

CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE FISURACIÓN EN
PÓRTICOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A CARGA LATERAL
DINÁMICA



LEANDRO ENRIQUE BOJACÁ CHAUTÁ

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D. C.
ENERO 2011

CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE FISURACIÓN EN PÓRTICOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A CARGA LATERAL DINÁMICA

CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE FISURACIÓN EN PÓRTICOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A CARGA LATERAL DINÁMICA



LEANDRO ENRIQUE BOJACÁ CHAUTÁ

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

DIRECTOR: ING. FEDERICO ALEJANDRO NUÑEZ MORENO

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

BOGOTÁ D. C.

ENERO 2011

CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE FISURACIÓN EN PÓRTICOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A CARGA LATERAL DINÁMICA

AGRADECIMIENTOS

Al laboratorio de pruebas y ensayos de la Pontificia Universidad Javeriana por la prestación de todos los recursos humanos, logísticos, físicos y operativos durante la realización de los diferentes ensayos para el presente trabajo de grado.

A la empresa Holcim (Colombia) S.A., por la colaboración en la adquisición del concreto necesario para la construcción de las respectivas probetas.

Al ingeniero Federico Alejandro Núñez Moreno por la orientación y asesoría durante todo el proceso de desarrollo del presente proyecto de investigación.

Al ingeniero Daniel Mauricio Ruiz Valencia por su colaboración durante el proceso de ejecución de los ensayos.

A mis padres por el apoyo y motivación que me brindaron para superar los inconvenientes presentados y salir adelante en todo momento.

A todas aquellas personas que de una u otra manera contribuyeron para el óptimo desarrollo del presente trabajo de grado.

CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE FISURACIÓN EN PÓRTICOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A CARGA LATERAL DINÁMICA

CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	10
2.	JUSTIFICACION Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	11
3.	OBJETIVOS	13
3.1	GENERAL	13
3.2	ESPECIFICOS	13
4.	MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE.....	14
4.1	TEORIA GENERAL DE FRACTURA Y AGRIETAMIENTO.....	14
4.1.1	Tipos de fallas	14
4.1.2	Modos de propagación de fisuras	15
4.1.3	Evaluación de la energía de fractura.....	16
4.1.4	Mecanismos de falla en el concreto.....	17
4.1.5	Comportamiento del concreto sometido a cargas y su relación con los mecanismos de falla	18
4.1.6	Efecto de la composición del material.....	21
4.1.7	Efecto de la carga cíclica	22
4.1.8	Montaje general de un experimento estable de fractura.....	23
4.1.9	Ejemplos de experimentos avanzados de fractura.....	23
4.2	ESTADO DEL ARTE EN EL MUNDO.....	27
4.3	INVESTIGACIÓN EN COLOMBIA.....	30
4.4	REFERENTES INTERNACIONALES.....	30
4.5	REFERENCIAS NACIONALES.....	33
5.	DESCRIPCIÓN Y PROCEDIMIENTO DEL MONTAJE.....	34
5.1	PREDIMENSIONAMIENTO Y DISEÑO	34
5.2	SISTEMA DE APOYOS.....	38
5.3	CONSTRUCCION DE PORTICOS	40
5.4	MONTAJE EN EL MARCO DE REACCIÓN.....	44
6.	DESARROLLO EXPERIMENTAL DE FRACTURA Y OBTENCIÓN DE PARÁMETROS GEOMÉTRICOS DE FISURACIÓN.....	47

CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE FISURACIÓN EN PÓRTICOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A CARGA LATERAL DINÁMICA

6.1	DESGASTE DINÁMICO	47
6.2	DEGRADACION POR FRACTURA (“PUSHOVER”).....	48
7.	ESTUDIO DE RESISTENCIA DEL CONCRETO Y ACERO	50
7.1	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CILINDROS DE CONCRETO.....	50
7.2	RESISTENCIA A LA TENSIÓN EN VARILLAS CORRUGADAS DE ACERO	50
8.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	52
8.1	COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA DE APOYOS	52
8.2	DESGASTE DINÁMICO (PRE-CARGA)	53
8.2.1	Propagación de fisuras y área de afectación	56
8.2.2	Ciclos de Histéresis	69
8.3	DEGRADACIÓN POR FRACTURA (“PUSHOVER”).....	76
8.3.1	Ancho de fisuras.....	77
9.	CONCLUSIONES.....	80
10.	RECOMENDACIONES PARA ESTUDIOS FUTUROS.....	82
11.	BIBLIOGRAFIA	83
12.	ANEXOS.....	85
12.1	ANEXO A: CARTILLA DE DESPIECE DE ACERO DE REFUERZO	85
12.2	ANEXO B: DETALLE DE PLATINAS DEL SISTEMA DE APOYOS.....	86

CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE FISURACIÓN EN PÓRTICOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A CARGA LATERAL DINÁMICA

LISTA DE TABLAS

Tabla 5-1. Propiedades de viga y columnas	35
Tabla 5-2. Fuerza y desplazamientos de diseño mediante análisis matricial.....	35
Tabla 5-3. Cantidad total de concreto para el proyecto	36
Tabla 6-1. Procedimiento del desgaste dinámico.....	48
Tabla 6-2. Procedimiento del ensayo de pushover	49
Tabla 7-1. Resistencia a la compresión del concreto [11]	50
Tabla 8-1. Fuerza y desplazamientos de diseño revisados	52
Tabla 8-2. Descripción de los pasos de carga.....	55
Tabla 8-3. Fuerza máxima en cada paso de carga	55
Tabla 8-4. Avance y velocidad de propagación de fisuras en pórtico 1	63
Tabla 8-5. Avance y velocidad de propagación de fisuras en pórtico 2	65
Tabla 8-6. Avance y velocidad de propagación de fisuras en pórtico 3	66
Tabla 8-7. Pasos de carga para ensayo de pushover	76
Tabla 8-8. Ancho de fisura para pórtico 1	77
Tabla 8-9. Ancho de fisura para pórtico 2	78
Tabla 8-10. Ancho de fisura para pórtico 3	79

CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE FISURACIÓN EN PÓRTICOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A CARGA LATERAL DINÁMICA

LISTA DE GRAFICAS

Gráfica 6-1. Procedimiento del ensayo de pushover	49
Gráfica 7-1. Esfuerzo vs Deformación varilla N° 2	50
Gráfica 7-2. Esfuerzo vs Deformación varilla N° 3	51
Gráfica 8-1. Deflexión del pórtico bajo frecuencia de 0.25 Hz	53
Gráfica 8-2. Deflexión del pórtico bajo frecuencia de 1 Hz	54
Gráfica 8-3. Deflexión del pórtico bajo frecuencia de 4 Hz	54
Gráfica 8-4. Fuerza máxima en cada paso de carga.....	56
Gráfica 8-5. Longitud de avance de fisuras en pórtico 1	64
Gráfica 8-6. Velocidad de propagación de fisuras en pórtico 1	64
Gráfica 8-7. Longitud de avance de fisuras en pórtico 2	65
Gráfica 8-8. Velocidad de propagación de fisuras en pórtico 2	66
Gráfica 8-9. Longitud de avance de fisuras en pórtico 3	67
Gráfica 8-10. Velocidad de propagación de fisuras en pórtico 3.....	67
Gráfica 8-11. Ciclos de histéresis con desplazamientos constantes para pórtico 1	70
Gráfica 8-12. Ciclos de histéresis con frecuencias iguales para pórtico 1	71
Gráfica 8-13. Ciclos de histéresis con desplazamientos constantes para pórtico 2.....	72
Gráfica 8-14. Ciclos de histéresis con frecuencias iguales para pórtico 2	73
Gráfica 8-15. Ciclos de histéresis con desplazamiento constante para pórtico 3	74
Gráfica 8-16. Ciclos de histéresis con frecuencias iguales para pórtico 3	75
Gráfica 8-17. Descripción del ensayo de pushover	76
Gráfica 8-18. Carga vs Ancho de fisura (Pórtico 1)	77
Gráfica 8-19. Carga vs Ancho de fisura (Pórtico 2)	78
Gráfica 8-20. Carga vs Ancho de fisura (Pórtico 3)	79

CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE FISURACIÓN EN PÓRTICOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A CARGA LATERAL DINÁMICA

LISTA DE IMÁGENES

Imagen 4.1. Comportamiento esquemático de un material dúctil [14]	14
Imagen 4.2. Comportamiento esquemático de un material frágil [14].....	15
Imagen 4.3. Modos de fractura [14]	16
Imagen 4.4. Forma esquemática de la obtención de la energía de fractura [14]	17
Imagen 4.5. Mecanismo de daño en el concreto [14].....	17
Imagen 4.6. Respuesta esquemática a compresión uniaxial del concreto [14].....	18
Imagen 4.7. Respuesta esquemática a tracción uniaxial del concreto [14].....	19
Imagen 4.8. Modos de falla para distintas combinaciones biaxiales de esfuerzo [14]	20
Imagen 4.9. Comportamiento triaxial para distintos incrementos de σ_1 [14]	20
Imagen 4.10 Curva esfuerzo-deformación para diferentes composiciones de concreto [17]	21
Imagen 4.11. Curva esfuerzo-deformación de compresión cíclica para concreto [16].....	22
Imagen 4.12. Fotografía del montaje experimental para la prueba de cuatro puntos de corte entre soportes rotativos [17].....	24
Imagen 4.13. Fotografía de la celda de carga abierta que muestra un espécimen instrumentado [17].....	25
Imagen 4.14. Fotografía de la máquina multiaxial Eindhoven [17]	26
Imagen 4.15. Tipos de agrietamiento en vigas de concreto [2]	31
Imagen 5.1. Esquema representativo de aplicación de carga	34
Imagen 5.2. Sección transversal de elementos (mm).....	35
Imagen 5.3. Dimensiones de elementos	36
Imagen 5.4. Zonas de tensión en el pórtico	37
Imagen 5.5. Despiece de acero de refuerzo	37
Imagen 5.6. Esquema representativo del sistema de apoyos	38
Imagen 5.7. Platinas del sistema de apoyos	39
Imagen 5.8. Esquema representativo del ensayo	39
Imagen 5.9. Vista interior de la formaleta de madera	40
Imagen 5.10. Amarre del acero de refuerzo.....	40
Imagen 5.11. Canasta de acero dentro de la formaleta.....	41
Imagen 5.12. Estructura plomada y nivelada	41
Imagen 5.13. Proceso de fundición del pórtico.....	42
Imagen 5.14. Vibrado con chipote.....	42
Imagen 5.15. Desencofrado del pórtico.....	43
Imagen 5.16. Proceso de curado	43
Imagen 5.17. Actuador dinámico MTS	44
Imagen 5.18. Ubicación del pórtico en el marco de reacción	44
Imagen 5.19. Montaje del sistema de apoyos	45
Imagen 5.20. Unión gato hidráulico - ménsula	45

CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE FISURACIÓN EN PÓRTICOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A CARGA LATERAL DINÁMICA

Imagen 5.21. Vista general del montaje	46
Imagen 8.1. Zonas de tensión bajo nueva carga de diseño	52
Imagen 8.2. Fisuras generadas en el nudo 1	57
Imagen 8.3. Fisuras generadas en el nudo 2	57
Imagen 8.4. Unión de fisuras en la columna	58
Imagen 8.5. Fisuras generadas en el nudo 1	58
Imagen 8.6. Fisuras generadas en el nudo 2	59
Imagen 8.7. Unión de fisuras en la columna	59
Imagen 8.8. Fisuras generadas en el nudo 1	60
Imagen 8.9. Fisuras generadas en el nudo 2	60
Imagen 8.10. Unión de fisuras en la columna	61
Imagen 8.11. Determinación de la longitud de fisuras para el pórtico 1	62
Imagen 8.12. Determinación de la longitud de fisuras para el pórtico 2	62
Imagen 8.13. Determinación de la longitud de fisuras para el pórtico 3	62

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Cartilla de despiece de acero de refuerzo	85
Anexo B. Detalle de platinas del sistema de apoyos (mm)	86

CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE FISURACIÓN EN PÓRTICOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A CARGA LATERAL DINÁMICA

1. INTRODUCCIÓN

El concreto es uno de los materiales de mayor uso para aplicaciones de tipo estructural debido a sus características económicas y de gran maleabilidad para generar geometrías necesarias para los diferentes proyectos estructurales. Sin embargo este material pierde capacidad estructural a futuro, si fisuras de diferente tipología y origen llegan a la superficie, haciendo que otros procesos de desgaste puedan alcanzar el refuerzo estructural.

En el caso de estructuras tipo pórtico que van a trabajar bajo diferentes estados de carga durante su vida útil, es necesario garantizar la estabilidad de la estructura durante días de cargas normales (cargas de servicio), y debe mantenerse de esta manera hasta el instante en el que una carga especial demande de la estructura toda su capacidad de resistencia, disipación de energía y ductilidad.

Si para este instante, la estructura se encuentra debilitada por microfisuras o por fisuras visibles, es posible que no alcance los parámetros de diseño y la estructura se encuentre en un estado de baja resistencia o de "capacidad potencial" restringida, lo cual es indeseable para fines sísmicos.

Sin embargo crear un material que no se desgaste con el tiempo hace parte de la idealización estructural y eventualmente la capacidad del material, que por mayor calidad en la producción y en los materiales usados, bajo cargas repetidas, de servicio, o por problemas de su colocación "in situ", tenderá a caer en estados de detrimento por acciones bien sea físicas, químicas o ambas.

Debido a que gran cantidad de estructuras presentan fisuraciones que no corresponden a las generadas por efectos de retracción y temperatura, o por niveles de cargas superiores a las de diseño, se pretende con el siguiente trabajo de grado una caracterización de las fisuras inducidas en estructuras de concreto con el fin de establecer relaciones del tiempo en función del ancho, longitud, área de afectación y velocidad de propagación, bajo la acción de cargas dinámicas. Es de importancia conocer el comportamiento de las estructuras cuando están sometidas a cargas dinámicas para establecer zonas de daño y tiempos de incremento de fisuras, si los niveles de carga los generan.

CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE FISURACIÓN EN PÓRTICOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A CARGA LATERAL DINÁMICA

2. JUSTIFICACION Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente se han realizado ensayos de resistencia de pórticos de concreto a escala reforzados con CFRP en los nudos [4], con el fin de analizar el comportamiento de la resistencia, la rigidez y el desplazamiento en los pórticos. Del anterior estudio se concluyó que el confinamiento de los nudos con fibra de carbono disminuye significativamente fisuras y grietas de elementos estructurales de concreto reforzado [4]

Adicionalmente se han realizado investigaciones sobre la influencia de parámetros de fractura en la propagación de fisuras en el concreto [6]. Se ha concluido en investigaciones que el aumento de la energía de fractura mejora la ductilidad de componentes y se ha estudiado la respuesta dinámica no lineal de concreto bajo la acción de cargas impulsivas [5].

Se han estudiado exhaustivamente las causas de la generación de fisuras y se ha logrado concluir que las fisuras se presentan tanto en concreto en estado plástico como en concreto en proceso de endurecimiento [1].

Con el fin de establecer un buen criterio para la rehabilitación de estructuras de concreto afectadas por fisuración, es necesario llevar a cabo una completa evaluación de las fisuras generadas e identificar la localización y características tales como ancho, longitud, velocidad de avance, entre otras.

Dicha evaluación comprende determinar si las fisuras generadas presentan algún tipo de problema estructural considerando las condiciones de carga existentes y el estado de daño ocasionado [1]. Es necesaria la revisión de especificaciones de diseño y registros de construcción, ya que teóricamente se trabaja dentro de rangos admisibles de carga y deformación tanto para esfuerzos, como para la deriva admisible.

Para que exista una necesidad de reparación de fisuras tiene que presentarse algunos parámetros importantes tales como la reducción de la resistencia y la durabilidad a niveles que no sean admisibles por los códigos de diseño y construcción; así mismo tiene que verse seriamente afectada la funcionalidad de la estructura. [1]

Los métodos más significativos que se han utilizado para la evaluación de fisuras son: observaciones directas e indirectas, ensayos destructivos y no destructivos y ensayos de testigo extraídos de la propia estructura.

Para la observación directa e indirecta se sugiere marcar una grilla sobre la superficie de la estructura con la utilidad de poder ubicar de manera precisa las fisuras en el esquema.

CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE FISURACIÓN EN PÓRTICOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A CARGA LATERAL DINÁMICA

En este tipo de medición se utiliza un comparador, que es un pequeño microscopio con una escala en el lente, el cual puede medir con una precisión de alrededor 0.025 mm. También se puede estimar el ancho de las fisuras con una tarjeta de comparación, que corresponde a una tarjeta con líneas claramente marcadas y en cada una de estas líneas se especifica una medida de ancho [1].

En este tipo de observaciones es preciso incluir descripciones sobre deterioros superficiales, armadura expuesta, manchas de óxido, etc. Se puede monitorear el movimiento de las fisuras mediante indicadores de movimiento mecánicos, los cuales permiten la lectura directa del desplazamiento y rotación de las fisuras.

Los testigos extraídos de la estructura sirven principalmente para detallar las fisuras generadas caracterizando propiedades como ancho, longitud y profundidad de penetración. De estos testigos se puede realizar un análisis petrográfico, el cual permite identificar factores relacionados con la fisuración tales como la relación agua cemento y la distribución de los componentes del concreto.

CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE FISURACIÓN EN PÓRTICOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A CARGA LATERAL DINÁMICA

3. OBJETIVOS

3.1 GENERAL

Caracterizar el comportamiento de parámetros de fisuras, en términos de ancho, longitud, y área de afectación, de pórticos planos en concreto reforzado cuando son sometidos a cargas laterales dinámicas, dentro de rangos de deriva admisibles.

3.2 ESPECIFICOS

- Caracterizar mediante ensayos experimentales las fisuras generadas en pórticos de concreto reforzado y los cambios geométricos de fisuras como ancho, longitud y su área de afectación.
- Analizar el comportamiento de los parámetros de las fisuras monitoreadas, en función del tiempo y de la frecuencia de la carga de diseño experimental.

CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE FISURACIÓN EN PÓRTICOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A CARGA LATERAL DINÁMICA

4. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

4.1 TEORIA GENERAL DE FRACTURA Y AGRIETAMIENTO

La fractura se define, desde un punto de vista ingenieril, como una discontinuidad física en un sólido. Un material es frágil cuando su rotura ocurre en forma súbita y catastrófica para pequeñas deformaciones. Entonces, un proceso de fractura frágil es, “*cuando durante el fallo que provoca la propagación de una o varias fisuras, la tensión en la cabeza de estas discontinuidades es siempre menor que la tensión umbral de fluencia plástica del material*” [14].

La fractura puede ocurrir debido a varias acciones no mecánicas tales como la temperatura, la humedad y la expansión de componentes en materiales compuestos. Igualmente, las cargas cíclicas son causales de agrietamiento, aun con bajas amplitudes. Además existen otros fenómenos que son nocivos y generadores de posibles fisuras en el concreto como lo son la aluminosis y la carbonatación.

4.1.1 Tipos de fallas

4.1.1.1 Rotura dúctil. Una rotura dúctil se identifica por la formación de cuellos provocados por una excesiva deformación plástica. Este tipo de fractura pre-avisa sobre su ocurrencia y normalmente se desarrolla bajo estados de esfuerzo cortante y debido a esto describe bandas de 45° respecto del eje de carga.

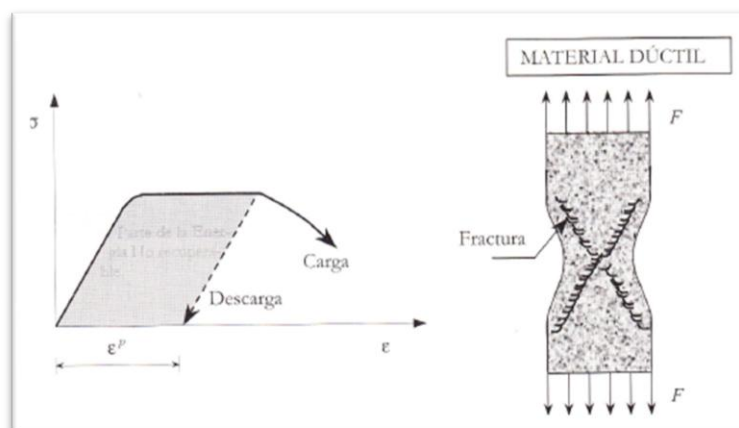


Imagen 4.1. Comportamiento esquemático de un material dúctil [14]

CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE FISURACIÓN EN PÓRTICOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A CARGA LATERAL DINÁMICA

4.1.1.2 Rotura frágil. Una rotura frágil se presenta por una deformación pequeña, la cual conduce a propagación de fisuras a través del cuerpo del sólido pero sin alcanzar a desarrollar mecanismos plásticos. Este tipo de fisura es plana y se desarrolla principalmente por esfuerzos axiales de tensión dirigidos en la dirección de la carga.

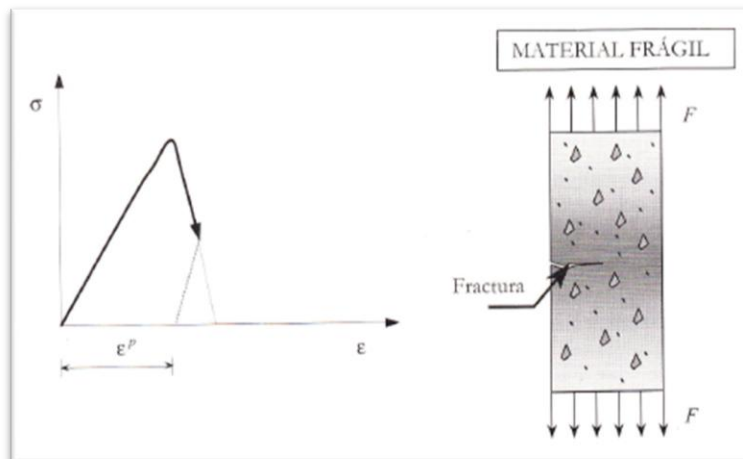


Imagen 4.2. Comportamiento esquemático de un material frágil [14]

4.1.2 Modos de propagación de fisuras

4.1.2.1 Modo de apertura o "Modo I". El modo I de fractura es aquel en el cual las caras de la fisura se separan entre sí de una forma casi paralela. En este modo se desarrollan esfuerzos de tracción.

4.1.2.2 Modo de deslizamiento o "Modo II". El modo II de fractura es aquel en el cual las caras de la fisura se deslizan una sobre la otra. En este modo se generan esfuerzos cortantes.

4.1.2.3 Modo de torsión o "Modo III". Se presenta modo III de fractura cuando las caras de la fisura se deslizan una respecto de la otra en forma lateral. En este caso se desarrollan esfuerzos cortantes.

CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE FISURACIÓN EN PÓRTICOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A CARGA LATERAL DINÁMICA

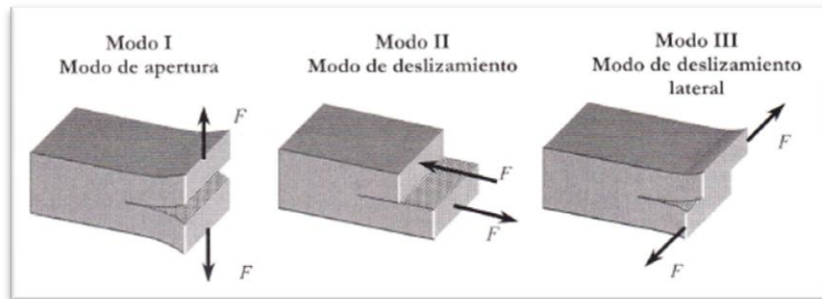


Imagen 4.3. Modos de fractura [14]

4.1.3 Evaluación de la energía de fractura.

Durante la acción de una fuerza exterior “cuasi-estática” y monótona creciente se desarrolla un trabajo que se almacena en forma de energía de deformación. Cuando esta energía alcanza la magnitud de la densidad de energía de fractura superficial del material, ocurre la fractura y la pieza se separa en dos partes liberando la energía en forma de fractura, tal que cada una de las partes relaja inmediatamente sus esfuerzos.

Trabajo realizado → *energía de deformación* → *energía de fractura*

La energía disipada durante un proceso de fractura proviene del desarrollo de mecanismos plásticos, expresado por la disipación plástica por unidad de área, y por la fractura, cuya disipación se gasta en separar dos planos atómicos.

