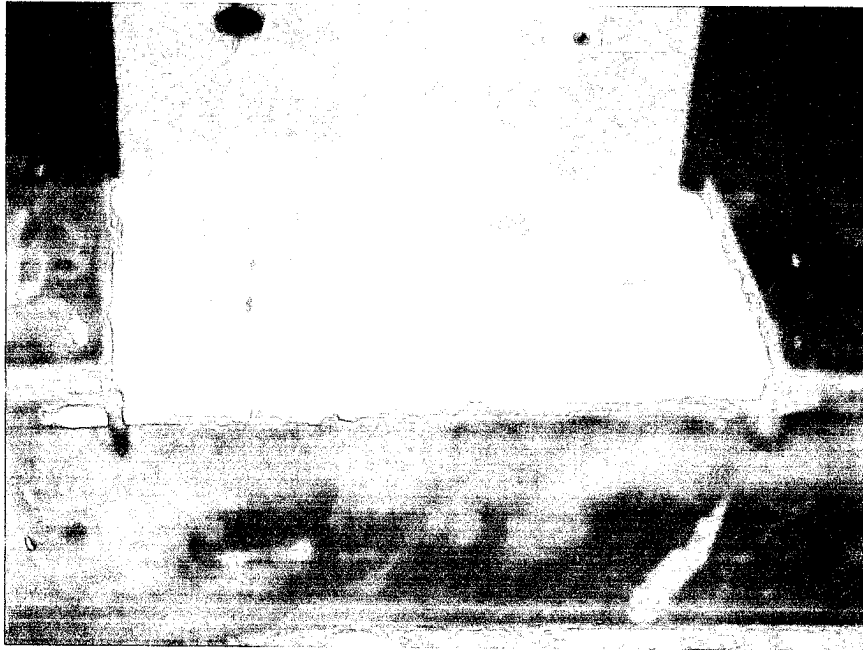


B7.- AGRIETAMIENTO
DEL CONCRETO VISTO
A TRAVES DEL
AGUJERO DEL TUBO
DE ACERO

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

B8.- CONSTRUCCION
TIPICA QUE EMPLEA
COLUMNAS CON
TUBOS
ESTRUCTURALES DE
SECCION CUADRADA
100 mm x 100 mm





B9.- AGRIETAMIENTOS EN EL CONCRETO OBSERVADOS AL CORTAR EL TUBO

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

ANEXO C

BIBLIOGRAFIA

- Beer F. y Johnston R. (1993). *Mecánica de Materiales*. (2° Edición). Bogotá: Mc Graw Hill.
- Blume J., Newmark M. and Corning L. (1978). *Design Of Multistory Reinforced Concrete Building For Earthquake Motions*. University of Illinois.
- Evans U.R. (1978). *An Introduction To Metallic Corrosion*. London: Edward Arnold
- Galambos T., Lin F. J. y Johnston B. (1999). *Diseño De Estructuras De Acero Con Lrfd* (1° Edición). México: Prentice Hall.
- Gere J. y Timoshenko S. (1984). *Mecánica De Materiales* (2° Edición). México: Iberoamericana.
- González J. L. (1998). *Mecánica De Fractura, Bases y Aplicaciones*. México: Limusa
- Hibbeler R. C. (1998). *Mecánica De Materiales* (3° Edición). México: Prentice Hall.
- Marín, J. (1974) *Mechanical Behavior of Engineering Materials*. Prentice Hall.
- Mott. R. L. (1996). *Resistencia De Materiales Aplicada* (3° Edición). México: Prentice Hall.

- Park R. and Paulay T. (1975). *Reinforced Concrete Structure*. Chicago: John Wiley & Sons.
- Popov E. (1982). *Introducción A La Mecánica De Los Sólidos*. México: Limusa.
- Porrero J., Ramos C. y Grases J. (1987). *Manual Del Concreto Fresco* (3° Edición). México: SIDETUR.
- Singer F. y Pytel A. (1982). *Resistencia De Materiales* (3° Edición). México: Harla.
- Stüdeman H. (1970). *Ensayo De Materiales Y Control De Defectos En La Industria Del Metal*. Barcelona, España: URMO.
- Timoshenko S. (1957). *Resistencia De Materiales* (2° Edición). Madrid: Espasa-Calpe.
- Willems N., Easley L. y Rolfe S. (1984). *Resistencia De Los Materiales* (1° Edición). México: Mc Graw Hill.

ANEXO D

HOJA DE VIDA

GREGORIO ANTONIO RAMIREZ ARAUJO

TELEFONOS: 0276 – 3414805 / 0416 – 6770373
CEDULA DE IDENTIDAD: V.-3.766.998
E-MAIL: ramman@cantv.net
DIRECCIÓN: Residencias la Tinaja, casa # 03, Calle Las Delicia, Los KiosKos
San Cristóbal - Edo. Táchira

ESTUDIOS REALIZADOS

TITULO OBTENIDO: **Bachiller en Ciencias**
(1965-1970)
NOMBRE DE LA INSTITUCION: Liceo "Libertador" Mérida-Edo.
Mérida

TITULO OBTENIDO: **Ingeniero Mecánico**
(1971-1976)
NOMBRE DE LA INSTITUCION: Universidad de Los Andes (ULA) Mérida-Edo.
Mérida

EXPERIENCIA LABORAL Y DOCENTE

* PROFESOR UNIVERSITARIO (15-04-1982 a la fecha): en *la Universidad del Táchira (UNET), Departamento de Ingeniería Mecánica*. Materias Dictadas: Mecánicas de Máquinas, Resistencia de Materiales, Mecánica Racional y Mecánica I. San Cristóbal - Edo. Táchira.

* INGENIERO DE OPERACIONES (1979-1982): en *la Compañía Anónima Metro de Caracas*. Trabajo Realizado: Manuales de Operación de Patio y Talleres. Inspección de equipos. Entrenamiento del personal técnico de la gerencia de operaciones. Caracas- Distrito Federal.

* PROFESOR UNIVERSITARIO (1981-1982): en *el Instituto Universitario Antonio José de Sucre*. Materias Dictadas: Mecánica Estática. Caracas- Distrito Federal.

* INGENIERO DE PROYECTOS E INGENIERO DE PLANTA (1976-1979): en *la Compañía Vidrios Domésticos S.A.* Trabajo Realizado: Encarga de proyectos de ampliación de la planta y jefe del taller de mantenimiento de máquinas y molduras. Tejerías-Edo. Aragua.

* PREPARADOR DE RESISTENCIA DE MATERIALES (1974-1976) en la Universidad de Los Andes. Mérida Edo. Mérida.

IDIOMAS

- INGLES: Lectura y escritura con buen dominio.
- FRANCÉS: Lectura y escritura con dominio aceptable.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)