Normalmente, el método más utilizado para la obtención de la energía de fractura se basa en un ensayo tipo RILEM, en el cual se determina independientemente la energía de fractura y el esfuerzo máximo de generación de fisuras. A partir del ensayo realizado se obtiene la energía disipada en todo el elemento y de allí puede calcularse una energía media de fractura como

$$G_f = W_f / A_f$$

G_f = Energía de fractura

W_f = Área bajo la curva Fuerza vs Desplazamiento

A_f = Área sección transversal

CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE FISURACIÓN EN PÓRTICOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A CARGA LATERAL DINÁMICA

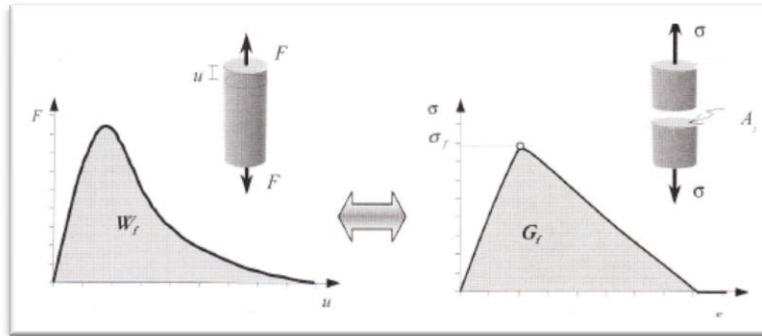


Imagen 4.4. Forma esquemática de la obtención de la energía de fractura [14]

4.1.4 Mecanismos de falla en el concreto.

Aún antes de iniciar cualquier proceso de carga, es posible observar que en la masa del concreto existen algunas microfisuras. A partir de observaciones realizadas se pueden identificar cuatro mecanismos de falla, los cuales se clasifican en orden cronológico de acuerdo a su aparición en el proceso.

- Microfisuras en la interface entre agregado pétreo y la pasta de cemento.
- Incursiones en la pasta de cemento, a partir de las microfisuras generadas en la interface con el agregado.
- Fisuras originadas en el mortero con dirección definida, así como nuevas fisuras que interconectan los espacios vacios en el material.
- Uniones entre diferentes fisuras, lo cual conlleva a la falla del elemento.

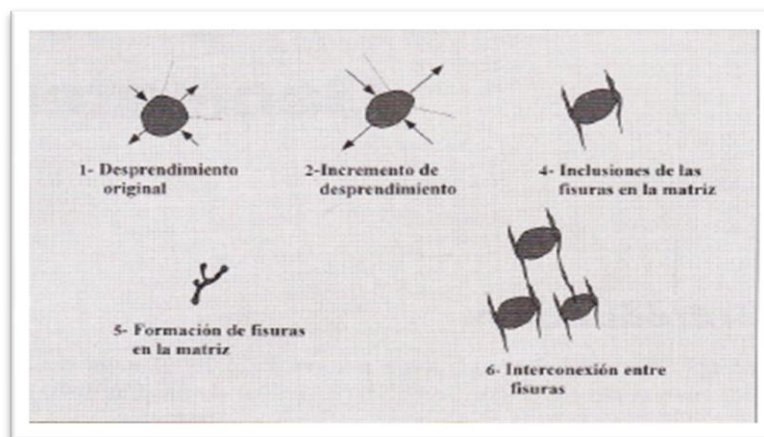


Imagen 4.5. Mecanismo de daño en el concreto [14]

CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE FISURACIÓN EN PÓRTICOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A CARGA LATERAL DINÁMICA

4.1.5 Comportamiento del concreto sometido a cargas y su relación con los mecanismos de falla

4.1.5.1 Comportamiento uniaxial a compresión. Durante un proceso de carga se pueden identificar cinco estados de respuesta según el tipo de comportamiento volumétrico.

- Estado I: Etapa de acomodamiento, en la cual los poros tienden a cerrarse. Se mantiene constante su rigidez mediante una disminución de la deformación volumétrica.
- Estado II: Etapa elástico lineal, la cual comienza a un esfuerzo aproximado del 10% de la resistencia máxima. Se mantiene constante la rigidez y el módulo de Poisson.
- Estado III: Etapa elástico-no lineal, la cual comienza a un esfuerzo del 35% de la resistencia máxima. Debido a la degradación de la rigidez se acumulan deformaciones que crecen más que los esfuerzos.
- Estado IV: Etapa inelástica acompañada por hinchamiento, la cual comienza a un esfuerzo del 75% de la resistencia máxima. Se presenta un aumento de las deformaciones, mayor pérdida de rigidez, incremento del coeficiente de Poisson y se genera crecimiento de las microfisuras en la pasta de cemento.
- Estado V: Etapa inelástica acompañada por deformaciones importantes, la cual comienza a un esfuerzo del 95% de la resistencia máxima. Se presenta un proceso de propagación excesiva de fisuras en ciertos puntos. Inmediatamente después de superar el esfuerzo máximo se presenta una disminución súbita del incremento de volumen.

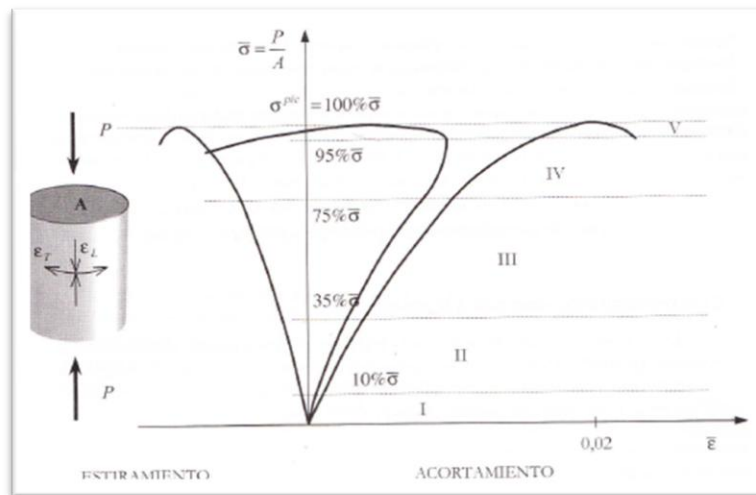


Imagen 4.6. Respuesta esquemática a compresión uniaxial del concreto [14]

CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE FISURACIÓN EN PÓRTICOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A CARGA LATERAL DINÁMICA

4.1.5.2 Comportamiento uniaxial a tracción. Durante un proceso de carga el rango de comportamiento lineal se mantiene hasta límites más cercanos al esfuerzo máximo.

- Estado I: Etapa de comportamiento elástico-lineal que va hasta esfuerzos menores al 60% de la resistencia máxima a tracción.
- Estado II: Etapa que se mantiene hasta lograr un esfuerzo del 75% de la resistencia máxima. Se produce un mayor desprendimiento del agregado y la propagación de fisuras se hace inestable mostrando un comportamiento no-lineal hasta el esfuerzo máximo.
- Estado III: Etapa en que se inicia un proceso de rápida e inestable propagación de fisuras, las cuales se concentran en cierta zona del elemento.

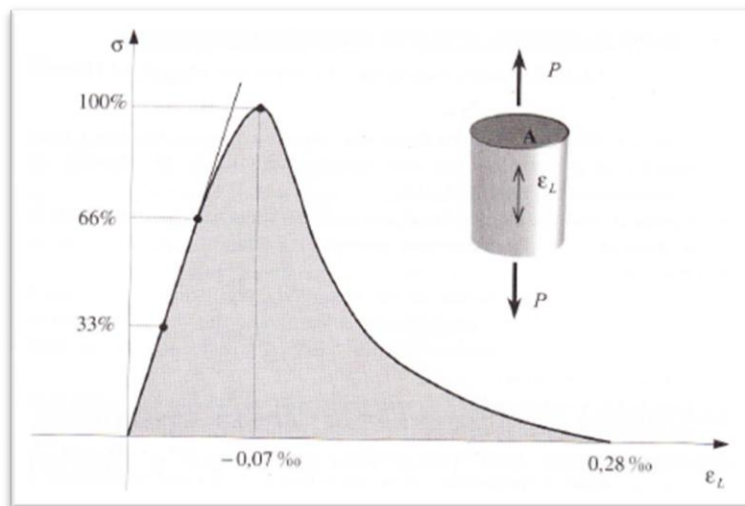


Imagen 4.7. Respuesta esquemática a tracción uniaxial del concreto [14]

4.1.5.3 Comportamiento biaxial. El concreto presenta diferentes propiedades que las mencionadas para comportamiento uniaxial de compresión o tracción. Respecto a la máxima resistencia, se presentan incrementos en el rango del 22-25% para estados de compresión biaxial con una relación entre esfuerzos principales máximos y mínimos de 0,5. Para estados de tracción-compresión, cuando aumenta el esfuerzo de tracción la resistencia disminuye casi linealmente.

Para compresión biaxial, el concreto presenta un aumento de rigidez inicial, el cual puede ser relacionado con el efecto Poisson, también se genera un aumento de la ductilidad en el esfuerzo máximo, lo que indica una reducción del daño interno.

En cuanto a la formación de las fisuras, éstas se presentan aproximadamente en una dirección perpendicular a la máxima deformación de tracción.

CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE FISURACIÓN EN PÓRTICOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A CARGA LATERAL DINÁMICA

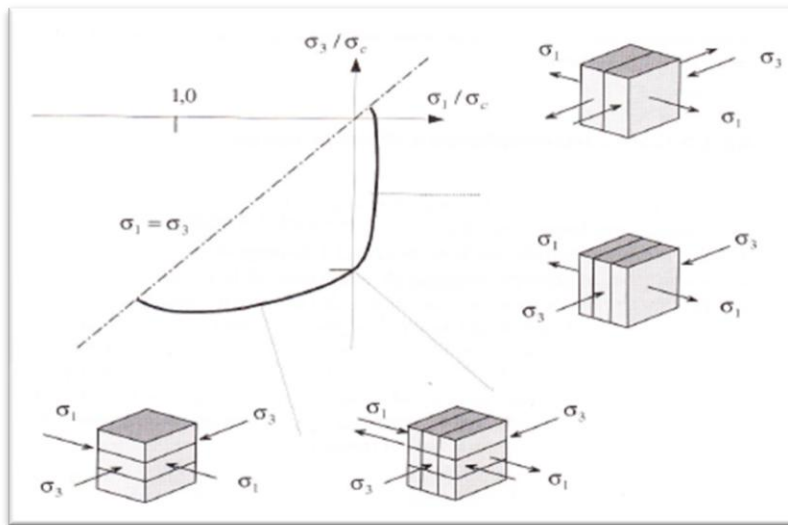


Imagen 4.8. Modos de falla para distintas combinaciones biaxiales de esfuerzo [14]

4.1.5.4 Comportamiento triaxial. Bajo estados triaxiales de esfuerzo, el concreto presenta un incremento de ductilidad debido a la influencia de la presión. Según ensayos experimentales, bajo estados hidrostáticos de esfuerzo, el concreto muestra un comportamiento no-lineal en su curva esfuerzo deformación.

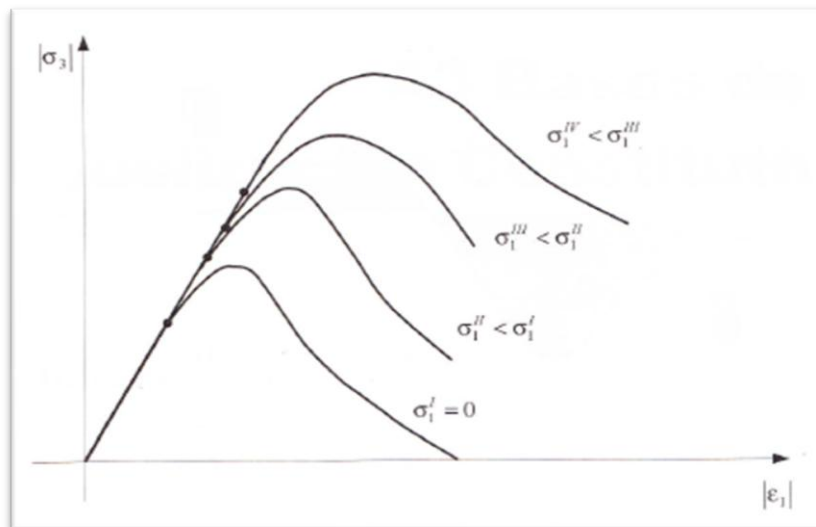


Imagen 4.9. Comportamiento triaxial para distintos incrementos de σ_1 [14]

CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE FISURACIÓN EN PÓRTICOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A CARGA LATERAL DINÁMICA

4.1.6 Efecto de la composición del material

El efecto de la composición del material sólo puede ser considerado para muestras cargadas en circunstancias idénticas. Estas circunstancias son más amplias de las que se pueden sospechar sobre la base de la frontera y los efectos del tamaño. Además de estos factores, la velocidad de deformación también es de importancia. Ciclos de carga y descarga o fatiga entre otros factores físicos, tales como la temperatura y la humedad pueden desempeñar un papel importante. Tal vez la combinación de todos estos factores tiene un efecto importante en el comportamiento mecánico. Básicamente, el interés principal es la obtención de parámetros para los modelos de fractura del concreto y enfatizar en la estrecha relación entre el modelo y el experimento.

El conocimiento del comportamiento esfuerzo-deformación del concreto es elemento esencial para los modelos computarizados. Sin embargo, las soluciones analíticas requieren datos que pueden servir de base para el modelado. Básicamente, las mismas formas de las curvas de esfuerzo-deformación se encuentran para concretos con diferentes composiciones. Micro y macro fisuras parecen ser la fuente para la observación de no linealidades y los detalles en el proceso de fractura puede causar desviaciones. En los últimos años existe una tendencia a las composiciones refinadas del concreto con una resistencia a la compresión más alta. Esto se logra principalmente a través de la selección equilibrada de agregado. El comportamiento esfuerzo-deformación uniaxial del concreto para una variedad de clases de resistencia se muestra en la imagen 4.10. Básicamente, la forma de las curvas esfuerzo-deformación es la misma, las diferencias se observan en el esfuerzo máximo ya que el comportamiento antes de llegar al pico tiende a ser lineal. El comportamiento posterior al máximo esfuerzo parece más frágil para concretos de mayor resistencia, pero Wischers [18] afirmó que esto fue causado por la cantidad de energía liberada en las piezas elásticas de la muestra.

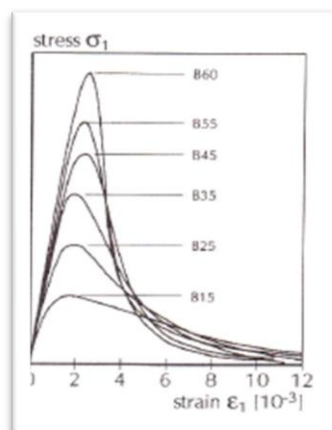


Imagen 4.10 Curva esfuerzo-deformación para diferentes composiciones de concreto [17]

CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE FISURACIÓN EN PÓRTICOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A CARGA LATERAL DINÁMICA

4.1.7 Efecto de la carga cíclica

El comportamiento cíclico del concreto es de suma importancia, especialmente para aquellas circunstancias prácticas donde existe una carga variable. Sin embargo, en el régimen después del esfuerzo máximo, la descarga de varias partes de una estructura puede ocurrir tan pronto como se efectuó la localización de grietas existentes en una zona próxima.

En la imagen 4.11 se muestra un ejemplo de una curva esfuerzo-deformación con un determinado número de ciclos de descarga/recarga. En el régimen anterior al máximo esfuerzo, se realizan tres ciclos de carga, la próxima está en el máximo esfuerzo, y un quinto ciclo de descarga/recarga se realiza en el régimen después del esfuerzo pico. El primer y segundo ciclo es apenas visible, y coinciden prácticamente con la rama ascendente. El tercer ciclo se visualiza más claramente. Después de un primer tramo en la línea de descarga, la curva de descarga se enfoca suavemente hacia el eje horizontal de la gráfica. La curva de carga aumenta con mayor rapidez, pero se observa claramente que la pendiente se ha reducido en cierta medida, en comparación con la línea inicial ascendente. En algún momento, la curva de carga se distancia, y la curva de esfuerzo deformación continúa nuevamente. Lo mismo se puede ver en el régimen después del esfuerzo pico en que la rigidez de la curva de carga disminuye aún más.

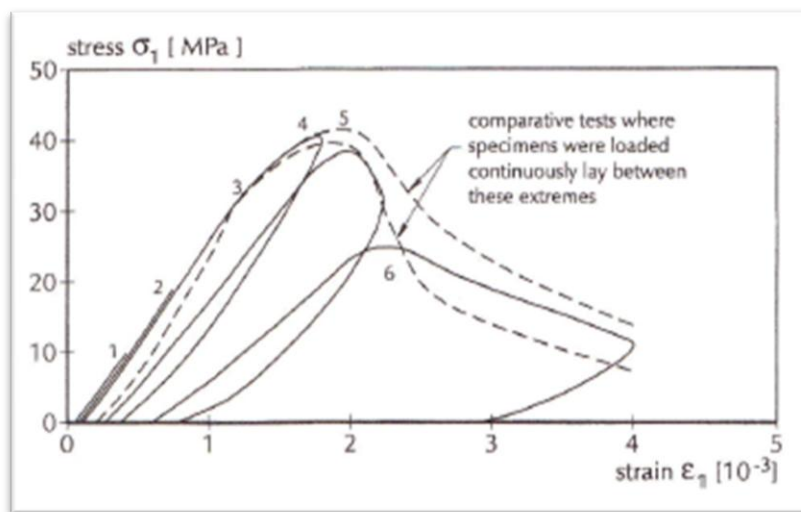


Imagen 4.11. Curva esfuerzo-deformación de compresión cíclica para concreto [16]

CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE FISURACIÓN EN PÓRTICOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A CARGA LATERAL DINÁMICA

4.1.8 Montaje general de un experimento estable de fractura.

Con el fin de medir las energías de fractura y la forma de la curva de esfuerzo deformación es necesario un experimento de desplazamiento controlado. La estabilidad de una prueba de fractura depende del equilibrio entre la energía liberada a partir de piezas elásticas de la muestra y la carga durante la propagación de grietas.

Para el ensayo de tracción, u otros experimentos donde se desarrollan grietas simples, puede ser seleccionada una longitud de control corta, al menos cuando la ubicación del crecimiento de las fisuras es conocida. Para el experimento uniaxial de tracción sobre probetas prismáticas o cilíndricas, esto significa que se deben tener medidas especiales porque, en principio, la grieta fatal puede aparecer en cualquier lugar a lo largo de la muestra. La solución general al problema es hacer una hendidura en la pieza en el lugar donde podría iniciarse la grieta.

Las deformaciones laterales en un experimento de compresión aumentan de forma más gradual, en particular en el régimen del esfuerzo máximo. Algunos fabricantes de sistemas de pruebas de control de desplazamiento han diseñado extensómetros especialmente para el control de desplazamiento lateral en los experimentos de compresión uniaxial.

4.1.9 Ejemplos de experimentos avanzados de fractura

4.1.9.1 Experimento con cuatro puntos de corte. El enfoque común para el experimento consiste en cargar la viga en una máquina de compresión estándar. La viga está soportada por rodamientos, los cuales no tienen fricción. En el ensayo de corte de cuatro puntos, la muestra se sostiene entre barras libres de giro pendular y la carga aplicada es de tensión en lugar de compresión. Dependiendo de la longitud de las barras pendulares, la viga es más o menos libre de moverse en la dirección horizontal, y el crecimiento de la fisura en la parte central entre las hendiduras es casi ilimitado. Una ventaja adicional del ensayo entre barras pendulares es que las reacciones y las cargas pueden ser fácilmente medidas por la instrumentación individual de las barras pendulares con medidores de esfuerzo.

CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE FISURACIÓN EN PÓRTICOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A CARGA LATERAL DINÁMICA

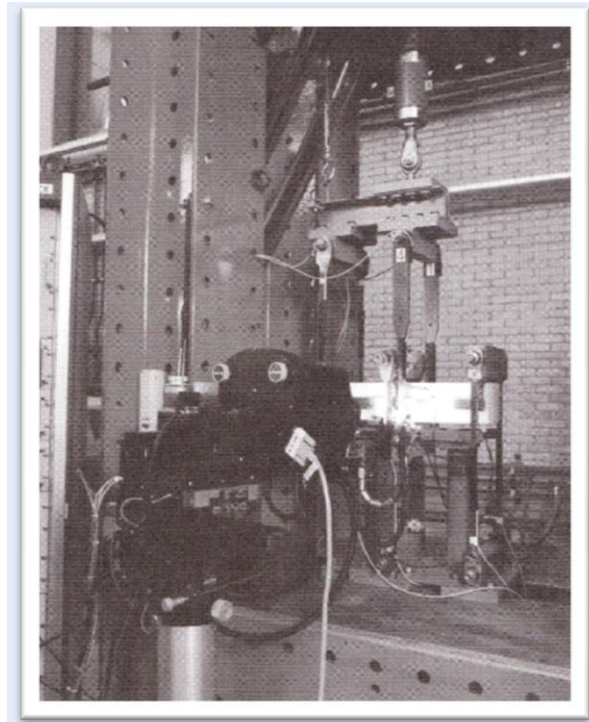


Imagen 4.12. Fotografía del montaje experimental para la prueba de cuatro puntos de corte entre soportes rotativos [17]

4.1.9.2 Ensayo hidráulico de fractura. El segundo ejemplo es la construcción de una celda triaxial para ensayos de concreto y roca bajo la presión hidráulica. En las plataformas marinas ubicadas en las costas y las presas hidroeléctricas, pueden existir grietas que están llenas de un líquido a presión. Con el fin de investigar los procesos de las fisuras en tales condiciones, se diseñó una celda hidráulica especial en la cual una muestra cilíndrica se carga por la presión del líquido a lo largo de la circunferencia. La idea es que el fluido entre a presión en la fisura durante la propagación de la misma, mientras que el líquido se escapa en los poros del concreto o por la piedra arenisca que se utiliza en el experimento. Además, la muestra se puede cargar en la dirección axial, ya sea en tensión o en compresión.

Una carga de compresión lateral conduce a una fisura axial, y el parámetro de control más directo es por lo tanto la deformación axial del cilindro. Durante la propagación de las fisuras, el fluido a presión entra en las grietas y da un impulso adicional para la propagación de las mismas.

CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE FISURACIÓN EN PÓRTICOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A CARGA LATERAL DINÁMICA



Imagen 4.13. Fotografía de la celda de carga abierta que muestra un espécimen instrumentado [17]

4.1.9.3 Experimento de compresión multiaxial. Un tercer ejemplo es el desarrollo de una máquina de ensayo triaxial en la Universidad Tecnológica de Eindhoven. Básicamente, tres máquinas simples de compresión uniaxial se entrelazan para formar una verdadera máquina triaxial con el fin de analizar muestras cúbicas. Los tres ejes cuelgan de cables, los cuales permiten el libre movimiento de todos los ejes en el plano horizontal. A los marcos no se les permite moverse en la dirección vertical, porque los cables son fijos, sin embargo actualmente el equipo está diseñado con contra pesos que están instalados de tal manera que los tres ejes se pueden mover libremente en la dirección vertical.

Cada uno de los ejes de la máquina Eindhoven consiste en un solo actuador hidráulico de capacidad de 2000 kN en compresión y 1400 kN en tensión. El uso del equipo multiaxial de Eindhoven, también permite rutas de carga cíclica y experimentos con relación de desplazamiento constante.

CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE FISURACIÓN EN PÓRTICOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A CARGA LATERAL DINÁMICA

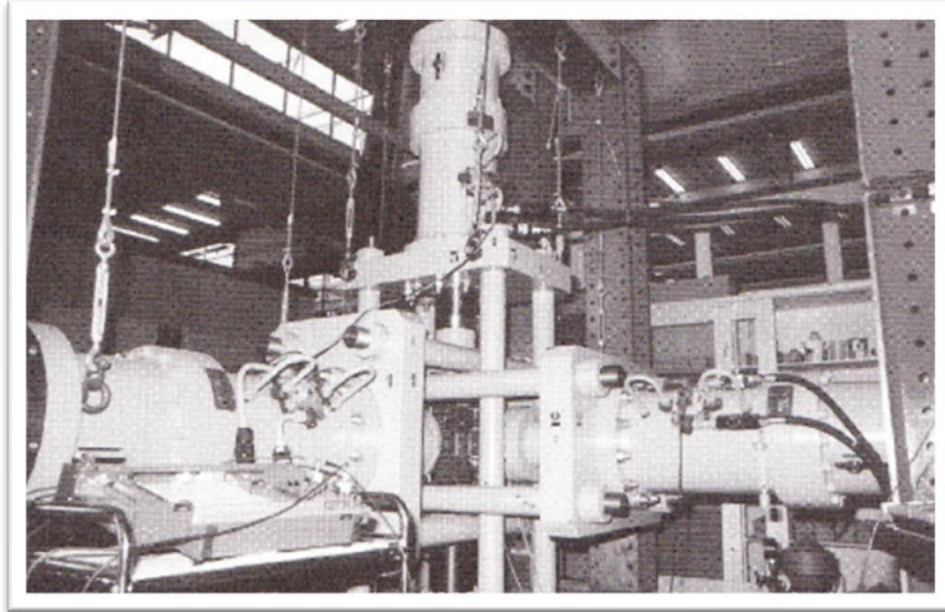


Imagen 4.14. Fotografía de la máquina multiaxial Eindhoven [17]

CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE FISURACIÓN EN PÓRTICOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A CARGA LATERAL DINÁMICA

4.2 ESTADO DEL ARTE EN EL MUNDO.

En el año 2000 se llevo a cabo un estudio con el fin de evaluar la desviación lateral de una estructura para dar cuenta del efecto de las grietas en el concreto. Fueron necesarios procedimientos iterativos para la determinación de la deriva así como también se realizaron ensayos experimentales sobre pórticos de concreto reforzado con el fin de analizar los patrones de agrietamiento. La configuración de las pruebas consiste en la aplicación de carga axial vertical a cada columna y carga lateral aplicada a una velocidad constante en modo de desplazamiento controlado. Se concluyó que los ensayos proporcionan precisión del comportamiento no lineal del concreto debido al agrietamiento bajo cargas de servicio, igualmente se afirma que la reducción de la rigidez debido a las fisuras es un componente dominante que resulta de la respuesta de la estructura [7].

En el 2002, se realizó una investigación en la cual se desarrolló el procedimiento de un modelo físico para el cálculo de los anchos de fisura en la cara lateral de vigas de concreto, así como los parámetros necesarios para el control de grietas variando el recubrimiento del refuerzo. Dicho modelo contempla aspectos tales como el ancho de la fisura y el espaciamiento entre grietas. De acuerdo con los resultados obtenidos para controlar las fisuras en el concreto, el modelo de agrietamiento pone de manifiesto que el espaciamiento y el ancho de la fisura a lo largo de la cara del elemento son funciones de la distancia del refuerzo; por lo tanto, el control de fisuras puede ser alcanzado mediante un recubrimiento considerable, garantizando los parámetros de diseño, y por la limitación de separación de las varillas, la cual depende de la profundidad de la sección. Igualmente se recomienda un tamaño adecuado de refuerzo con el fin de disminuir la aparición de grietas [9].

En 2005 se completó un estudio en el cual se construyeron dos modelos a escala 1:3 de pórticos espaciales con una luz y tres pisos; una de las estructuras constaba únicamente de los elementos vigas y columnas mientras que el otro contaba con un relleno en mampostería de ladrillo en los dos primeros pisos. Ambos pórticos espaciales se pusieron a prueba bajo una excitación equivalente según un espectro definido. De acuerdo con la respuesta de la estructura durante el ensayo se realizaron registros del esfuerzo cortante, la deriva entre pisos y se realizó la evaluación de la rigidez. En el pórtico descubierto se observaron algunas grietas en la parte inferior de las columnas correspondientes a la base mientras que en los otros dos pisos no se observaron fisuras importantes; sin embargo durante excitaciones de mayor intensidad se formaron articulaciones en los extremos de las columnas del primer piso desprendiendo el recubrimiento. Respecto al pórtico con relleno de mampostería se observaron grietas en la parte superior e inferior de las columnas de la planta baja pero en los otros dos pisos no se registraron fisuras importantes, así mismo se observaron fisuras horizontales en las unidades de ladrillo de la planta baja, extendiéndose de forma vertical hacia el segundo piso [15].

CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE FISURACIÓN EN PÓRTICOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A CARGA LATERAL DINÁMICA

En 2006 se realizó una investigación con análisis numérico para la caracterización de los parámetros de fractura del concreto simple. Esta investigación se basó en el experimento de Van Vliet en el cual se probaron especímenes de concreto simple con el objetivo de analizar el efecto de tamaño en la resistencia a tensión, en el cual la geometría de las probetas variaba de acuerdo con una dimensión característica. El análisis numérico incluye la implementación de la aproximación de discontinuidades interiores con el fin de modelar el agrietamiento, así como también se emplearon propiedades elásticas y un modelo de daño definido por la curva de esfuerzo-deformación. De acuerdo con el modelo numérico, las curvas de respuesta reflejan correctamente el comportamiento de la curva experimental en la zona elástica pero no reprodujeron satisfactoriamente el comportamiento en la zona inelástica debido a que las curvas quedaron por debajo de los valores promedio experimentales [8].

En el año 2006 en la Dalian University of Technology, se llevó a cabo un estudio con base en la energía de fractura RILEM, en el cual se introdujeron dos cantidades de energía de fractura, con el fin de predecir el consumo de energía total para los periodos de propagación de fisuras que se generan a partir de pruebas de separación de cuñas en el concreto. Dicho experimento se concibió debido a la necesidad de caracterizar el comportamiento a fractura en procesos de propagación estable e inestable ya que un solo parámetro no es suficiente para diferenciar distintos procesos de propagación de fisuras. De acuerdo con los ensayos realizados se logró concluir que la energía de fractura RILEM solo representa la disipación de energía media para un proceso de propagación de grietas mientras que la energía de fractura estable denota la absorción de energía promedio y la energía de fractura inestable es utilizada para caracterizar el consumo medio de energía [19].

En 2007, en la Nanyang Technological University de Singapur, se llevó a cabo un estudio sobre la fuerza y características de deformación de estructuras de concreto reforzado bajo la acción de cargas cíclicas por medio de un modelo computacional. Se puso a prueba un sistema de pórtico, en forma de H, bajo carga cíclica invertida, la cual fue evaluada en términos de ductilidad de desplazamiento y se analizaron por medio de diferentes métodos con el fin de obtener el comportamiento histerético y las posibles fuerzas que fluyen a través de la unión viga-columna. El modelo fue desarrollado con base en la observación de patrones de agrietamiento, las cuales se generaban y se hacían visibles en cada nivel de ductilidad de desplazamiento. Se concluyó que los modelos analizados son capaces de representar correctamente las articulaciones plásticas y la respuesta histerética de la estructura basándose en la evolución de las fisuras [12].

En el año 2007 la facultad de ingeniería estructural de la Universidad de Sao Paulo, realizó un estudio experimental en conexiones de concreto reforzado bajo comportamiento cíclico en el cual se construyeron modelos típicos de la unión viga-columna. Los especímenes fueron construidos y cargados con el fin de simular los puntos de inflexión

CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE FISURACIÓN EN PÓRTICOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A CARGA LATERAL DINÁMICA

de un edificio aporticado. Las columnas fueron cargadas bajo compresión constante para simular los efectos de carga gravitacional mientras que una carga cíclica es aplicada en el extremo de las vigas. Los resultados incluyen esfuerzo en la unión, deflexiones de la viga, rotación de la columna, así como también una descripción del patrón de agrietamiento. La comparación entre especímenes permite establecer que el incremento de estribos aumenta la capacidad de cortante. Según las fisuras observadas en la estructura se concluyó que el esfuerzo a compresión tiene una gran influencia en el comportamiento de la unión bajo carga cíclica en el nivel de servicio [3].

En el 2008, se propuso un método de diseño alternativo para el control de fisuras a flexión, el cual supera varias de las limitaciones que el código de la ACI 318 propone. El método propuesto tiene en cuenta el desarrollo de grietas en función del tiempo así como el aumento del ancho de las mismas debido a la contracción. Con el fin de verificar las ecuaciones desarrolladas se realizaron ensayos en vigas sujetas a cargas de servicio constantes por un periodo de 400 días, pero con variaciones en parámetros como la relación ancho/altura, el número de varillas de refuerzo, el espaciamiento entre varillas y el recubrimiento de concreto. Según los resultados obtenidos se logró identificar gran semejanza entre el máximo ancho de fisura medido en las probetas y el valor que el método predice. De acuerdo con esto, se concluyó que el procedimiento representa satisfactoriamente características como el ancho y longitud de grietas [10].

CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE FISURACIÓN EN PÓRTICOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A CARGA LATERAL DINÁMICA

4.3 INVESTIGACIÓN EN COLOMBIA.

En el año 2007, se llevó a cabo un estudio experimental en la Pontificia Universidad Javeriana de Bogotá, sobre la resistencia de pórticos de concreto reforzado con polímeros reforzados con fibra de carbono en los nudos.

Dicho estudio consistió en la construcción de cuatro pórticos de concreto a escala 1:2, los cuales, posteriormente fueron sometidos a carga monotónica. El diseño de los pórticos se basó considerando únicamente la carga gravitacional y fueron construidos sin zonas de confinamiento en los nudos. Para el ensayo se reforzaron, en los nudos, dos de los cuatro pórticos con polímeros reforzados con fibra de carbono. También se necesitó de una celda de carga, strain gages tanto en el acero de refuerzo como en las fibras de carbono y deformímetros análogos con el fin de obtener una óptima instrumentación del ensayo.

De acuerdo con los resultados experimentales obtenidos del ensayo, se determinó que en los pórticos reforzados con las fibras disminuyó considerablemente el nivel de fisuración en comparación con las otras probetas. Igualmente, se observó que la falla de la estructura se generó en zonas próximas a la ubicación de las fibras, produciéndose una grieta por flexión en las columnas, mientras que en los nudos hubo ausencia de fisuración, lo que demuestra un adecuado confinamiento de las unión viga-columna.

Con base en las observaciones y los valores numéricos se concluyó que, al confinar los nudos del pórtico con polímeros reforzados con fibra de carbono, se obtiene una notable disminución del agrietamiento. Así mismo, la rehabilitación produce otro esquema de falla, el cual se caracteriza por grietas originadas por flexión en la zona donde termina el refuerzo con fibras.

4.4 REFERENTES INTERNACIONALES.

El reglamento americano para concreto estructural ACI 318 determina algunos requisitos generales referentes al control de agrietamiento.

El desplazamiento de diseño, el cual es un índice del máximo desplazamiento lateral esperado para el sismo de diseño, se debe calcular considerando los efectos de secciones fisuradas. Para cargas repetitivas en elementos sometidos a flexión, debe tenerse en cuenta en el diseño la posibilidad de que se formen fisuras inclinadas debidas a la tracción diagonal. Igualmente, en la etapa de construcción, la espera en la colocación del concreto de elementos apoyados sobre columnas y muros es necesaria para evitar la aparición de fisuras en la interfase de la losa y el elemento de soporte, causado por el

CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE FISURACIÓN EN PÓRTICOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A CARGA LATERAL DINÁMICA

asentamiento y exudación del concreto. Respecto a la rigidez, el reglamento permite cualquier suposición razonable para el comportamiento del elemento; idealmente, la rigidez debe reflejar el grado de fisuración inmediatamente antes de la fluencia del elemento

Así mismo, el reglamento prohíbe el uso de aluminio en concreto estructural, ya que este material reacciona con el concreto y en presencia de iones de cloruro, puede reaccionar electrolíticamente con el acero de refuerzo, provocando problemas de fisuración o descascaramiento del concreto.

Con el fin de controlar más eficientemente las fisuras de cortante inclinadas, la altura general del ensamblaje de pernos debe ser la mayor permisible, la cual corresponde al espesor del elemento menos la suma de los recubrimientos requeridos por las cabezas de los pernos. De la misma manera cuando se coloquen pernos de anclaje en los extremos de las columnas, éstos deben estar circundados por refuerzo lateral, debido a que el confinamiento mejora la transferencia de carga desde los pernos hacia la columna para situaciones en que el concreto se fisura en zonas próximas a los pernos de anclaje. En losas estructurales se requiere refuerzo de retracción y temperatura perpendicular al refuerzo principal con el ánimo de minimizar la fisuración. El mejor control de fisuración se obtiene cuando el refuerzo está bien distribuido en la zona de máxima tracción del concreto. Varias barras con un espaciado moderado son mucho más efectivas para controlar el agrietamiento que una o dos barras de gran diámetro de un área equivalente.

En el reglamento se presentan dos tipos de agrietamiento inclinado en vigas de concreto: agrietamiento por cortante en el alma y agrietamiento de cortante por flexión.

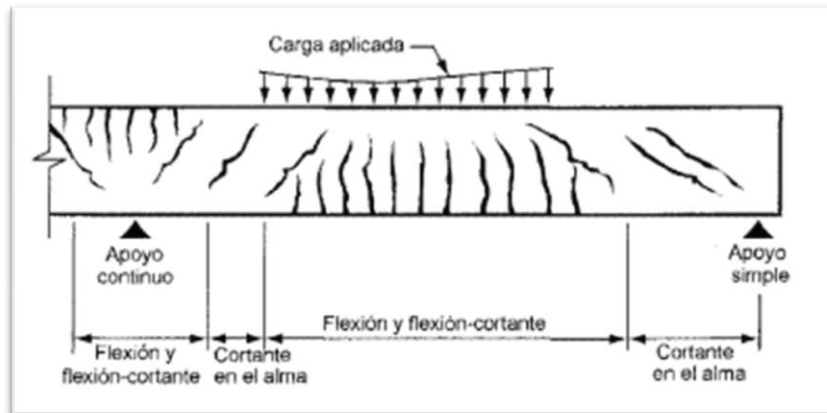


Imagen 4.15. Tipos de agrietamiento en vigas de concreto [2]

CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE FISURACIÓN EN PÓRTICOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A CARGA LATERAL DINÁMICA

El agrietamiento por cortante en el alma empieza en un punto interior del elemento cuando los esfuerzos principales de tracción exceden la resistencia a tracción del concreto. El agrietamiento de flexión-cortante se inicia con un agrietamiento por flexión. Cuando se produce el agrietamiento por flexión, se incrementan los esfuerzos cortantes en el concreto arriba de la fisura. La fisura de flexión-cortante se desarrolla cuando el esfuerzo combinado de cortante y tracción excede la resistencia a la tracción del concreto [2].

Los valores de f_y y f_{yt} usados en el diseño del refuerzo para cortante no deben exceder el valor de 420 Mpa, excepto para refuerzo electrosoldado de alambre corrugado, el cual no debe exceder 550 Mpa. Al limitar los valores de resistencia del refuerzo para cortante se proporciona un control sobre el ancho de fisuración diagonal. Igualmente, el espaciamiento máximo de las barras de refuerzo para cortante perpendicular al refuerzo de tracción por flexión, es de 300 mm porque este acero está dispuesto para restringir el ancho de las fisuras. El refuerzo para cortante restringe la formación de agrietamiento inclinado y, por consiguiente, aumenta la ductilidad y advierte del peligro de falla. De acuerdo con ensayos realizados, se ha observado que la zona del nudo en una conexión viga-columna interior no necesita refuerzo para cortante si dicho nudo se confina en los cuatro lados; sin embargo, los nudos sin confinamiento lateral, necesitan refuerzo para cortante con el fin de prevenir el deterioro debido al agrietamiento por cortante.

Para condiciones de ambiente corrosivo, se debe usar un recubrimiento mayor que el requerido y los esfuerzos de tracción en el concreto se deben reducir con el fin de eliminar posibles problemas de fisuración debidos a las cargas de servicio. En elementos relativamente altos sometidos a flexión debe colocarse algún refuerzo longitudinal cerca de las caras verticales en la zona de tracción con el fin de controlar el agrietamiento en el alma. También se especifican las longitudes de desarrollo óptimas, por la tendencia de las barras sometidas a esfuerzos altos a fisurar el concreto cuando las secciones son relativamente delgadas.

CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE FISURACIÓN EN PÓRTICOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A CARGA LATERAL DINÁMICA

4.5 REFERENCIAS NACIONALES.

La norma colombiana de construcción sismo resistente NSR-10 establece algunas consideraciones generales respecto al control de agrietamiento.

Un parámetro a tener en cuenta es la deriva, ya que al utilizar secciones fisuradas en concreto reforzado, la deriva puede multiplicarse por 0.7 antes de realizar la comparación con el límite de deriva máxima admisible. Igualmente, con el fin de evaluar e intervenir edificaciones existentes, debe hacerse una calificación del estado actual de la estructura basada en aspectos de fisuración debido a cambios de temperatura, asentamientos diferenciales o deflexiones excesivas.

En estructuras de concreto reforzado, el grado de fisuración debe ser compatible con las fuerzas sísmicas del umbral de daño. Al realizar el cálculo de las deflexiones, se debe tomar en consideración los efectos de la fisuración debido a su afectación en la rigidez de la estructura. Además, se debe disponer de cortante por fricción al considerar la transmisión del esfuerzo a través de una fisura existente o potencial.

El refuerzo de losas sometidas a flexión se debe proporcionar para controlar la fisuración por retracción y temperatura. Igualmente, si la dirección del refuerzo varía más de 10° de la dirección de la fuerza principal a tracción, se debe revisar la cantidad de refuerzo respecto a la fisuración a nivel de carga de servicio.

Para la evaluación de la resistencia en estructuras existentes, los elementos ensayados no deben tener fisuras que indiquen la inminencia de una falla por cortante. De la misma manera, se deben evaluar las zonas con fisuras inclinadas cuya proyección horizontal sea mayor que la altura del elemento en el punto medio de la fisura.

La fisuración en el concreto debe ser controlada mediante refuerzo de flexión debidamente distribuido o mediante un control de fisuración equivalente proporcionado mediante refuerzo de confinamiento.

CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE FISURACIÓN EN PÓRTICOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A CARGA LATERAL DINÁMICA

5. DESCRIPCIÓN Y PROCEDIMIENTO DEL MONTAJE

La metodología consistió principalmente en fallar pórticos de concreto reforzado aplicando carga lateral dinámica en la parte superior de la estructura con el fin de registrar valores de longitud y ancho de fisuras en zonas de tensión del pórtico a diferentes intervalos de tiempo bajo la acción de distintas frecuencias.

5.1 PREDIMENSIONAMIENTO Y DISEÑO

Con el fin de determinar las dimensiones de la estructura, se realizó un predimensionamiento por medio de análisis matricial en el cual se estableció la deriva admisible por la NSR, como límite de desplazamiento lateral de la estructura. De esta forma, se empezaron a establecer diferentes valores para la sección transversal, ancho y altura del pórtico hasta lograr cumplir el desplazamiento máximo. De la misma manera, se identificó la fuerza necesaria para la cual la estructura presenta dicho nivel de deformación con las dimensiones establecidas.

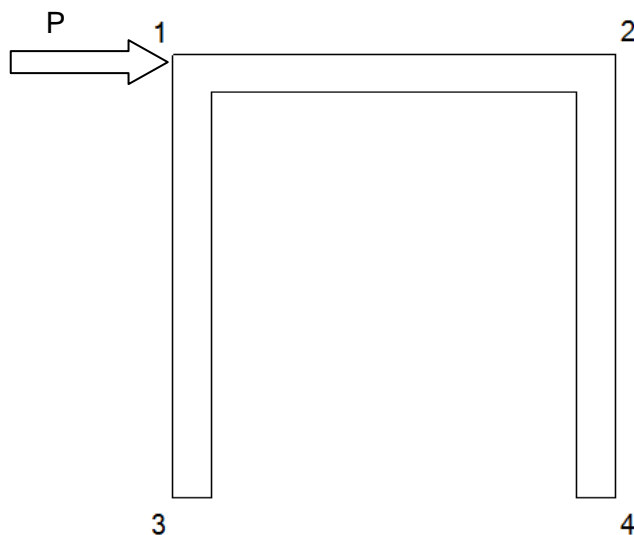


Imagen 5.1. Esquema representativo de aplicación de carga

CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE FISURACIÓN EN PÓRTICOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A CARGA LATERAL DINÁMICA

VIGA	bv	0.13	m	COLUMNA	bv	0.13	m
	hv	0.13	m		hv	0.13	m
	A	0.0169	m ²		A	0.0169	m ²
	E	21000000	N/m ²		E	21000000	N/m ²
	I	2.38E-05	m ⁴		I	2.38E-05	m ⁴
	L	1.5	m		L	1.5	m

Tabla 5-1. Propiedades de viga y columnas

U1	3.7	Ton
FUERZAS		

U1	0.0150	m
V1	0.0001	m
θ1	-0.0061	rad
U2	0.0149	m
V2	-0.0001	m
θ2	-0.0060	rad
DESPLAZAMIENTOS		

Tabla 5-2. Fuerza y desplazamientos de diseño mediante análisis matricial

Con el fin de aplicar correctamente la carga lateral, se optó por incluir una ménsula en la parte superior de la estructura. La manera para poder aplicar la carga con base en la geometría del actuador dinámico, determinó las dimensiones de la ménsula, la cual también se diseñó para garantizar resistencia al corte en el momento de la aplicación de la carga de tal forma que no afecte la ejecución y resultados de los ensayos.

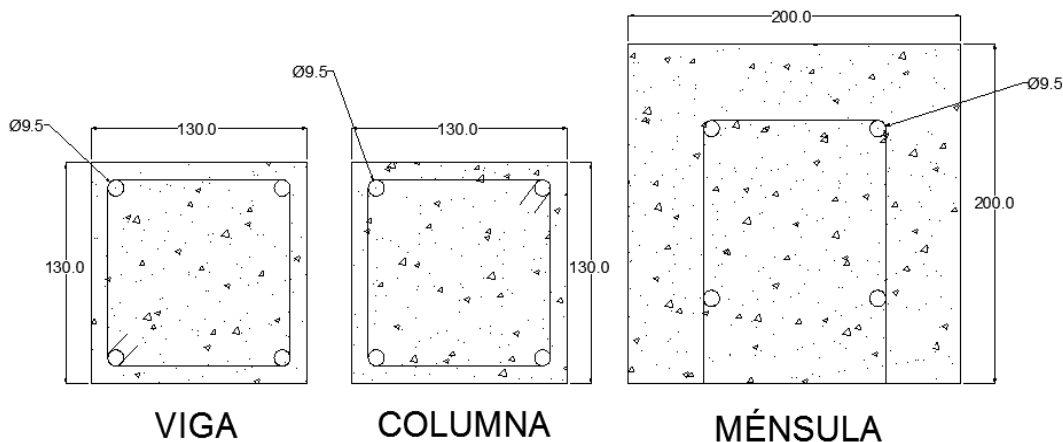


Imagen 5.2. Sección transversal de elementos (mm)

CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE FISURACIÓN EN PÓRTICOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A CARGA LATERAL DINÁMICA

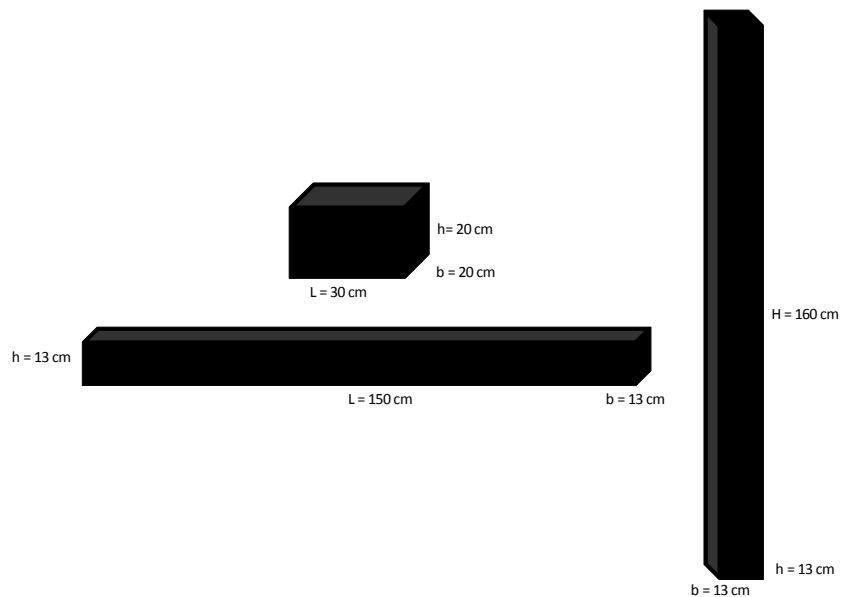


Imagen 5.3. Dimensiones de elementos

De acuerdo con las dimensiones anteriores se determina la cantidad necesaria de concreto para el proyecto. Para la obtención del concreto, se hicieron contactos con la empresa Holcim S.A con el ánimo de ofrecer, generosamente, una participación activa en el desarrollo de la investigación, para lo cual, finalmente se logró que la empresa Holcim S.A donará el concreto necesario para poder realizar el estudio de la caracterización geométrica de fisuras.

CANTIDAD TOTAL CONCRETO				
<i>Item</i>	<i>Un</i>	<i>Cantidad Unitaria</i>	<i>Unidad</i>	<i>Cantidad Total</i>
Volumen Portico	m ³	0.0914	3	0.2743
Volumen Cilindro	m ³	0.0053	18	0.0954
Volumen Desperdicio	m ³			0.0185
Total				0.3882

Tabla 5-3. Cantidad total de concreto para el proyecto

Una vez definidas las dimensiones de la sección transversal de la estructura, longitud de viga y altura de columna se procedió a realizar el diseño a flexión y a cortante. Para ello se elaboró el modelo en el programa SAP 2000 con el fin de determinar el momento y el esfuerzo cortante en los elementos.

CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE FISURACIÓN EN PÓRTICOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A CARGA LATERAL DINÁMICA

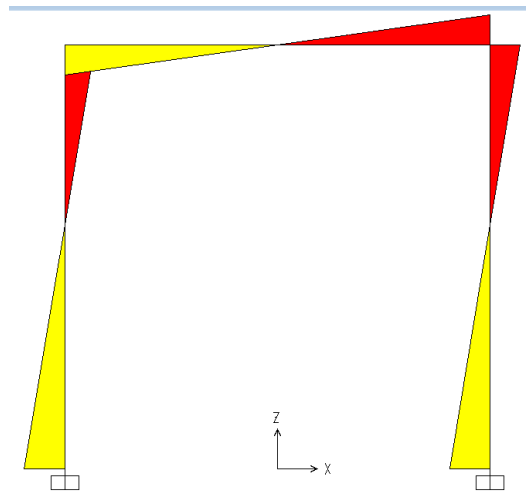


Imagen 5.4. Zonas de tensión en el pórtico

Finalmente se decidió colocar refuerzo longitudinal a flexión con varillas N° 3 (3/8") tanto en las columnas como en la viga. Del mismo modo se optó por un refuerzo transversal a cortante con flejes N° 2 (1/4") separados una distancia de 6 cm en la zona no confinada y en la zona confinada con separación de 3 cm.

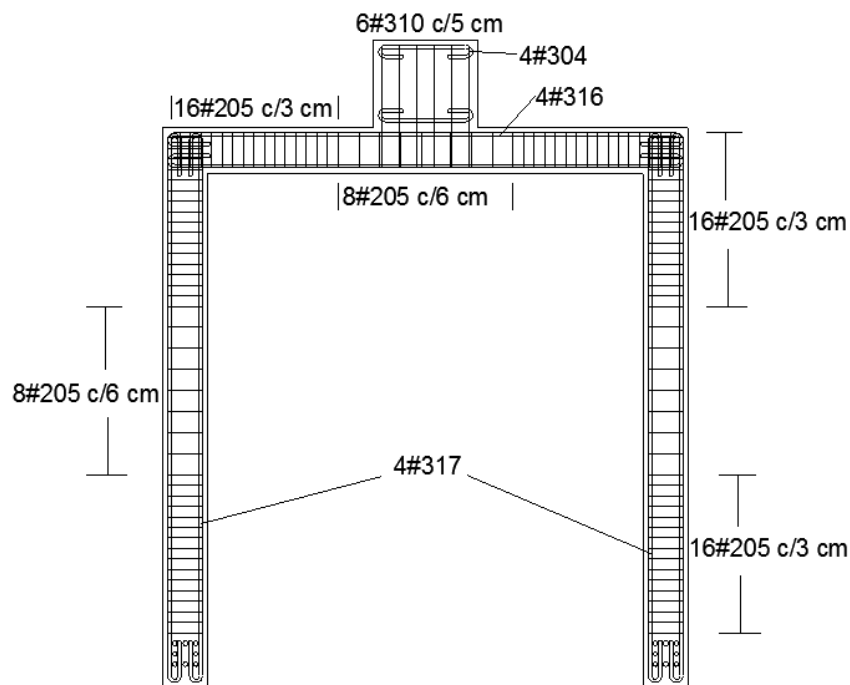


Imagen 5.5. Despiece de acero de refuerzo

CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE FISURACIÓN EN PÓRTICOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A CARGA LATERAL DINÁMICA

5.2 SISTEMA DE APOYOS

El sistema de apoyos se diseñó con el fin de garantizar el empotramiento en la base, es decir, que exista restricción para el desplazamiento horizontal, desplazamiento vertical y giro de la columna.

El sistema consiste básicamente en dos platinas de acero con espesor de $1/2''$, a las cuales se les realizaron 8 perforaciones con el fin de cruzar, a través de las columnas, pernos de acero de 14 mm de diámetro. Dichas platinas, están unidas por medio de soldadura a una platina horizontal de igual espesor, que a su vez, se une a una platina inferior por medio de varillas roscadas de $5/8''$. Los pernos que se utilizaron fueron tipo brístol con el objeto de hacer más fácil la instalación de los apoyos. Cabe mencionar que los pasadores obedecen a un diseño previo para evitar que el apoyo presente falla por cortante. El sistema de apoyos se ilustra en la imagen 5.6.

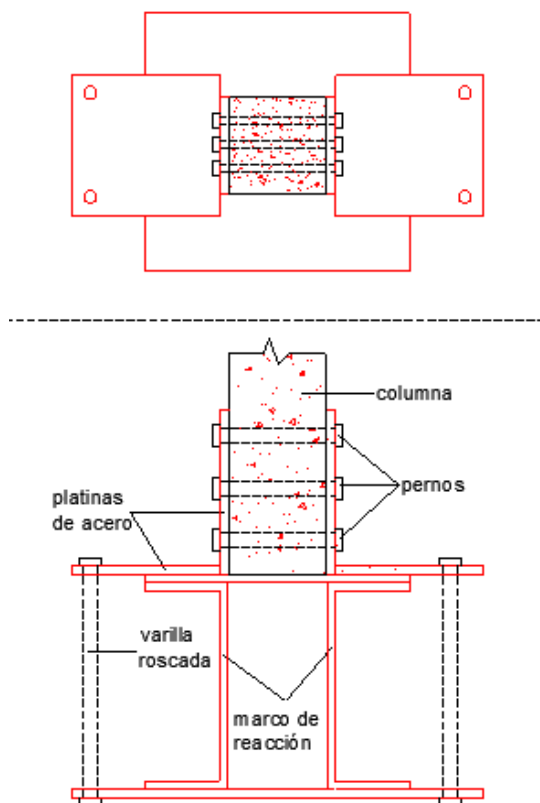


Imagen 5.6. Esquema representativo del sistema de apoyos

CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE FISURACIÓN EN PÓRTICOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A CARGA LATERAL DINÁMICA



Imagen 5.7. Platinas del sistema de apoyos

De acuerdo con las dimensiones de los elementos y a la descripción del sistema de apoyos, en la imagen 5.8 se ilustra el montaje general del ensayo.

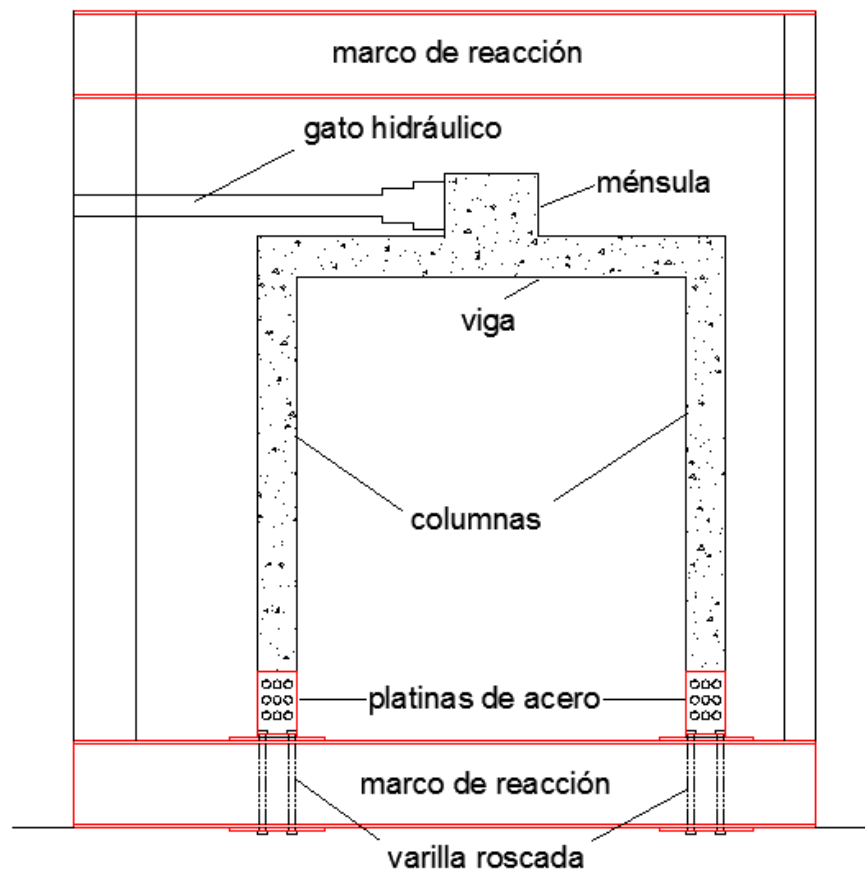


Imagen 5.8. Esquema representativo del ensayo

CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE FISURACIÓN EN PÓRTICOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A CARGA LATERAL DINÁMICA

5.3 CONSTRUCCION DE PORTICOS

Para la construcción de los pórticos fue necesaria la elaboración de una formaleta en madera, la cual fue hecha a medida exacta según las dimensiones previas obtenidas en el diseño de la estructura. A la formaleta se le aplicó, en su parte interior, ACPM con el fin de garantizar un correcto desencofrado y evitar el deterioro de la madera.

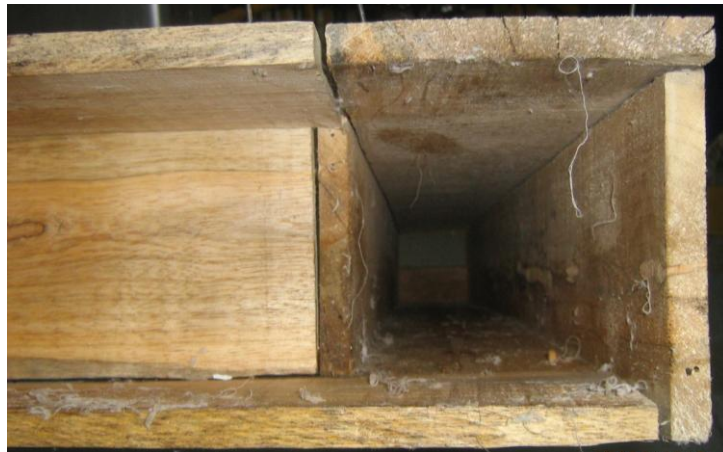


Imagen 5.9. Vista interior de la formaleta de madera

Como se había mencionado anteriormente, el refuerzo de acero consiste en varillas de 3/8" para el refuerzo longitudinal y flejes de 1/4" para el refuerzo transversal. El amarre del acero de refuerzo se realizó con alambre negro y fue necesaria la colaboración de personal con experiencia para dicho trabajo debido a la complejidad en la ubicación de los flejes ya que exigía espaciamientos cortos, de acuerdo con los detalles de norma.

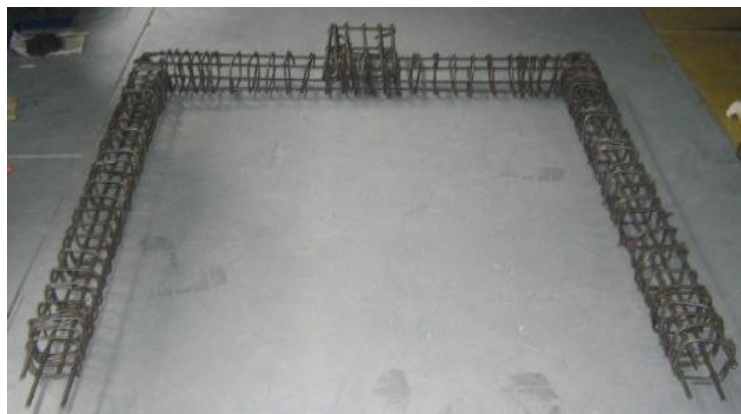


Imagen 5.10. Amarre del acero de refuerzo

CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE FISURACIÓN EN PÓRTICOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A CARGA LATERAL DINÁMICA

Luego de tener lista la armadura de la estructura, se procede a introducir cuidadosamente la canastilla de acero dentro de la formaleta previamente construida. En la imagen 5.11 se ilustra la forma en que se introdujo la canastilla de acero dentro de la formaleta.



Imagen 5.11. Canasta de acero dentro de la formaleta

Una vez lista la formaleta con el acero de refuerzo en el interior, se procede a levantar la estructura y a verificar que la estructura haya quedado a nivel y bien plomada. Finalmente, se introducen los pernos de acero en las perforaciones hechas previamente en la formaleta con el fin de obtener, una vez fundido el pórtico, los orificios que forman parte del sistema de apoyos descrito anteriormente.



Imagen 5.12. Estructura plomada y nivelada

CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE FISURACIÓN EN PÓRTICOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A CARGA LATERAL DINÁMICA

Después de tener lista la formaleta con la respectiva armadura de acero se procede a realizar la conformación física del pórtico; para esto se transportó el concreto, desde la planta de Holcim en Puente Aranda. Para fundir los pórticos fue necesaria la colaboración de personal calificado para dicha labor.

En la imagen 5.13 se observa el vaciado de concreto en una de las columnas; para este procedimiento se utilizó una varilla con el fin de distribuir uniformemente el concreto en la formaleta y así evitar hormigueros una vez fraguado el concreto.



Imagen 5.13. Proceso de fundición del pórtico

En la imagen 5.14 se observa el proceso de vibrado, el cual se realizó con chipote, para reducir los vacíos que pudieran haber quedado después del vaciado de concreto en la viga.



Imagen 5.14. Vibrado con chipote

CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE FISURACIÓN EN PÓRTICOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A CARGA LATERAL DINÁMICA

Finalmente, se desencofra cuidadosamente la formaleta y se procede a la protección con plástico de alta densidad y rocío de agua todos los días, a fin de poder garantizar el curado de la estructura. .



Imagen 5.15. Desencofrado del pórtico



Imagen 5.16. Proceso de curado

CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE FISURACIÓN EN PÓRTICOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A CARGA LATERAL DINÁMICA

5.4 MONTAJE EN EL MARCO DE REACCIÓN

El montaje consiste básicamente en la ubicación de las probetas en el actuador dinámico MTS, del laboratorio de pruebas y ensayos de la Pontificia Universidad Javeriana, con el fin de fallarlas bajo la acción de carga lateral dinámica y estática.



Imagen 5.17. Actuador dinámico MTS

Debido al considerable peso de la estructura, fue necesario el uso de la diferencial con el fin de facilitar la ubicación del pórtico en el marco de reacción. Igualmente, se colocaron platinas de acero como base para poder soportar el peso de la probeta.



Imagen 5.18. Ubicación del pórtico en el marco de reacción

CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE FISURACIÓN EN PÓRTICOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A CARGA LATERAL DINÁMICA

Luego de ubicar el pórtico en el lugar de ensayo se procede a instalar las platinas de anclaje de acuerdo con el diseño descrito anteriormente para el sistema de apoyos.



Imagen 5.19. Montaje del sistema de apoyos

Finalmente, por medio de varillas roscadas, se une el gato hidráulico a la ménsula de la estructura con el fin de facilitar la aplicación de la carga. De la misma manera, se colocó una platina de acero con las mismas perforaciones del gato hidráulico para obtener una mejor distribución de la carga y evitar concentración de esfuerzos en las zonas próximas a las perforaciones de la ménsula.



Imagen 5.20. Unión gato hidráulico - ménsula

CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE FISURACIÓN EN PÓRTICOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A CARGA LATERAL DINÁMICA



Imagen 5.21. Vista general del montaje

CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE FISURACIÓN EN PÓRTICOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A CARGA LATERAL DINÁMICA

6. DESARROLLO EXPERIMENTAL DE FRACTURA Y OBTENCIÓN DE PARÁMETROS GEOMÉTRICOS DE FISURACIÓN

El procedimiento consiste principalmente en fallar los pórticos de concreto reforzado aplicando carga lateral dinámica en la parte superior de la estructura con el fin de registrar el área de afectación y la propagación de las fisuras en las zonas de tensión bajo la acción de diferentes frecuencias. Finalmente, se aplica carga lateral estática para medir ancho y longitud de fisuras.

6.1 DESGASTE DINÁMICO

El primer ensayo a ejecutar es el desgaste dinámico, el cual consiste en la aplicación de carga lateral dinámica a frecuencias variables. Este ensayo se realizó por control de desplazamiento bajo diferentes porcentajes de la deriva máxima admisible. De acuerdo con lo anterior, se seleccionaron valores de 5, 10, 20, 30, 40, 60, 80 y 100% de la deriva máxima, es decir, que para el 5% de la deriva máxima, el actuador tiene un desplazamiento de 0.75 mm; así hasta llegar a un desplazamiento de 15 mm, el cual corresponde al valor de la deriva máxima admisible.

De la misma manera se seleccionaron 3 frecuencias de movimiento, que corresponden a 0.25, 1 y 4 Hz. Dichas frecuencias se aplicaron para cada uno de los desplazamientos anteriores, excepto la frecuencia de 4 Hz, que debido a su magnitud solo se aplicó hasta un desplazamiento de 4.5 mm.

El procedimiento general del ensayo de desgaste dinámico se describe mejor de acuerdo con la tabla 6.1.

CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE FISURACIÓN EN PÓRTICOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A CARGA LATERAL DINÁMICA

DESPLAZAMIENTO (mm)	FRECUENCIA (Hz)
0.75	0.25
	1
	4
1.5	0.25
	1
	4
3	0.25
	1
	4
4.5	0.25
	1
	4
6	0.25
	1
9	0.25
	1
12	0.25
	1
15	0.25
	1

Tabla 6-1. Procedimiento del desgaste dinámico

Cada vez que la estructura era sometida a un desplazamiento bajo cierta frecuencia se detallaba la propagación de las fisuras llevando registro del avance de cada una de las mismas. Dicho registro se realizó señalando inicialmente las cabezas de fisuras y su avance bajo cada intervalo de frecuencia y desplazamiento.

6.2 DEGRADACION POR FRACTURA (“PUSHOVER”)

El ensayo de “pushover” es un procedimiento estático en el cual la magnitud de las fuerzas laterales se incrementa gradualmente. Sin embargo, en este caso se realizó el ensayo de “pushover” por control de desplazamiento, para el cual se definieron desplazamientos de 3, 6, 9, 12 y 15 mm que corresponde al valor de deriva máxima admisible.

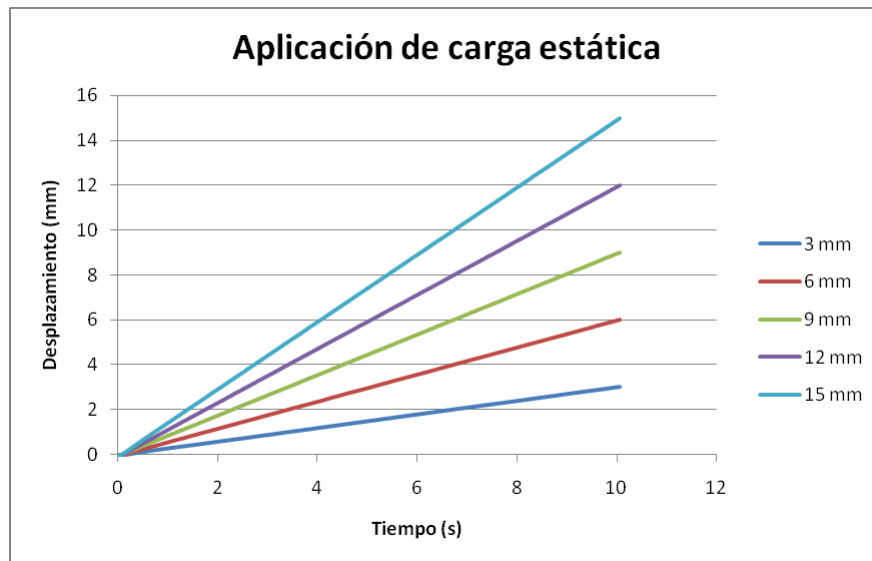
Básicamente, el procedimiento general del ensayo consiste en la aplicación de carga lateral estática con base en los desplazamientos anteriormente definidos. En cada intervalo de aplicación de carga bajo diferentes desplazamientos se realizaron mediciones del espesor de las fisuras, así como también se registró la máxima carga necesaria para cubrir dicho desplazamiento. Para la medición del espesor de las fisuras se escogieron las zonas de los nudos de la estructura.

CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE FISURACIÓN EN PÓRTICOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A CARGA LATERAL DINÁMICA

El procedimiento del ensayo de “pushover” se ilustra mejor de acuerdo con la siguiente tabla:

DESPLAZAMIENTO (mm)	ESPESOR FISURA (mm)	
	NUDO 1	NUDO 2
3	-	-
6	-	-
9	-	-
12	-	-
15	-	-

Tabla 6-2. Procedimiento del ensayo de pushover



Gráfica 6-1. Procedimiento del ensayo de pushover

De la misma manera, para cada intervalo de aplicación de carga, se registró la carga resistida por la estructura para cada nivel de desplazamiento.

CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE FISURACIÓN EN PÓRTICOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A CARGA LATERAL DINÁMICA

7. ESTUDIO DE RESISTENCIA DEL CONCRETO Y ACERO

Con el fin de establecer el comportamiento mecánico de los materiales empleados se realizó el ensayo de resistencia a la compresión del concreto y el ensayo de resistencia a la tensión en las varillas de acero.

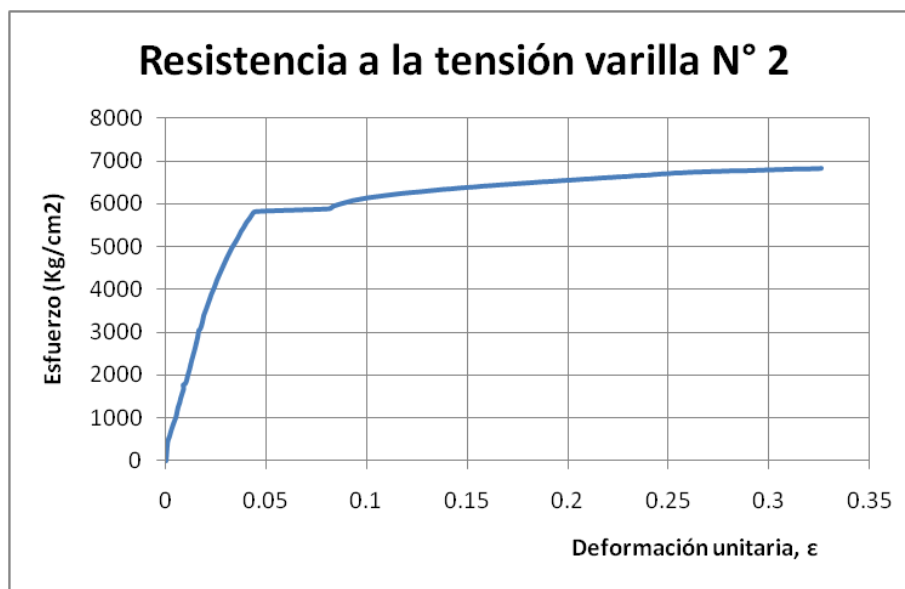
7.1 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CILINDROS DE CONCRETO

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (Kg/cm ²)			
	7 DIAS	14 DIAS	28 DIAS
Concreto 210 Kg/cm ²			294,82
Concreto 210 Kg/cm ²	200,25	234,06	325,00

Tabla 7-1. Resistencia a la compresión del concreto [11]

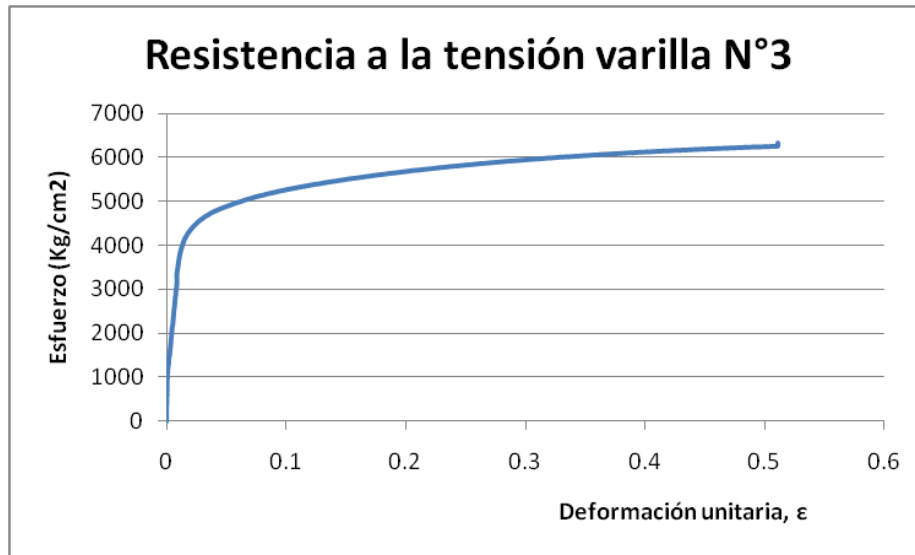
Según los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia a la compresión en cilindros de concreto se puede afirmar que el concreto utilizado en la construcción de los pórticos cumple con los requisitos de resistencia.

7.2 RESISTENCIA A LA TENSIÓN EN VARILLAS CORRUGADAS DE ACERO



Gráfica 7-1. Esfuerzo vs Deformación varilla N° 2

CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE FISURACIÓN EN PÓRTICOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A CARGA LATERAL DINÁMICA



Gráfica 7-2. Esfuerzo vs Deformación varilla N° 3

CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE FISURACIÓN EN PÓRTICOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A CARGA LATERAL DINÁMICA

8. ANÁLISIS DE RESULTADOS

8.1 COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA DE APOYOS

Se realizó un análisis de la estructura con un comportamiento de apoyos articulados.

Por tal motivo se revisó el cálculo de la fuerza necesaria, por medio de análisis matricial, con el fin de obtener un desplazamiento equivalente a la deriva máxima admisible que establece la norma sismo resistente. Dicho análisis se revisó teniendo en cuenta la condición de giro que se presentó en la estructura. En la siguiente tabla se observan los desplazamientos de la estructura al ser sometida a la nueva carga de diseño.

U1	0.8	Ton
FUERZAS		

U1	1.36E-02	m
V1	3.38E-05	m
θ_1	-3.05E-03	rad
U2	1.36E-02	m
V2	-3.38E-05	m
θ_2	-3.04E-03	rad
θ_3	-0.012056225	rad
θ_4	-0.012042705	rad
DESPLAZAMIENTOS		

Tabla 8-1. Fuerza y desplazamientos de diseño revisados

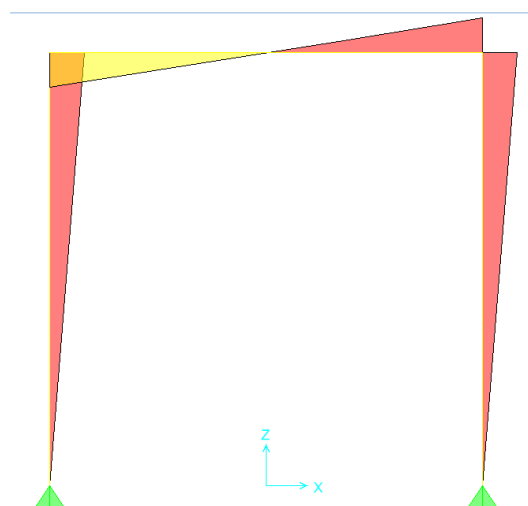


Imagen 8.1. Zonas de tensión bajo nueva carga de diseño

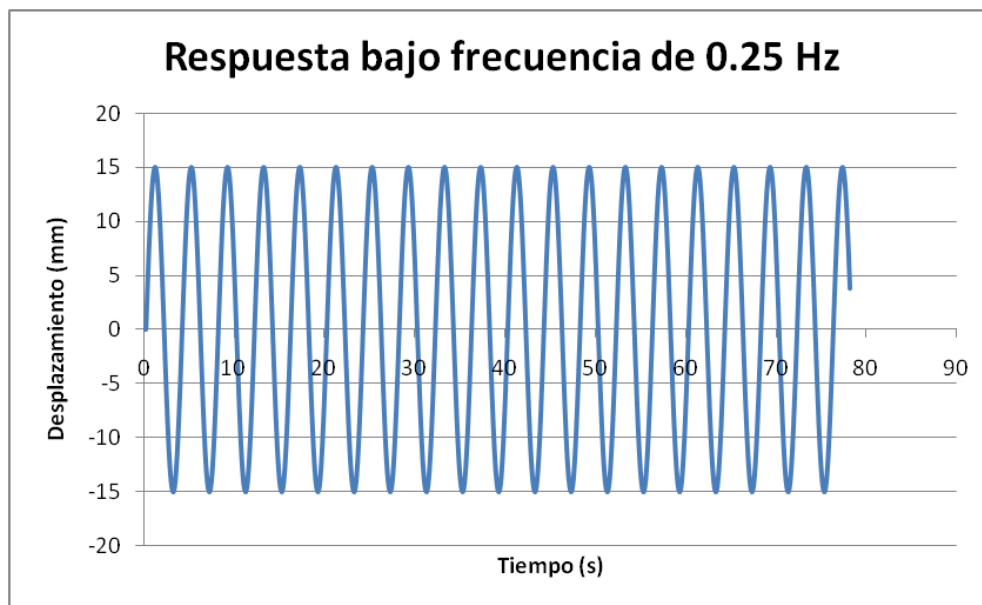
CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE FISURACIÓN EN PÓRTICOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A CARGA LATERAL DINÁMICA

De acuerdo con el diagrama de momentos obtenido bajo la acción de la nueva carga de diseño de 0.8 ton, se determina un cambio en las zonas de tensión previamente identificadas con las condiciones de apoyo empotrado.

Como consecuencia del cambio de condiciones en el sistema de apoyos, se establece que el daño que se presenta en la estructura se concentra en los nudos, obteniendo así fisuras más notables en la unión viga-columna.

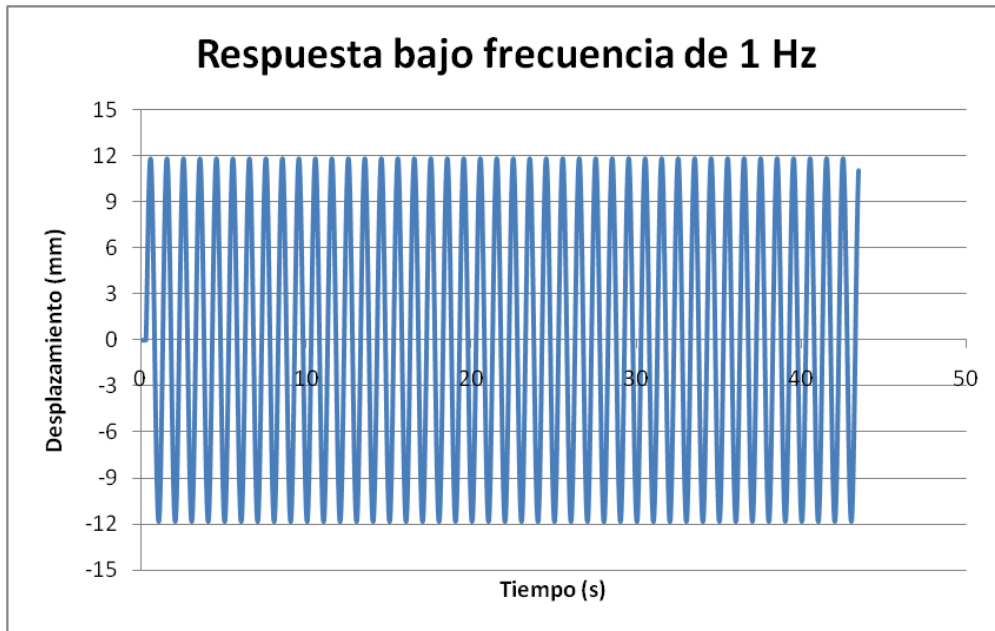
8.2 DESGASTE DINÁMICO (PRE-CARGA)

De acuerdo con la descripción de la primera parte del ensayo, que corresponde a una precarga de desgaste dinámico por control de desplazamiento a continuación se presenta de manera gráfica el procedimiento del ensayo en gráficas de desplazamiento vs tiempo en la cual se vio reflejada la acción de la carga dinámica bajo las diferentes frecuencias.

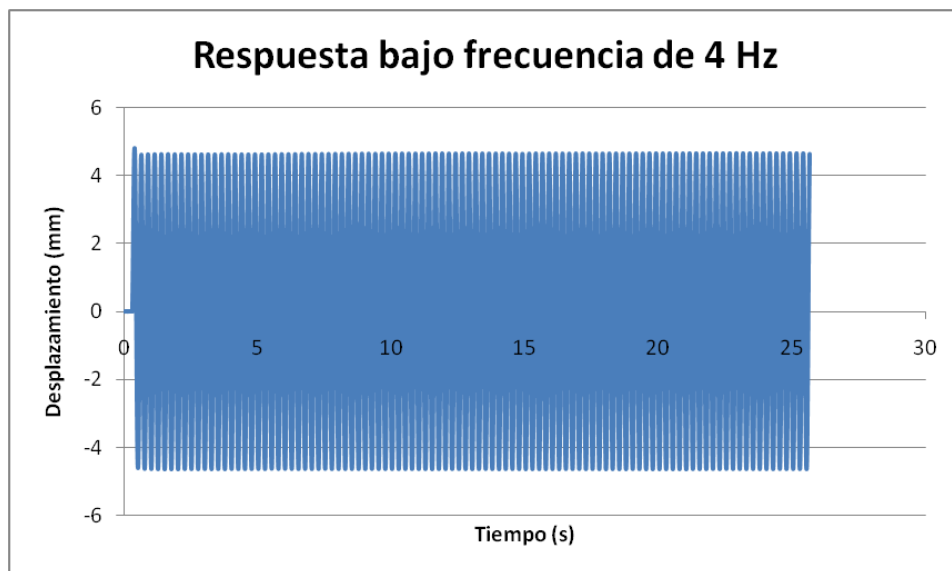


Gráfica 8-1. Deflexión del pórtico bajo frecuencia de 0.25 Hz

CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE FISURACIÓN EN PÓRTICOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A CARGA LATERAL DINÁMICA



Gráfica 8-2. Deflexión del pórtico bajo frecuencia de 1 Hz



Gráfica 8-3. Deflexión del pórtico bajo frecuencia de 4 Hz

CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE FISURACIÓN EN PÓRTICOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A CARGA LATERAL DINÁMICA

En la tabla 8.2 se presentan los diferentes pasos de carga con sus respectivas frecuencias y desplazamientos.

Paso	Desplazamiento (mm)	Frecuencia (Hz)
0	0.75	0.25
1		1
2		4
3	1.5	0.25
4		1
5		4
6	3	0.25
7		1
8		4
9	4.5	0.25
10		1
11		4
12	6	0.25
13		1
14		4
15	9	0.25
16		1
17	12	0.25
18		1
19	15	0.25
20		1

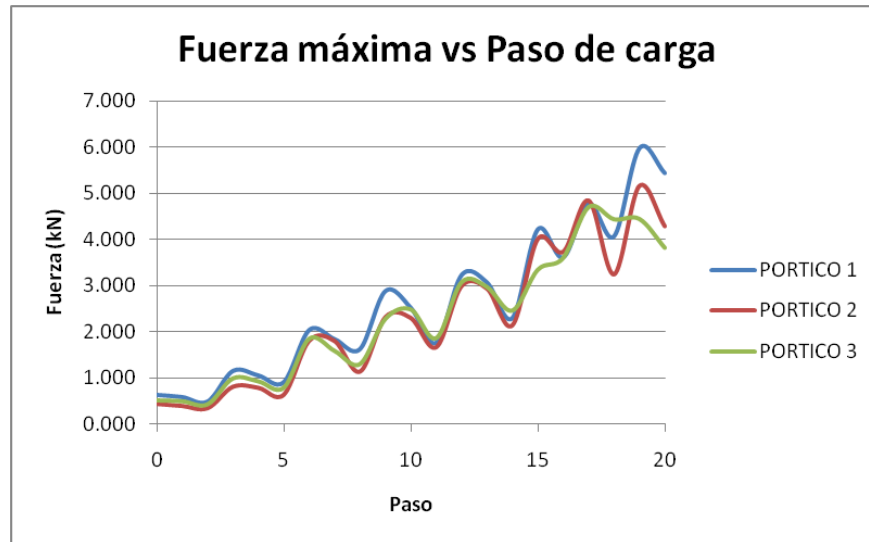
Tabla 8-2. Descripción de los pasos de carga

En la tabla 8.3 se presenta un registro de la fuerza máxima necesaria, en cada paso de carga, para lograr desplazar la estructura la distancia especificada. De la misma manera en la gráfica 8.4 se observa el avance de la fuerza máxima para cada paso de carga.

	P 1	P 2	P 3
Paso	P _{máx} (kN)	P _{máx} (kN)	P _{máx} (kN)
0	0.635	0.440	0.520
1	0.587	0.395	0.503
2	0.489	0.346	0.435
3	1.155	0.810	0.997
4	1.057	0.786	0.933
5	0.911	0.638	0.796
6	2.041	1.805	1.853
7	1.844	1.799	1.592
8	1.628	1.138	1.308
9	2.886	2.313	2.285
10	2.526	2.299	2.488
11	1.766	1.665	1.867
12	3.234	2.988	3.078
13	3.072	2.930	2.973
14	2.302	2.139	2.465
15	4.225	4.005	3.347
16	3.618	3.727	3.605
17	4.783	4.838	4.701
18	4.073	3.240	4.439
19	5.984	5.152	4.447
20	5.447	4.280	3.823

Tabla 8-3. Fuerza máxima en cada paso de carga

CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE FISURACIÓN EN PÓRTICOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A CARGA LATERAL DINÁMICA



Gráfica 8-4. Fuerza máxima en cada paso de carga

De acuerdo con la tabla y con la gráfica que relaciona la fuerza máxima para cada paso de carga, se observa que, para un mismo nivel de desplazamiento lateral se necesita mayor fuerza para una frecuencia de menor intensidad que otra. Igualmente, como es de suponer, a medida que el desplazamiento se incrementa la fuerza hace lo mismo pero esta decrece cuando la frecuencia se intensifica.

También, se puede observar que los tres pórticos presentan un comportamiento semejante frente a la acción de las diferentes frecuencias y niveles de desplazamiento.

8.2.1 Propagación de fisuras y área de afectación

Debido a la acción de la carga lateral dinámica, se observó que la estructura presentaba fisuras visibles en los diferentes pasos de carga.

Con el fin de determinar los pasos de carga en los que existían niveles de fisuración, se realizaron marcaciones de las cabezas de fisuras una vez finalizado cada paso. La metodología consistía básicamente en marcar el inicio de la fisura, así como el punto hasta que la misma se hacía visible. En cada aparición de fisuras se registraba el paso de carga en el cual se había generado, marcando el desplazamiento y la frecuencia correspondiente. Finalmente, se realizó el registro fotográfico, en el cual quedó cubierto el avance de las fisuras en los diferentes pasos de carga.

CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE FISURACIÓN EN PÓRTICOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A CARGA LATERAL DINÁMICA

A continuación se presentan las imágenes de las fisuras generadas en cada uno de los pórticos en estudio.

PÓRTICO 1



Imagen 8.2. Fisuras generadas en el nudo 1



Imagen 8.3. Fisuras generadas en el nudo 2

CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE FISURACIÓN EN PÓRTICOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A CARGA LATERAL DINÁMICA



Imagen 8.4. Unión de fisuras en la columna

PÓRTICO 2



Imagen 8.5. Fisuras generadas en el nudo 1

CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE FISURACIÓN EN PÓRTICOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A CARGA LATERAL DINÁMICA

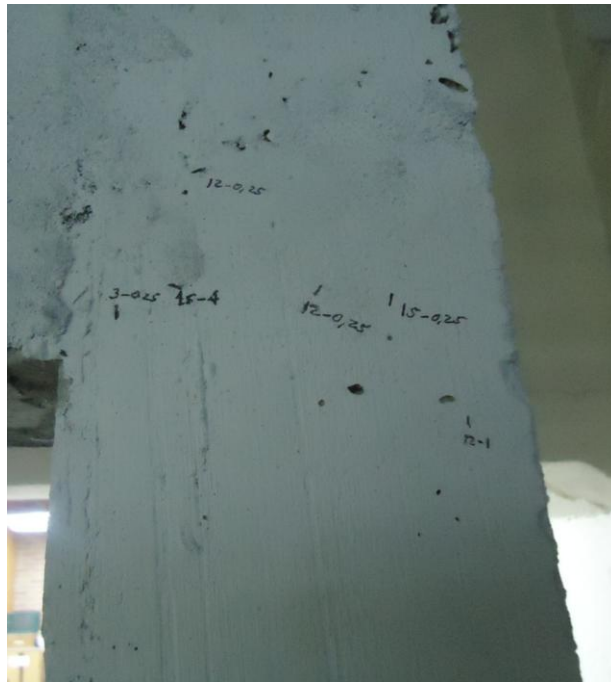


Imagen 8.6. Fisuras generadas en el nudo 2



Imagen 8.7. Unión de fisuras en la columna

CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE FISURACIÓN EN PÓRTICOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A CARGA LATERAL DINÁMICA

PÓRTICO 3



Imagen 8.8. Fisuras generadas en el nudo 1

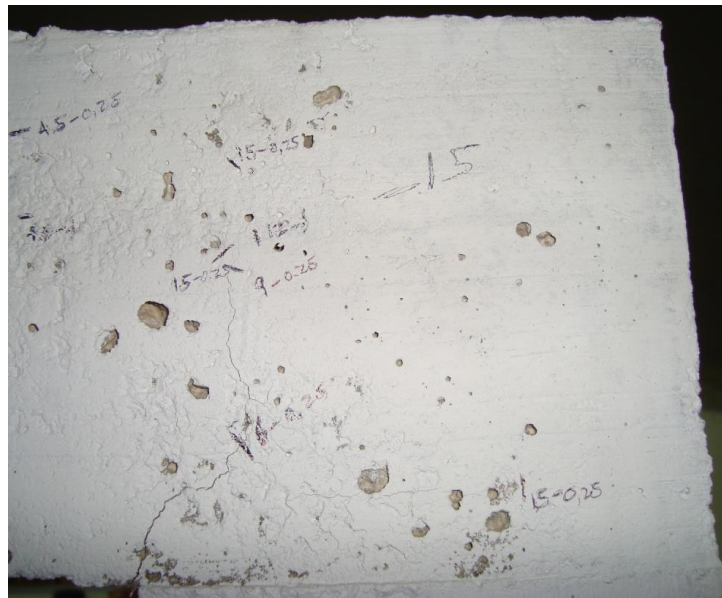


Imagen 8.9. Fisuras generadas en el nudo 2

CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE FISURACIÓN EN PÓRTICOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A CARGA LATERAL DINÁMICA



Imagen 8.10. Unión de fisuras en la columna

De acuerdo con las imágenes anteriores, se puede observar que en todos los pórticos se presenta un tipo de fisuración general caracterizada principalmente por su propagación en forma diagonal. A partir de esta fisura se puede observar que se desprenden, inicialmente, dos ramas, las cuales luego de sufrir otras ramificaciones llegan al borde exterior de la columna formando, junto con las fisuras originadas en la parte posterior, uniones de fisuras en la cara derecha de la columna como se observa en las imágenes 8.4, 8.7 y 8.10

Con el fin de determinar la longitud de avance de las fisuras en cada paso de carga se utilizó un método gráfico aproximado de determinación del avance de fisura con respecto a los tiempos controlados del ensayo. Dicho método consistió en importar la imagen en AutoCad y escalarla de acuerdo con la distancia conocida que en este caso era las dimensiones de los elementos. Una vez escalada la imagen se trazan líneas sobre la fisura y de esta manera se conoce la longitud real de la fisura en cada paso de carga.

Las fotos se tomaron lo más perpendiculares posibles al plano de fisuración para poder garantizar una proyección en longitud verdadera de la fisura. En las imágenes 8.11, 8.12 y 8.13 se ilustran la forma en que se determinó la longitud de las fisuras en AutoCad.

CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE FISURACIÓN EN PÓRTICOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A CARGA LATERAL DINÁMICA

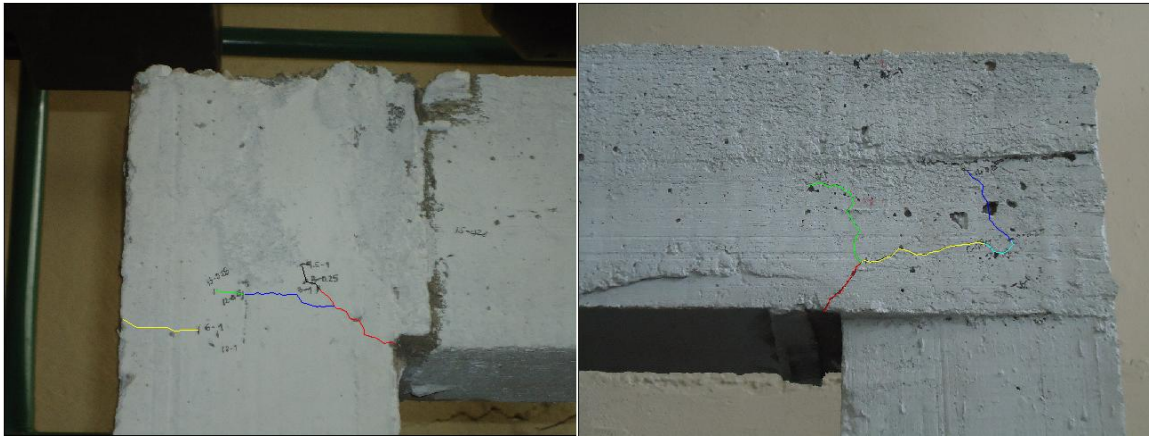


Imagen 8.11. Determinación de la longitud de fisuras para el pórtico 1



Imagen 8.12. Determinación de la longitud de fisuras para el pórtico 2

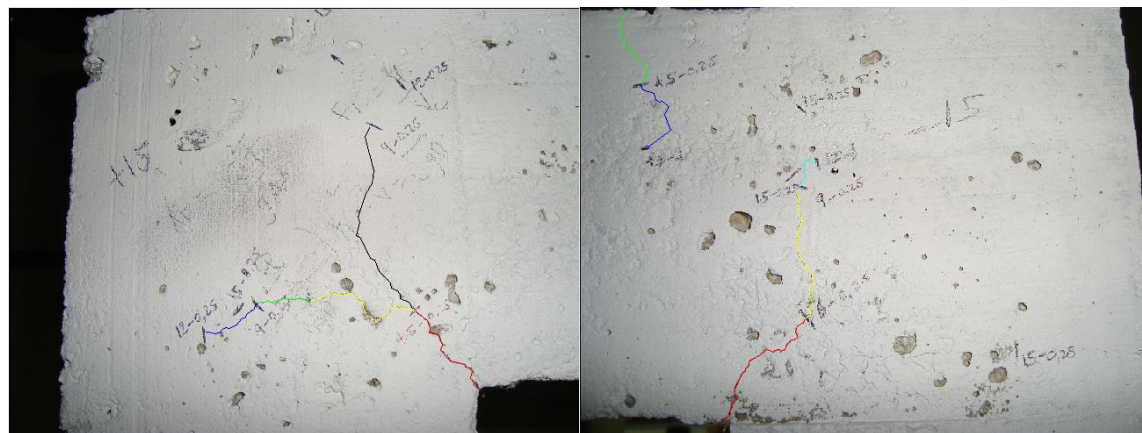


Imagen 8.13. Determinación de la longitud de fisuras para el pórtico 3

CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE FISURACIÓN EN PÓRTICOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A CARGA LATERAL DINÁMICA

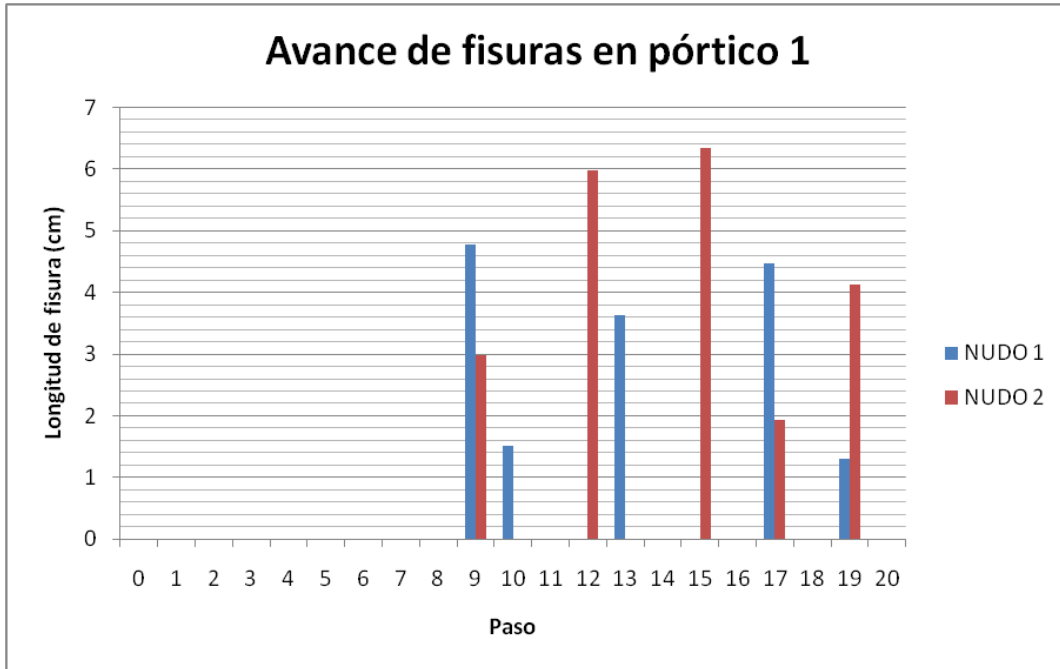
Con base en el procedimiento realizado en AutoCad se puede corroborar la tipología de las fisuras, las cuales aparecen inicialmente en la esquina inferior del nudo y a medida que se ejecuta otro paso de carga, ésta avanza en forma diagonal hacia arriba, para que finalmente, en los últimos pasos de carga se ramifique y por ende termine en la unión de diferentes fisuras.

Igualmente, se determinó la velocidad de propagación, haciendo la relación entre la longitud de avance de la fisura en cada paso de carga y la duración del intervalo de aplicación de la carga.

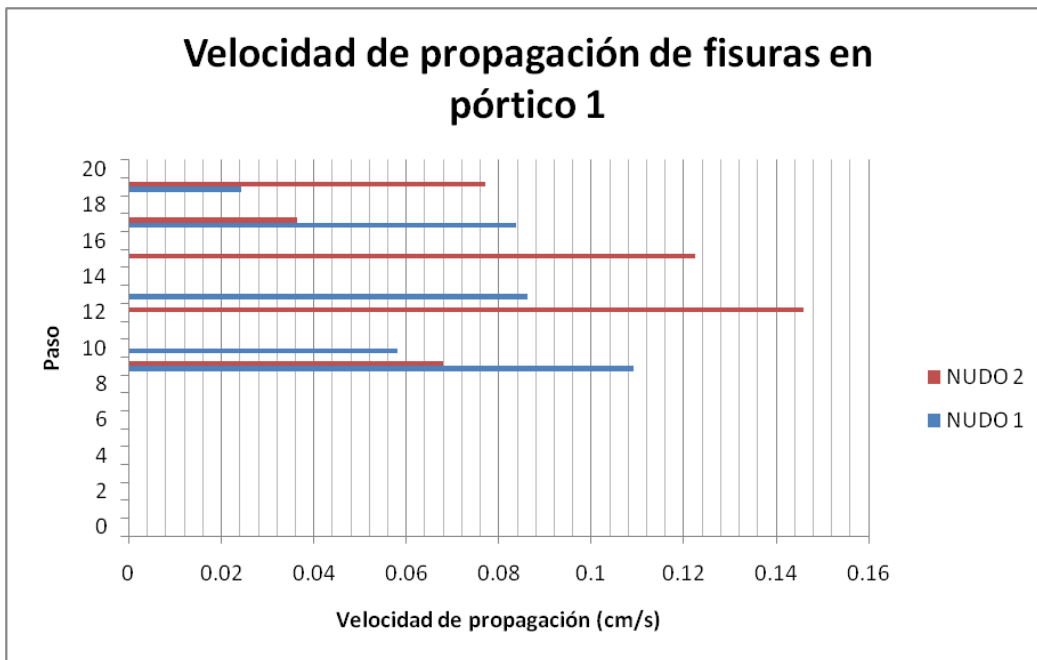
Paso	PORTICO 1			NUDO 1			NUDO 2		
	Desplazamiento (mm)	Frecuencia (Hz)	Duración (seg)	Avance de fisura (cm)	Distancia Acumulada (cm)	Velocidad de propagacion (cm/s)	Avance de fisura (cm)	Distancia Acumulada (cm)	Velocidad de propagacion (cm/s)
0	0.75	0.25	-	-	-	-	-	-	-
1		1	-	-	-	-	-	-	-
2		4	-	-	-	-	-	-	-
3	1.5	0.25	-	-	-	-	-	-	-
4		1	-	-	-	-	-	-	-
5		4	-	-	-	-	-	-	-
6	3	0.25	-	-	-	-	-	-	-
7		1	-	-	-	-	-	-	-
8		4	-	-	-	-	-	-	-
9	4.5	0.25	43.796	4.783	4.783	0.109	2.978	2.978	0.068
10		1	26.167	1.517	6.300	0.058	-	-	-
11		4	-	-	-	-	-	-	-
12	6	0.25	40.879	-	-	-	5.970	8.948	0.146
13		1	42.165	3.639	9.939	0.086	-	-	-
14		4	-	-	-	-	-	-	-
15	9	0.25	51.804	-	-	-	6.340	15.288	0.122
16		1	-	-	-	-	-	-	-
17	12	0.25	53.339	4.469	14.408	0.084	1.935	17.223	0.036
18		1	-	-	-	-	-	-	-
19	15	0.25	53.420	1.297	15.705	0.024	4.120	21.343	0.077
20		1	-	-	-	-	-	-	-

Tabla 8-4. Avance y velocidad de propagación de fisuras en pórtico 1

CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE FISURACIÓN EN PÓRTICOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A CARGA LATERAL DINÁMICA



Gráfica 8-5. Longitud de avance de fisuras en pórtico 1

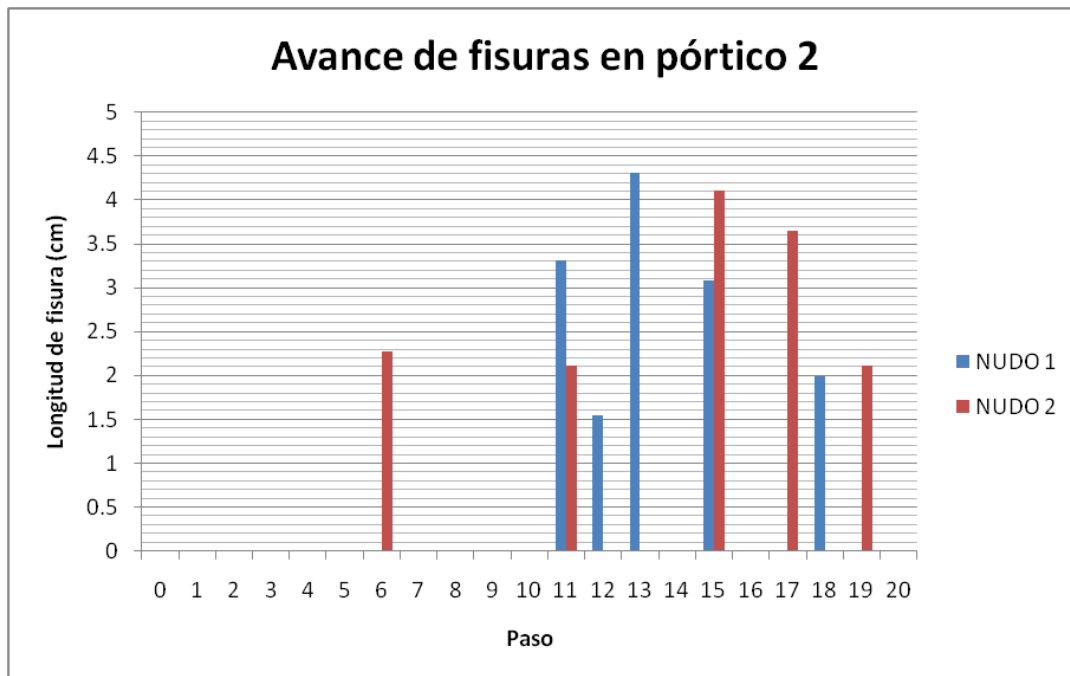


Gráfica 8-6. Velocidad de propagación de fisuras en pórtico 1

CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE FISURACIÓN EN PÓRTICOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A CARGA LATERAL DINÁMICA

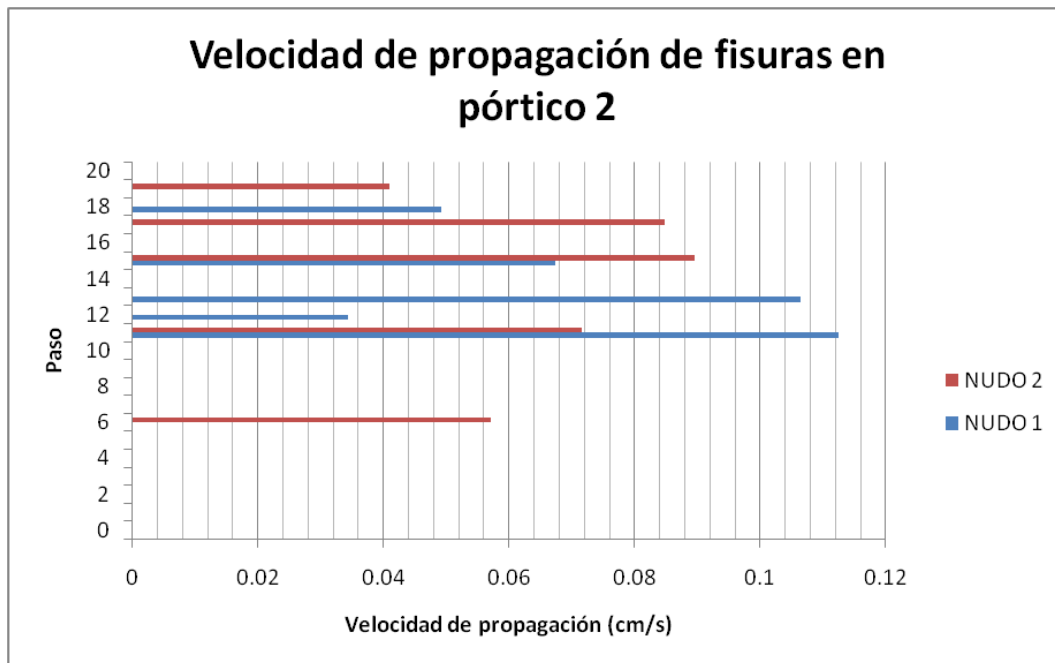
Paso	PÓRTICO 2			NUDO 1			NUDO 2		
	Desplazamiento (mm)	Frecuencia (Hz)	Duración (seg)	Avance de fisura (cm)	Distancia Acumulada (cm)	Velocidad de propagación (cm/s)	Avance de fisura (cm)	Distancia Acumulada (cm)	Velocidad de propagación (cm/s)
0		0.25	-	-	-	-	-	-	-
1	0.75	1	-	-	-	-	-	-	-
2		4	-	-	-	-	-	-	-
3		0.25	-	-	-	-	-	-	-
4	1.5	1	-	-	-	-	-	-	-
5		4	-	-	-	-	-	-	-
6		0.25	39.89	-	-	-	2.279	2.279	0.057
7	3	1	-	-	-	-	-	-	-
8		4	-	-	-	-	-	-	-
9		0.25	-	-	-	-	-	-	-
10	4.5	1	-	-	-	-	-	-	-
11		4	29.46	3.312	3.312	0.112	2.108	4.387	0.072
12		0.25	44.86	1.545	4.857	0.034	-	-	-
13	6	1	40.42	4.305	9.162	0.107	-	-	-
14		4	-	-	-	-	-	-	-
15		0.25	45.75	3.079	12.241	0.067	4.102	8.489	0.090
16	9	1	-	-	-	-	-	-	-
17		0.25	43.09	-	-	-	3.653	12.142	0.085
18	12	1	40.52	1.994	14.235	0.049	-	-	-
19		0.25	51.33	-	-	-	2.107	14.249	0.041
20	15	1	-	-	-	-	-	-	-

Tabla 8-5. Avance y velocidad de propagación de fisuras en pórtico 2



Gráfica 8-7. Longitud de avance de fisuras en pórtico 2

CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE FISURACIÓN EN PÓRTICOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A CARGA LATERAL DINÁMICA

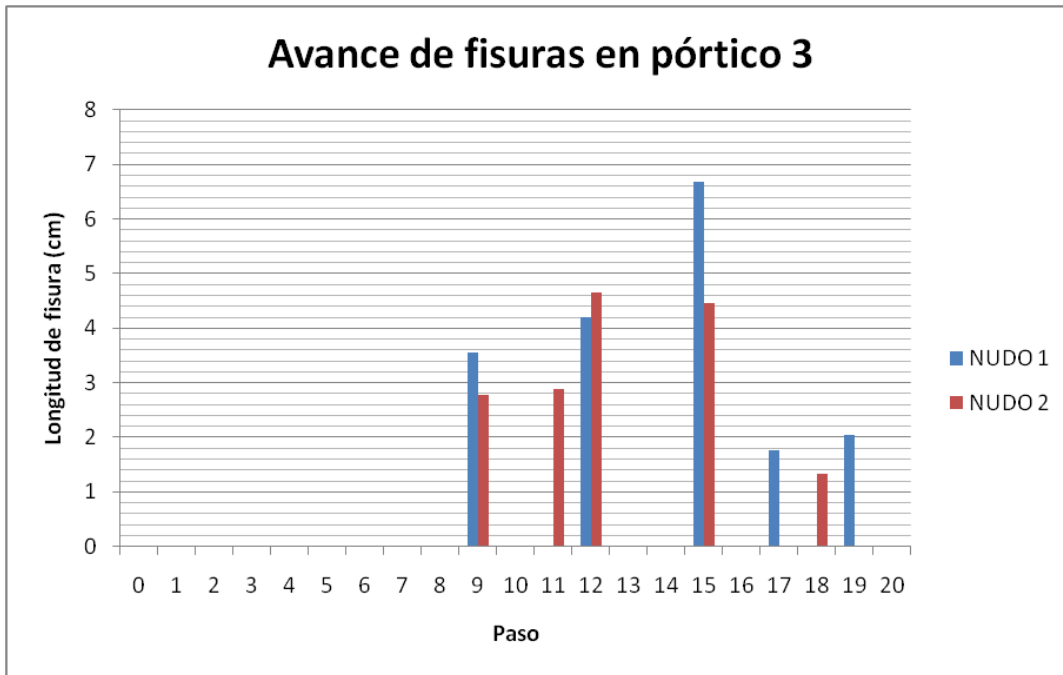


Gráfica 8-8. Velocidad de propagación de fisuras en pórtico 2

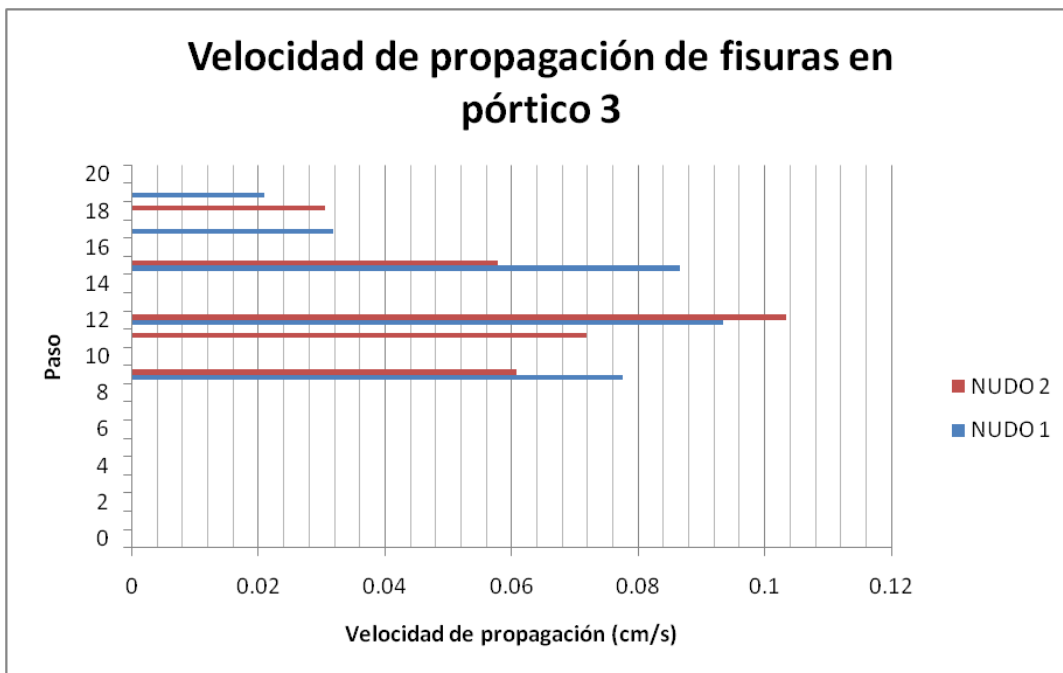
Paso	PORTICO 3			NUDO 1			NUDO 2		
	Desplazamiento (mm)	Frecuencia (Hz)	Duración (seg)	Avance de fisura (cm)	Distancia Acumulada (cm)	Velocidad de propagacion (cm/s)	Avance de fisura (cm)	Distancia Acumulada (cm)	Velocidad de propagacion (cm/s)
0	0.75	0.25	-	-	-	-	-	-	-
1		1	-	-	-	-	-	-	-
2		4	-	-	-	-	-	-	-
3	1.5	0.25	-	-	-	-	-	-	-
4		1	-	-	-	-	-	-	-
5		4	-	-	-	-	-	-	-
6	3	0.25	-	-	-	-	-	-	-
7		1	-	-	-	-	-	-	-
8		4	-	-	-	-	-	-	-
9	4.5	0.25	45.785	3.549	3.549	0.078	2.783	2.783	0.061
10		1	-	-	-	-	-	-	-
11		4	40.068	-	-	-	2.879	5.662	0.072
12	6	0.25	45.073	4.211	7.760	0.093	4.663	10.325	0.103
13		1	-	-	-	-	-	-	-
14		4	-	-	-	-	-	-	-
15	9	0.25	77.114	6.674	14.434	0.087	4.453	14.778	0.058
16		1	-	-	-	-	-	-	-
17	12	0.25	54.980	1.753	16.187	0.032	-	-	-
18		1	43.495	-	-	-	1.329	16.107	0.031
19	15	0.25	97.114	2.041	18.228	0.021	-	-	-
20		1	-	-	-	-	-	-	-

Tabla 8-6. Avance y velocidad de propagación de fisuras en pórtico 3

CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE FISURACIÓN EN PÓRTICOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A CARGA LATERAL DINÁMICA



Gráfica 8-9. Longitud de avance de fisuras en pórtico 3



Gráfica 8-10. Velocidad de propagación de fisuras en pórtico 3

CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE FISURACIÓN EN PÓRTICOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A CARGA LATERAL DINÁMICA

De acuerdo con la tabla de valores de longitud de avance de las fisuras y su velocidad de propagación, y con base en las gráficas que relacionan estos parámetros en función del paso de carga se puede observar que las fisuras se presentan generalmente bajo la acción de frecuencias bajas. De la misma forma se logra identificar una reducción en la longitud de avance en los últimos pasos de carga, equivalente a desplazamientos cercanos a la deriva máxima admisible.

La pérdida de avance de las fisuras muestra la compatibilidad entre el acero de refuerzo y el concreto porque en el momento de presentarse deformaciones considerables, el acero comienza a traccionarse y no permite que la fisura avance con la misma velocidad que antes. Observando la gráfica de velocidad de propagación se puede soportar la idea de que el acero comienza a trabajar en porcentajes de deriva cercanos a la máxima, debido a la caída en la velocidad de propagación.

Con base en el análisis de los resultados obtenidos se pueden determinar tres etapas claras de avance de fisuración y velocidad de propagación. Una etapa de avance bajo a nulo, la cual se presenta para los primeros pasos de carga, en los que no se hace visible la aparición de fisuras; una etapa de avance rápido, la cual se da aproximadamente entre los pasos 12 a 15, donde se hace notoria la propagación de la fisura; y una etapa de reducción de la velocidad, la cual se presenta para los últimos pasos de carga, donde disminuye la velocidad de propagación.

Respecto al área de afectación por nivel de fisuración, es evidente que la zona de mayor índice de agrietamiento es en los nudos de la estructura, debido a que el daño se concentra en la unión viga-columna, Este patrón de agrietamiento obedece a la condición de apoyo de segundo grado, ya que dicha condición de frontera genera grandes giros en los apoyos, los cuales se manifiestan en grandes derivas, lo que conlleva a que se formen articulaciones plástica en los nudos. Esto se puede comprobar al observar y comparar los diagramas de momentos de la estructura con los apoyos de segundo y tercer grado, En un sistema empotrado, las zonas de tensión se localizan en los extremos de las columnas, mientras que en el sistema articulado, la concentración de esfuerzos de tensión es más pronunciado en la parte superior de la columna, por lo cual se establece que en dicha zona habrá mayor concentración de daño

CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE FISURACIÓN EN PÓRTICOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A CARGA LATERAL DINÁMICA

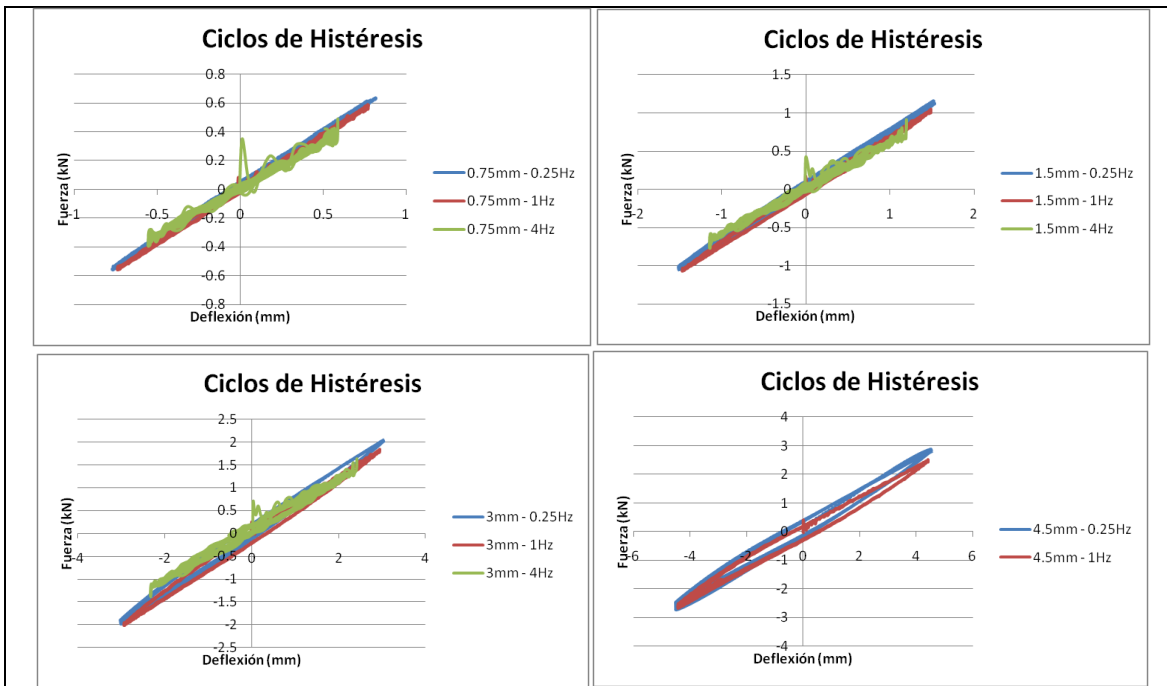
8.2.2 Ciclos de Histéresis

Debido a la carga dinámica, la estructura fue sometida a carga y descarga, por lo cual presentó una respuesta histerética en términos de fuerza y desplazamiento.

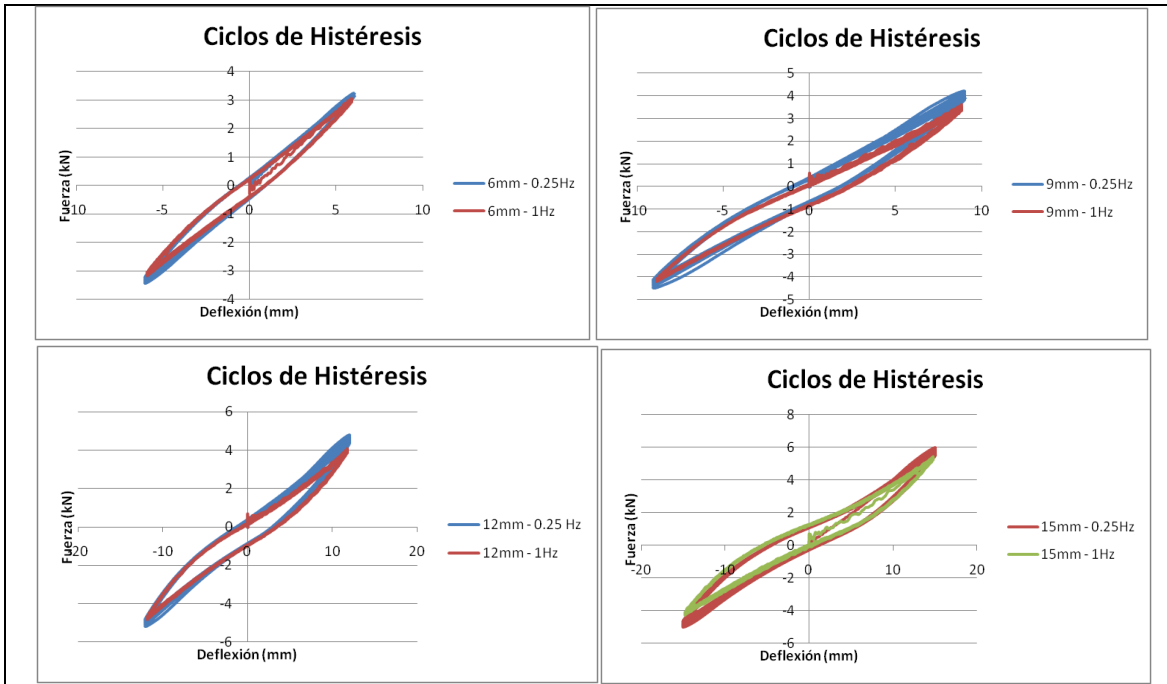
A continuación se presentan las graficas donde se ilustra el progreso de los ciclos de histéresis durante cada nivel de desplazamiento a diferentes frecuencias. Igualmente se presentan gráficas de ciclos de histéresis comparando los distintos desplazamientos para un mismo valor de frecuencia.

PÓRTICO 1

- Desplazamientos constantes a diferentes frecuencias.

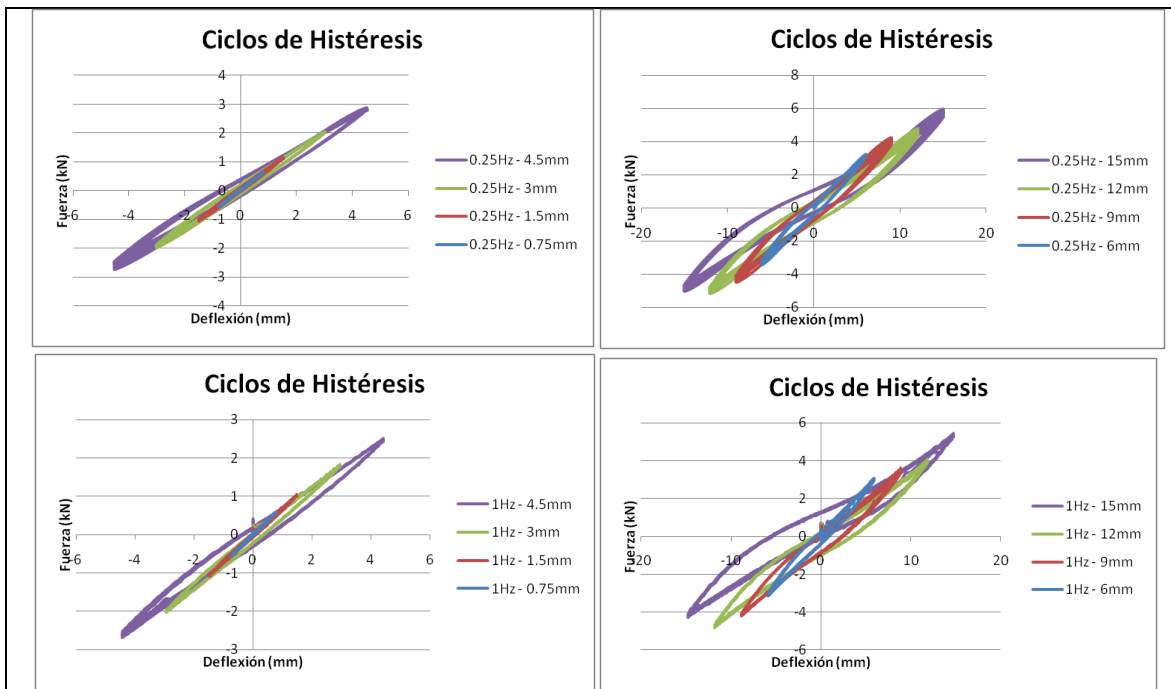


CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE FISURACIÓN EN PÓRTICOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A CARGA LATERAL DINÁMICA

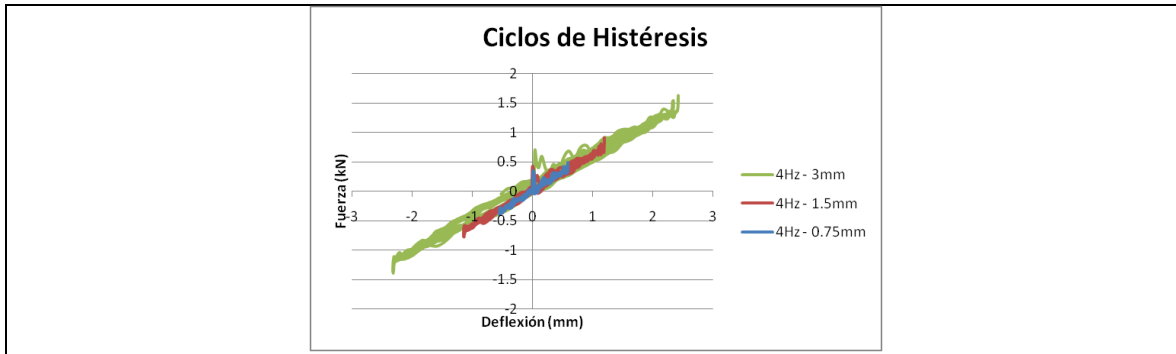


Gráfica 8-11. Ciclos de histéresis con desplazamientos constantes para pódico 1

- Frecuencias iguales con distintos desplazamientos



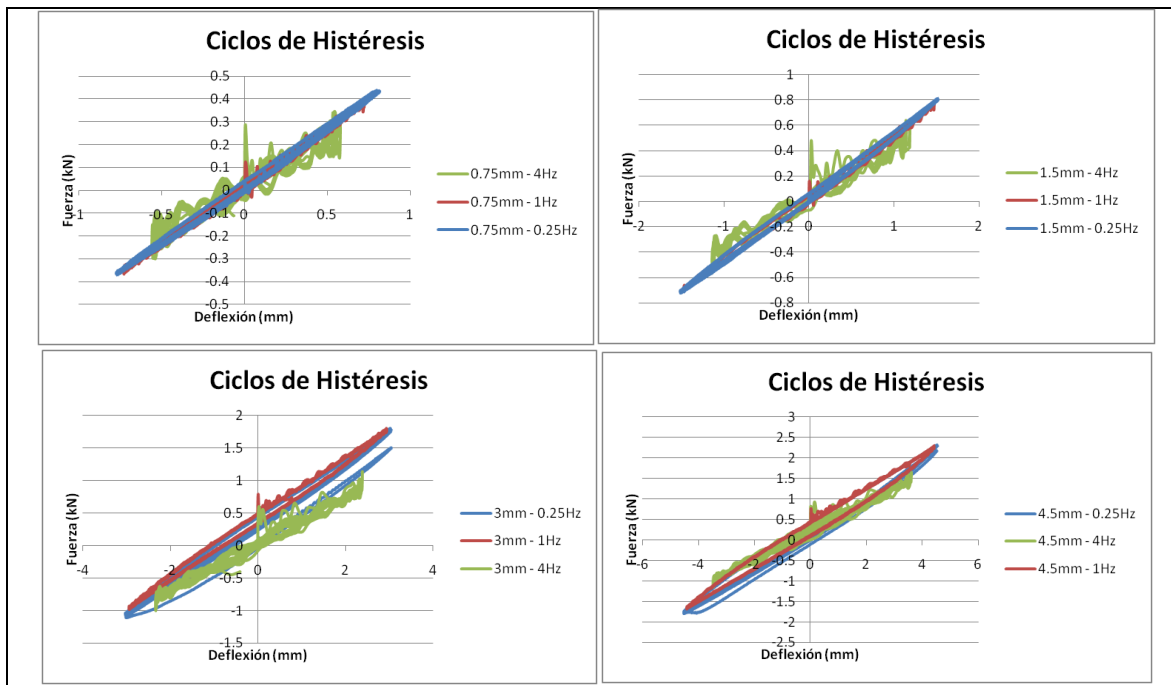
CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE FISURACIÓN EN PÓRTICOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A CARGA LATERAL DINÁMICA



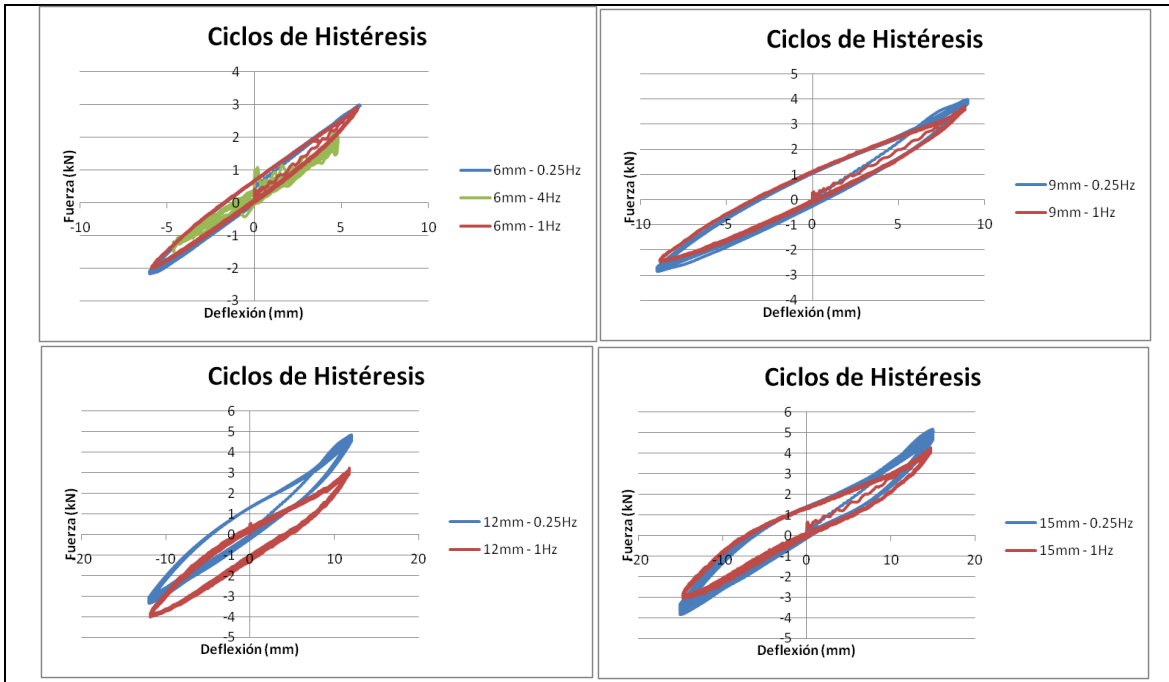
Gráfica 8-12. Ciclos de histéresis con frecuencias iguales para pórtico 1

PÓRTICO 2

- Desplazamientos constantes a diferentes frecuencias

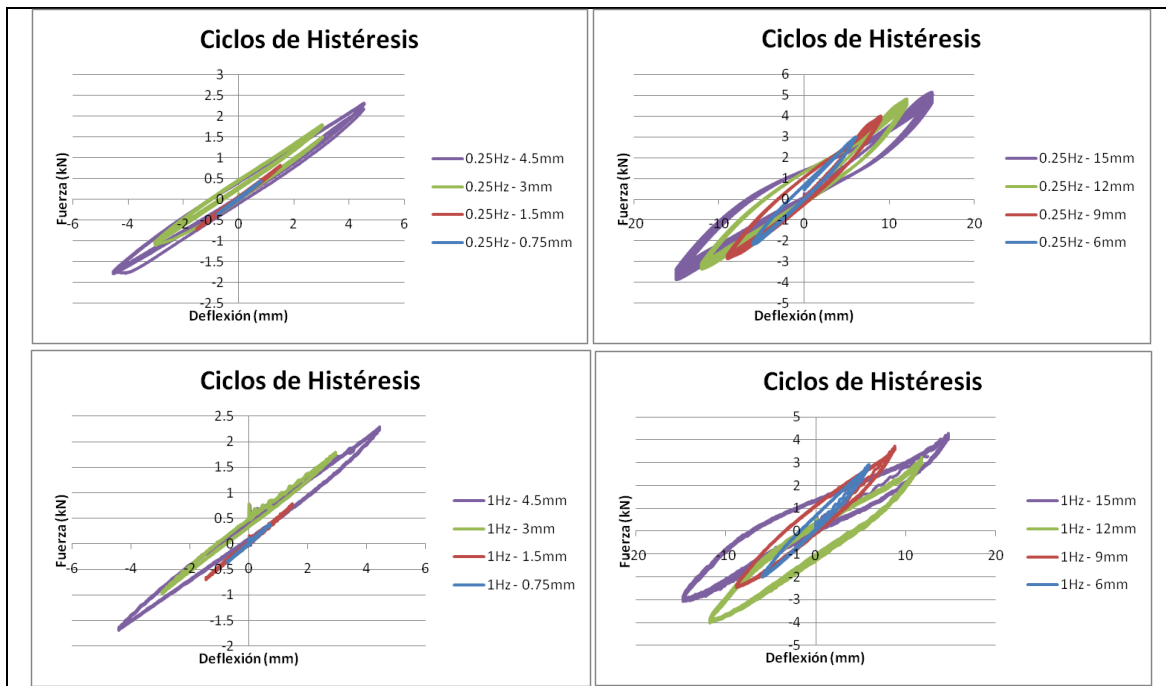


CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE FISURACIÓN EN PÓRTICOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A CARGA LATERAL DINÁMICA

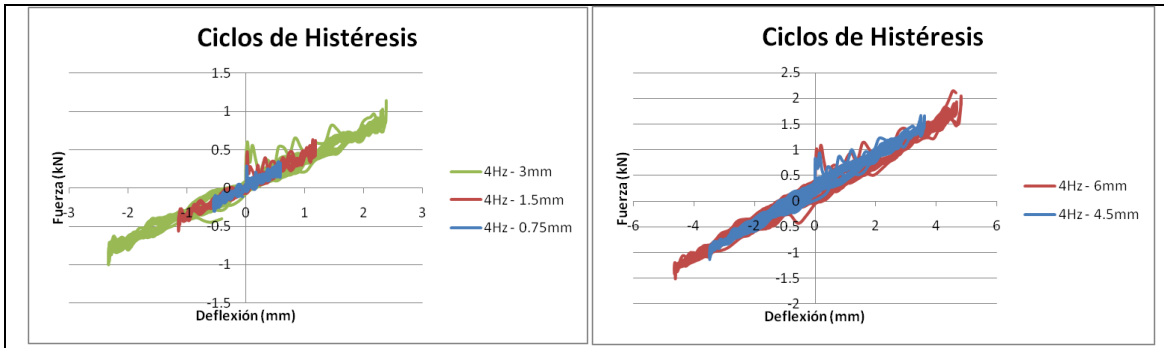


Gráfica 8-13. Ciclos de histéresis con desplazamientos constantes para pórtico 2

- Frecuencias iguales con distintos desplazamientos



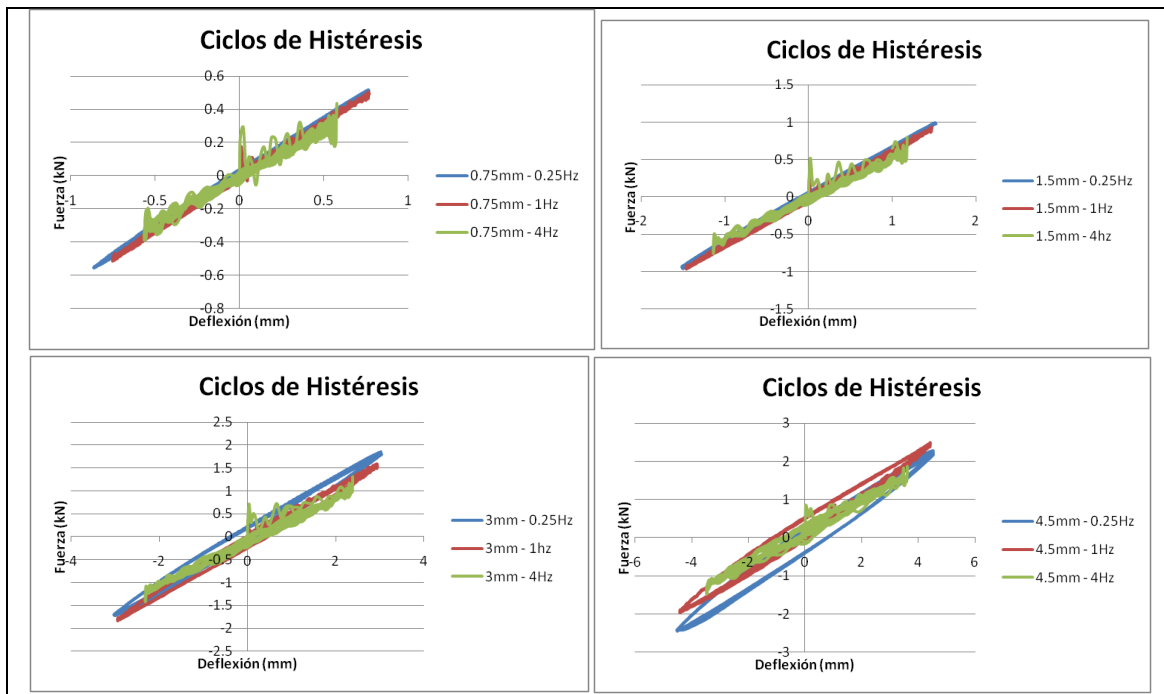
CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE FISURACIÓN EN PÓRTICOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A CARGA LATERAL DINÁMICA



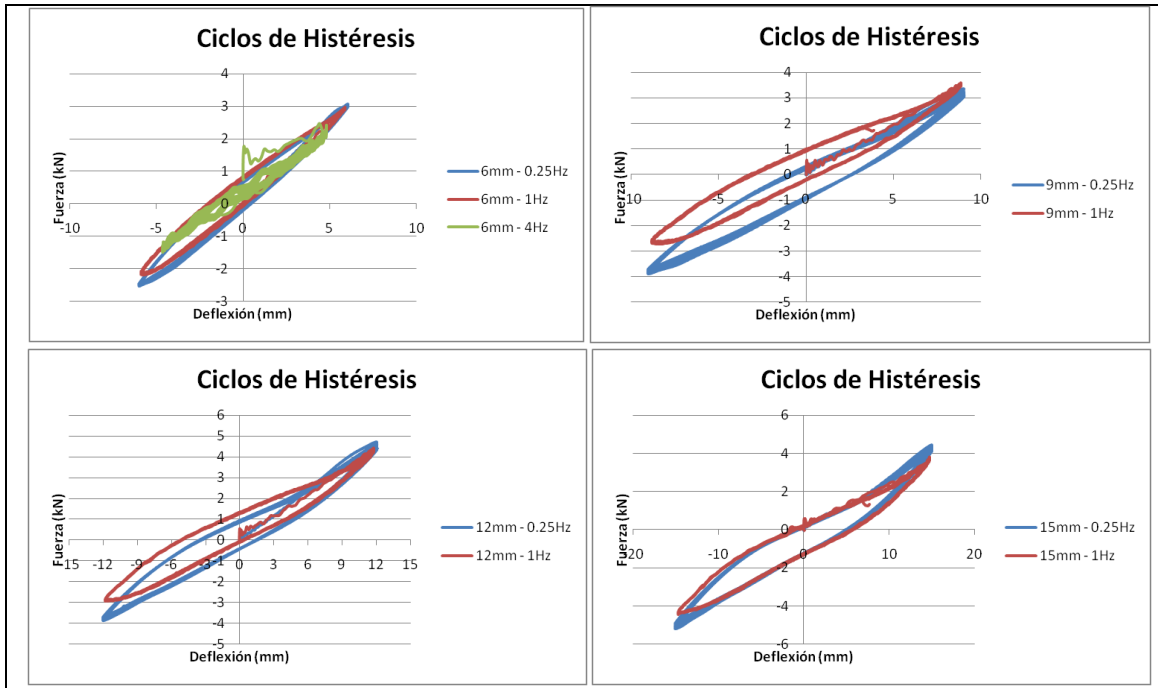
Gráfica 8-14. Ciclos de histéresis con frecuencias iguales para pórtico 2

PÓRTICO 3

- Desplazamientos constantes a diferentes frecuencias

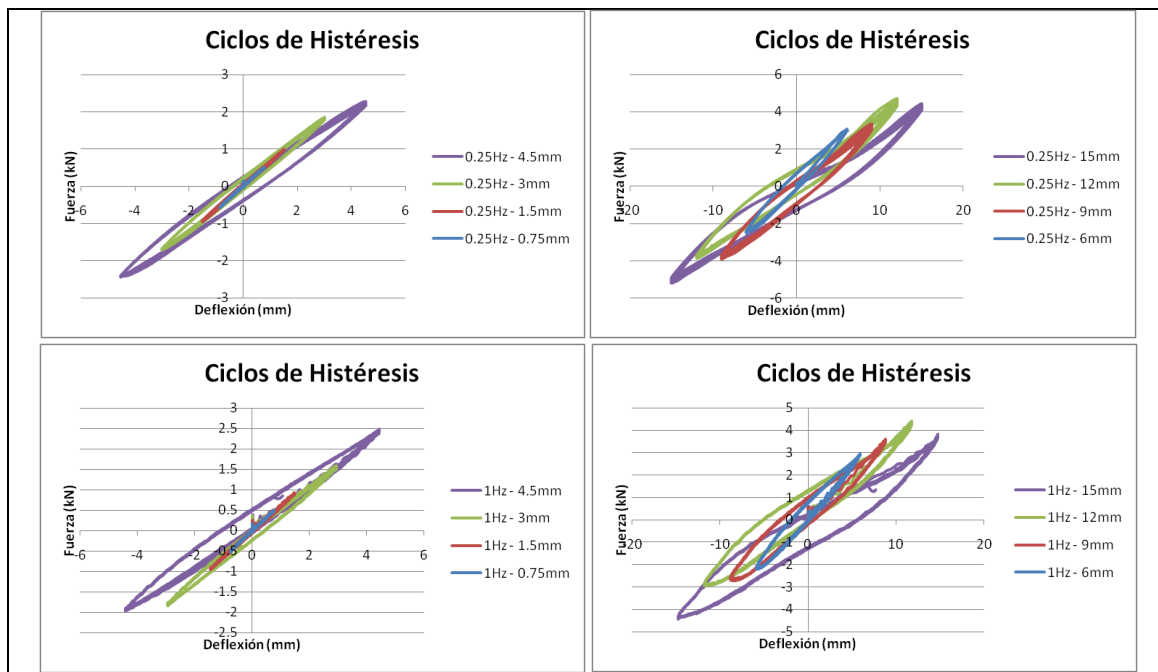


CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE FISURACIÓN EN PÓRTICOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A CARGA LATERAL DINÁMICA

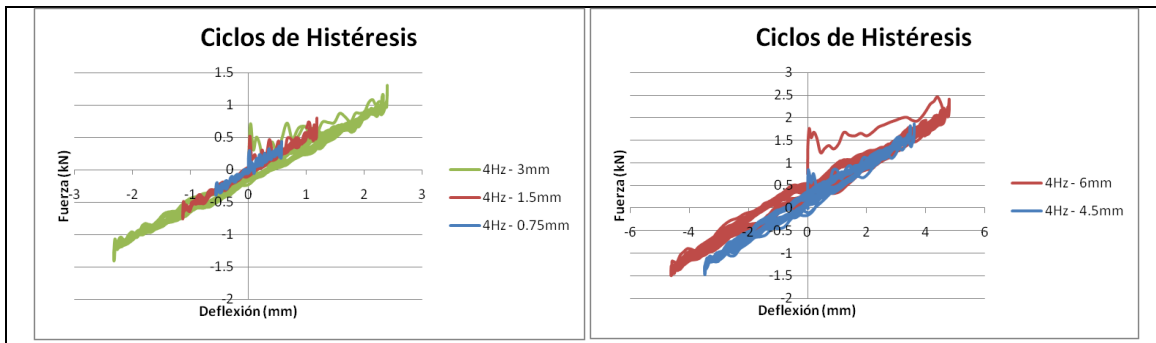


Gráfica 8-15. Ciclos de histéresis con desplazamiento constante para pórtico 3

- Frecuencias iguales con distintos desplazamientos



CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE FISURACIÓN EN PÓRTICOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A CARGA LATERAL DINÁMICA



Gráfica 8-16. Ciclos de histéresis con frecuencias iguales para pórtico 3

Al analizar los ciclos de histéresis, se puede observar que, para una condición de frecuencia constante con variación del nivel de deformación, a medida que se presenta un avance en el porcentaje de deriva la estructura entra en rangos inelásticos debido a que los ciclos de histéresis tienen cambio de pendiente y se genera un área dentro de la curva. Dicha área representa una disipación de energía por parte del pórtico ante la carga dinámica a la que está siendo sometido.

Cabe mencionar que la disipación de energía se produce en el momento en que la estructura empieza a tener algún nivel de fisuración, lo cual se puede demostrar al analizar la tabla de avance de fisuras, en la que se muestra una aparición de fisuras en rangos de deriva cercanos a la máxima admisible.

En los ciclos de histéresis que están bajo la condición de deflexiones constantes bajo diferentes valores de frecuencia, igualmente se puede observar que al haber un incremento en la intensidad de la frecuencia, la estructura presenta una disminución en la resistencia. En los ciclos de histéresis la pérdida de resistencia se puede constatar al haber diferencia en la máxima carga resistida por la estructura bajo un mismo nivel de desplazamiento.

Así mismo, se observa nuevamente que existe una disipación de energía por parte de la estructura al encontrarse en rangos de deriva cercanos a la de diseño. Esta situación se presenta bajo la posibilidad de que el acero asuma parte del esfuerzo generado por la carga lateral dinámica, lo cual contrasta con la disminución en la velocidad de propagación.

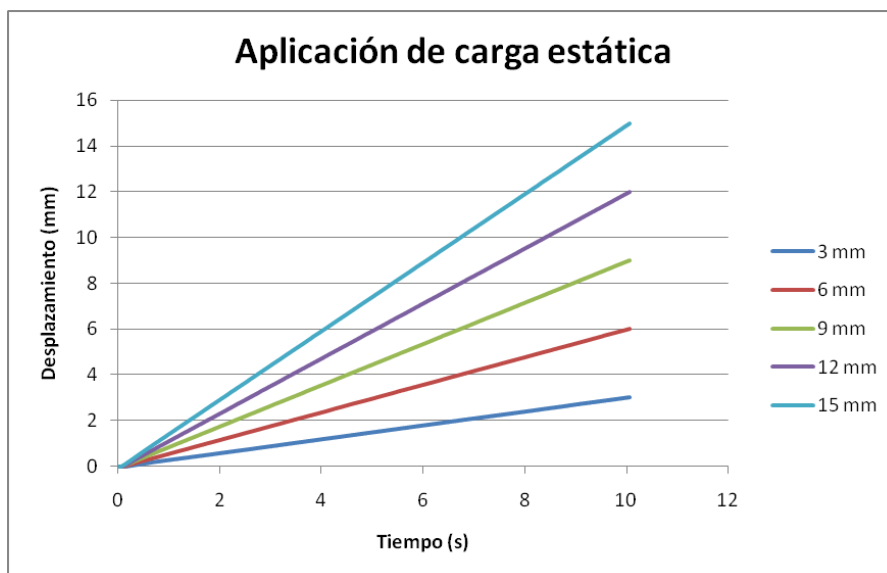
CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE FISURACIÓN EN PÓRTICOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A CARGA LATERAL DINÁMICA

8.3 DEGRADACIÓN POR FRACTURA (“PUSHOVER”)

Con base en la descripción de la segunda parte del ensayo, la cual consiste en la aplicación de carga lateral estática con incrementos de desplazamiento en cada intervalo de duración del paso de carga, a continuación se presenta de manera gráfica la ejecución del ensayo, en la que se relaciona el desplazamiento con el tiempo de aplicación de la carga.

DESPLAZAMIENTO (mm)	ESPESOR FISURA (mm)	
	NUDO 1	NUDO 2
3	-	-
6	-	-
9	-	-
12	-	-
15	-	-

Tabla 8-7. Pasos de carga para ensayo de pushover



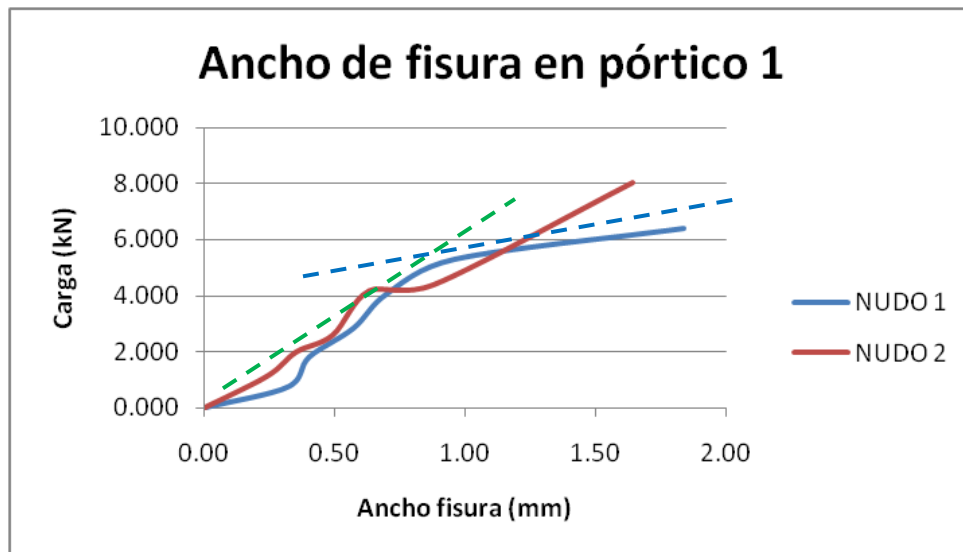
Gráfica 8-17. Descripción del ensayo de pushover

CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE FISURACIÓN EN PÓRTICOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A CARGA LATERAL DINÁMICA

8.3.1 Ancho de fisuras

PORTICO 1						
PASO	NUDO 1			NUDO 2		
	DESPLAZAMIENTO (mm)	CARGA (KN)	ANCHO FISURA (mm)	DESPLAZAMIENTO (mm)	CARGA (KN)	ANCHO FISURA (mm)
	0	0.000	0.00	0	0.000	0
0	3	0.744	0.32	3	1.130	0.24
1	6	1.804	0.40	6	1.980	0.35
2	9	2.833	0.57	9	2.582	0.49
3	12	4.075	0.70	12	4.158	0.63
4	15	5.306	0.96	15	4.387	0.88
5	30	6.404	1.84	30	8.010	1.64

Tabla 8-8. Ancho de fisura para pórtico 1

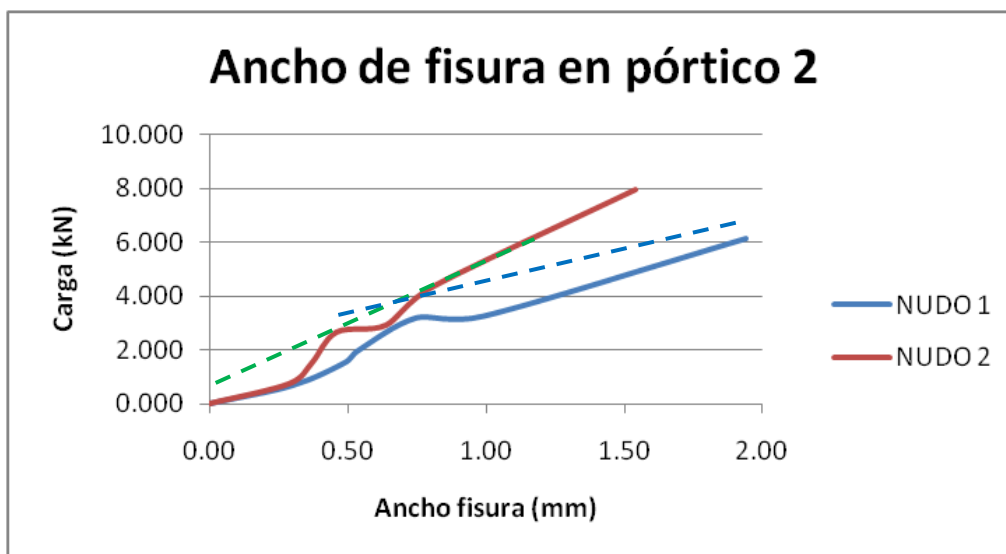


Gráfica 8-18. Carga vs Ancho de fisura (Pórtico 1)

CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE FISURACIÓN EN PÓRTICOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A CARGA LATERAL DINÁMICA

PORTICO 2						
PASO	NUDO 1			NUDO 2		
	DESPLAZAMIENTO (mm)	CARGA (KN)	ANCHO FISURA (mm)	DESPLAZAMIENTO (mm)	CARGA (KN)	ANCHO FISURA (mm)
	0	0.000	0.00	0	0.000	0.00
0	3	0.677	0.30	3	0.745	0.29
1	6	1.524	0.49	6	1.502	0.37
2	9	1.987	0.54	9	2.652	0.46
3	12	3.195	0.75	12	2.918	0.64
4	15	3.247	0.99	15	4.344	0.81
5	30	6.131	1.94	30	7.931	1.54

Tabla 8-9. Ancho de fisura para pórtico 2

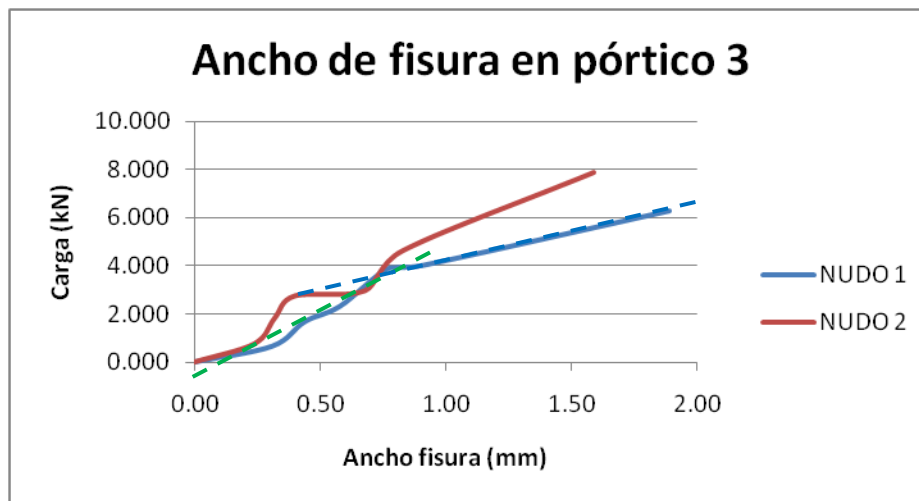


Gráfica 8-19. Carga vs Ancho de fisura (Pórtico 2)

CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE FISURACIÓN EN PÓRTICOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A CARGA LATERAL DINÁMICA

PORTICO 3						
PASO	NUDO 1			NUDO 2		
	DESPLAZAMIENTO (mm)	CARGA (KN)	ANCHO FISURA (mm)	DESPLAZAMIENTO (mm)	CARGA (KN)	ANCHO FISURA (mm)
	0	0.000	0.00	0	0.000	0.00
0	3	0.659	0.31	3	0.763	0.24
1	6	1.678	0.44	6	1.817	0.32
2	9	2.317	0.58	9	2.744	0.40
3	12	3.874	0.77	12	2.961	0.68
4	15	4.014	0.91	15	4.621	0.83
5	30	6.272	1.89	30	7.863	1.59

Tabla 8-10. Ancho de fisura para pórtico 3



Gráfica 8-20. Carga vs Ancho de fisura (Pórtico 3)

De las anteriores gráficas se puede ver como la pendiente del aumento de los anchos de fisuración con respecto al tiempo, muestran el mismo comportamiento de la velocidad de avance de la fisura. Es decir, a medida que el pórtico encuentra deflexiones cercanas o superiores a la deriva elástica de diseño del código, el ancho cambia de manera radical su tasa de crecimiento, lo que obedece a la imposibilidad del concreto de resistir mayores esfuerzos de tensión y dejando que el acero comience a trabajar tal como lo manda el diseño de su función estructural.

CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE FISURACIÓN EN PÓRTICOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A CARGA LATERAL DINÁMICA

9. CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados experimentales se plantean las siguientes conclusiones:

- La resistencia a la compresión del concreto y la resistencia a la tensión del acero de refuerzo cumplen los requerimientos exigidos por la norma sismo resistente.
- El daño en la estructura se concentró en la zona de los nudos debido a la condición de frontera, la cual tuvo un comportamiento de apoyos articulados, generando giro en las columnas.
- La fuerza máxima para desplazar la estructura a los niveles de deformación estudiados es mayor para frecuencias bajas, y menor para frecuencias altas.
- Los pórticos presentan un tipo de fisura general, caracterizada por avance diagonal desde la esquina inferior del nudo hacia la parte superior de la columna, uniéndose posteriormente con fisuras localizadas en los bordes.
- El aumento de longitud de avance de las fisuras se presenta, generalmente, bajo la acción de frecuencias bajas para desplazamientos entre 6 y 9 mm.
- La pérdida de avance de las fisuras refleja la compatibilidad entre el acero de refuerzo y el concreto, ya que al presentarse deformaciones excesivas, el acero se tracciona reduciendo la velocidad de propagación de la fisura.
- Se pueden determinar tres etapas claras de avance de fisuración. Una etapa de avance baja, otra etapa de avance rápida y una última etapa de reducción en la velocidad de propagación. De esta manera se muestra una etapa importante en la cual se debe controlar fisuración ante de llegar a velocidades de avance rápidas, generando degradación estructural rápida. Lo anterior sugiere investigación profunda en sistemas de control temprana de fisuración.
- Para condiciones de frecuencia constante con variación de la deflexión, a medida que avanza el nivel de desplazamiento, la estructura entra en rango inelástico debido a la capacidad de la estructura de disipar energía.

CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE FISURACIÓN EN PÓRTICOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A CARGA LATERAL DINÁMICA

- Para un mismo valor de deflexión, la estructura presenta una disminución de la resistencia para frecuencias de mayor intensidad. Esto sugiere que para éste sistema de concreto sometido a sistemas de fuerzas de tipo lateral con contenido frecuencial alto, la rigidez estructural se degrada a una tasa más alta.
- El ancho de las fisuras cambia de manera radical su tasa de crecimiento a medida que la estructura se somete a deflexiones cercanas o superiores a la deriva máxima de diseño.

CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE FISURACIÓN EN PÓRTICOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A CARGA LATERAL DINÁMICA

10. RECOMENDACIONES PARA ESTUDIOS FUTUROS

- Debido al comportamiento articulado del sistema de apoyos, se recomienda para próximas investigaciones un análisis con restricción de giro y desplazamientos.
- Con el fin de obtener mejor precisión en la toma de datos, se recomienda la aplicación de aparatos de ultrasonido para efectuar mediciones de ancho de fisuras y velocidad de propagación con base en la resistencia del material, así como una mejora en la tecnología de la detección geométrica de las fisuras, ya que los cálculos de velocidad de avance dependen de la longitud registrada en cada estado de carga.
- Se recomienda el uso de strain gages en las varillas de acero de refuerzo con el objetivo de determinar los esfuerzos que se transmiten a este material en el momento de entrar en rangos inelásticos, y poder así determinar de manera porcentual el grado de solidaridad entre concreto y acero, cuando las columnas y vigas se encuentran en estados cercanos a la máxima resistencia en tensión del concreto y en etapas posteriores a ésta.
- Se recomienda la realización de las mismas pruebas pero usando fibras para poder determinar si éstas ayudan a disminuir la velocidad de fisuración temprana con el fin de evitar un avance excesivo de la longitud de fisuras.

CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE FISURACIÓN EN PÓRTICOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A CARGA LATERAL DINÁMICA

11. BIBLIOGRAFIA

- [1] ACI Committee 224, "Causas, Evaluación y Reparación de fisuras en estructuras de hormigón". American Concrete Institute.
- [2] ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-08) American Concrete Institute.
- [3] ALVA, Gerson Moacyr Sisniegas; DE CRESCE EL DEBS, Ana Lucia Homce; EL DEBS, Mounir Khalil. An experimental study on cyclic behaviour of reinforced concrete connections. Canadian Journal of Civil Engineering. Apr 2007, Vol. 34, p 565. ASCE.
- [4] AMAZO, Ingrid; DUQUE, Andrés y RUIZ, Daniel. Análisis de la resistencia sísmica de pórticos a escala de concreto reforzado rehabilitados con FRP. Bogotá D.C. Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de Ingeniería, 2007.
- [5] BUYUKOZTURK, Oral and CONNOR, Jerome. Nonlinear dynamic response of reinforced concrete under impulsive loading. Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, USA, 1978.
- [6] BUYUKOZTURK, Oral and HEARING, Brian. Crack Propagation in concrete composites influenced by interface Fracture Parameters. Department of Civil and Environmental Engineering Massachusetts Institute of Technology. Cambridge, USA, 1998.
- [7] CHAN Chun-Man, MICKLEBOROUGH Neil C and NING Feng. Analysis of cracking effects on tall reinforced concrete buildings. Journal of Structural Engineering, Sep 2000, Vol. 126, p995.
- [8] FERNÁNDEZ BAQUEIRO, L. E., Pérez, H. A., Varela, J. L. (2006). Caracterización de los parámetros de fractura del concreto simple mediante un análisis numérico. Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY, 10-3, pp.23-34. ISSN: 1665-529X.
- [9] FROSCHE, Robert J. Modeling and Control of Side Face Beam Cracking. ACI Structural Journal. May-June 2002.
- [10] GILBERT, R. Ian. Control of Flexural Cracking in Reinforced Concrete. ACI Structural Journal. May-June 2008.
- [11] HOLCIM (COLOMBIA) S.A

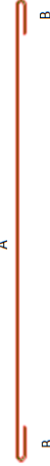


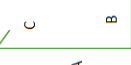

CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE FISURACIÓN EN PÓRTICOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A CARGA LATERAL DINÁMICA

- [12] KHOO, Jyh Hao and LI, Bing. Modeling of reinforced concrete sub-frame under cyclic load reversals. *Journal of Earthquake Engineering*. Mar 2007, Vol. 11, p 215-230.
- [13] NORMA COLOMBIANA DE DISEÑO Y CONSTRUCCION SISMO RESISTENTE. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010. Bogotá D.C, Colombia.
- [14] OLLER, Sergio. *Fractura mecánica. Un enfoque global*. Barcelona, España. Universitat Politècnica de Catalunya, 2001. ISBN 84-89925-76-3.
- [15] SANTHI, Helen M.; SAMUEL KNIGHT, G. M. and MUTHUMANI, K. Evaluation of Seismic Performance of Gravity Load Designed Reinforced Concrete Frames. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. Nov 2005, Vol. 19, p 277-282. ASCE.
- [16] SPOONER, D. C. and DOUGILL, J. W. 1975. A quantitative assessment of damage sustained in concrete during compressive loading, *Mag. Conc. Res.*, 27, 151
- [17] VAN Mier, Jan G. M. *Fracture Processes of Concrete*. United States of America. CRC Press. 1997. ISBN 0-8493-9123-7
- [18] WISCHER, G. 1978. Behaviour of concrete under compressive stress. *Betontechnische Berichte*, 19, 31
- [19] XU Shilang, Zhao Yanhua and Wu Zhimin. Study on the average fracture energy for crack propagation in concrete. *Journal of Material in Civil Engineering*. Nov-Dec 2006, Vol. 18, p817-824.

CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE FISURACIÓN EN PÓRTICOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A CARGA LATERAL DINÁMICA

12. ANEXOS

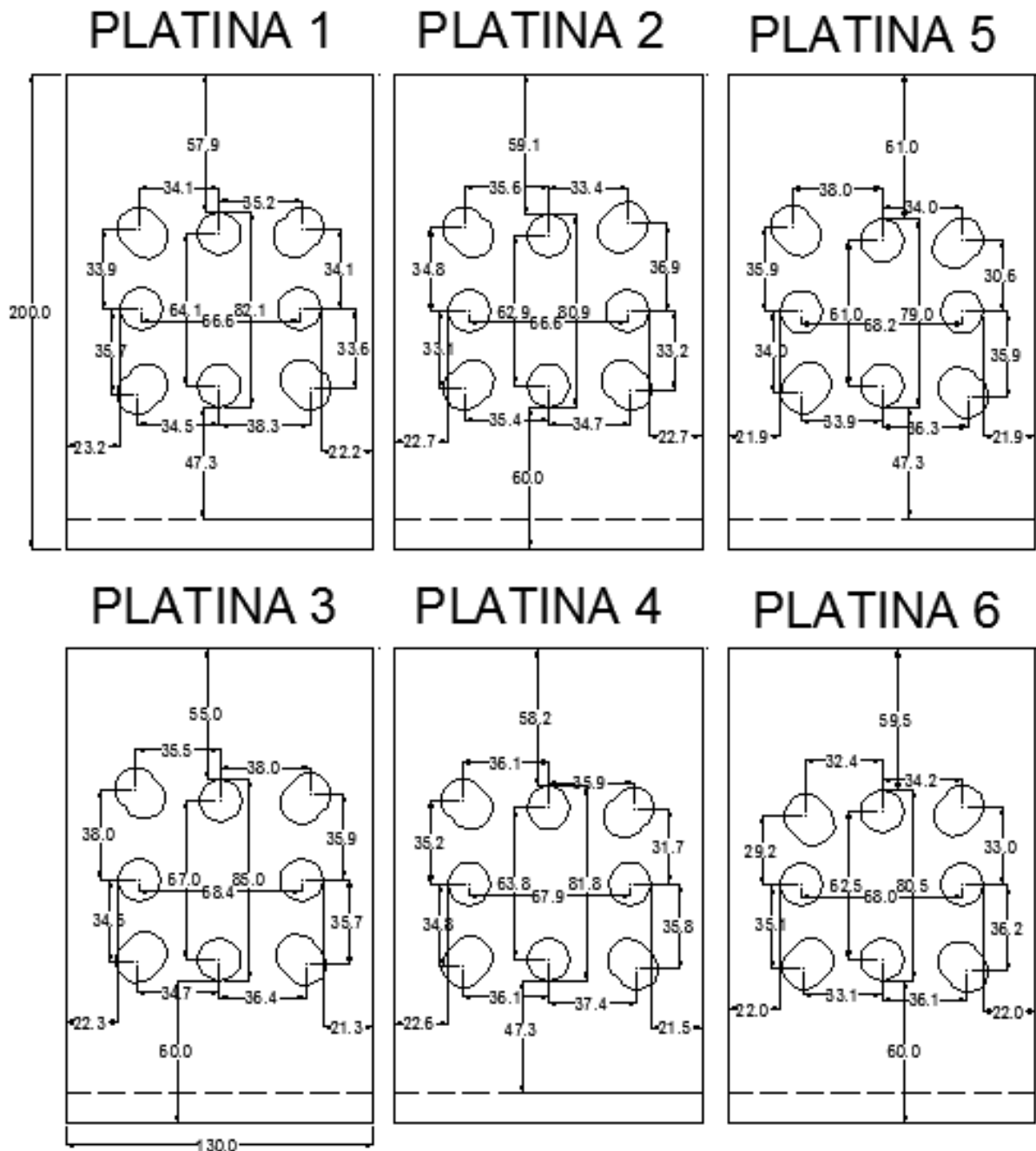
12.1 ANEXO A: CARTILLA DE DESPIECE DE ACERO DE REFUERZO

CODIGO	N° VARILLA	DENOMINACION	ESQUEMA	A (m)	B (m)	C (m)	TOTAL (m)	CANTIDAD	PESO (Kg)
1	3/8"	317 ³		1.53	0.10	-	1.73	24	23.3
2	3/8"	316 ³		1.43	0.10	-	1.63	12	11.0
3	1/4"	205 ⁴		0.11	0.08	-	0.60	620	93.0
4	3/8"	310 ⁴		0.36	0.11	0.08	1.10	18	11.1
5	3/8"	304 ³		0.23	0.10	-	0.43	12	2.9
Total								1412	

Anexo A. Cartilla de despiece de acero de refuerzo

CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE FISURACIÓN EN PÓRTICOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A CARGA LATERAL DINÁMICA

12.2 ANEXO B: DETALLE DE PLATINAS DEL SISTEMA DE APOYOS



Anexo B. Detalle de platinas del sistema de apoyos (mm)