



UNIVERSIDAD
DE PIURA

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Simulación del tipo de falla en vigas simplemente
apoyadas sin refuerzo de corte con Applied Element
Method**

Tesis para optar el Título
de Ingeniero Civil

Miguel Fernando Guerrero Tiburcio

Asesor:
Mgtr. Ing. Juan Carlos Atoche Arce

Piura, diciembre de 2021



A mi madre, por su esfuerzo y apoyo incondicional en este proceso.
A mis abuelos, por sus consejos e inquebrantable soporte en mi vida.





Resumen

Esta tesis busca utilizar el Método de Elementos Aplicados (AEM) para simular el comportamiento y tipo de falla en 10 vigas reales de concreto armado simplemente apoyadas, con diferentes niveles de esbeltez, sin refuerzo de corte, sección rectangular constante y bajo 2 cargas estáticas puntuales. Se utilizó el software Extreme Loading for Structures (ELS) que se basa en AEM, que es una técnica de modelación innovadora para el análisis estructural. El objetivo principal es obtener los patrones de agrietamiento de las vigas simuladas y compararlos con los de las vigas reales. Además, se busca obtener las curvas fuerza-deformación con ELS y comparar sus valores con las curvas reales disponibles.

Esta tesis adoptó una metodología mixta: Cualitativa ya que se realizó una comparación de la ubicación, altura, extensión y distribución de los patrones de agrietamiento observados en 10 vigas reales, y los obtenidos con ELS. Cuantitativa porque se compararon las curvas fuerza – deformación que se obtuvieron en ELS con las curvas reales disponibles. También se realizó un estudio de sensibilidad preliminar básico de 4 parámetros (*separation strain*, *friction coefficient*, *contact spring unloading stiffness factor* y *ultimate/yield stress ratio*) de los que se tuvo información imprecisa y el manual del ELS solo recomendó rangos para su valor. Se evaluó el valor mínimo, medio y máximo de los rangos recomendados.

Las características y condiciones de las vigas se simularon con relativa facilidad gracias a la interfaz amigable del ELS. Los patrones de agrietamiento se simularon con precisión razonable respecto a la ubicación, distribución, altura y extensión. Las curvas "fuerza - deformación" disponibles de las vigas reales se simularon adecuadamente en la mayor parte de su extensión. La curva de la viga menos esbelta fue la que presentó el error máximo con respecto al desplazamiento (25,4%) y la curva de la viga más esbelta tuvo el error mínimo (4,8%). Del estudio de sensibilidad se obtuvo que los mejores valores del *separation strain*, *friction coefficient* y *contact spring unloading stiffness factor* fueron 0.1, 0.8, 2 en concreto y 0.2, 0.8, 2 en acero respectivamente. Además, el mejor valor del *ultimate/yield stress ratio* (disponible solo en acero) fue 1,4.

Se concluye que ELS tiene una buena capacidad para simular el comportamiento de vigas con diferente esbeltez, sin necesidad de conocer previamente la ubicación de las grietas ni requerir técnicas de simulación complejas o adicionales. Las grietas de corte se pudieron

simular con éxito en cuanto a ubicación, extensión, altura y distribución. Sin embargo, las grietas por flexión no se apreciaron con la misma calidad. ELS logró predecir adecuadamente la mayoría de las curvas de “fuerza-deformación” en las vigas que tuvieron suficiente información experimental (vigas 3, 5, 7 y 9), en las que el margen de error entre el desplazamiento real y simulado con ELS fue 25,4%, 10,05%, 9,50% y 4,80% respectivamente.



Tabla de contenido

Introducción	17
Capítulo 1	19
Comportamiento a cortante en vigas simplemente apoyadas bajo cargas estáticas puntuales.....	19
1.1 Importancia del comportamiento a cortante	19
1.2 Tipos de falla relacionados al cortante	19
1.2.1 Tracción diagonal	19
1.2.2 Adherencia por cortante	20
1.2.3 Compresión por cortante	20
1.2.4 Anclaje	21
1.2.5 Flexión	21
1.3 Parámetros que influyen en el comportamiento a cortante	21
1.3.1 Resistencia a tracción del concreto.....	23
1.3.2 Cuantía de acero longitudinal por flexión.....	23
1.3.3 Esbeltez del elemento	24
1.3.4 Presencia de cargas axiales	24
1.3.5 Tipo de agregado.....	25
1.3.6 Ubicación de los puntos de corte de la armadura de flexión	25
1.3.7 Profundidad de la viga.....	25
1.3.8 Tamaño del agregado grueso	25
Capítulo 2	27
Applied element method	27
2.1 Applied element method	27
2.1.1 Características del AEM.....	27
2.1.2 Contraste entre AEM y FEM	29
2.2 Estudios con AEM en vigas de concreto simple o armado.....	32

2.2.1 Una nueva técnica eficaz para el análisis de fracturas de estructuras.	32
2.2.2 Patrón de grietas en vigas de concreto simple utilizando el método de elementos aplicados.....	32
2.2.3 Viga pared de concreto armado sin refuerzo de corte sometida a carga de cuatro puntos.....	33
2.2.4 Extreme Loading for Structures.....	35
2.2.5 Parámetros característicos del software.....	35
2.2.5.1 Deformación de separación (Separation strain)	35
2.2.5.2 Factor de descarga de resorte de contacto (Contact spring unloading stiffness factor)	36
2.2.5.3 Coeficiente de fricción (Friction coefficient)	37
2.2.5.4 Resistencia de corte (Shear strenght)	38
2.2.5.5 Factor de rugosidad (Roughness Factor).....	39
2.2.5.6 Coeficiente de amortiguamiento externo (External damping coefficient)	40
2.2.5.7 Factor de rigidez de contacto normal /cortante (Normal/ Shear Contact stiffness factor)	40
2.2.5.8 Coeficiente de expansión lineal por temperatura (Linear temperature expansión coefficient).....	41
2.2.5.9 Mínimo factor de rigidez por esfuerzo normal/ cortante (Minimun normal/shear stiffness factor).....	41
2.2.5.10 Ratio de rigidez post - fluencia (Post yield stiffness ratio)	41
2.2.5.11 Ratio de esfuerzo último / de fluencia (Ultimate/yield stress ratio)	42
2.2.5.12 Factor de atenuación de falla (Failure softening factor)	43
2.2.5.13 Factor de esfuerzo por cortante (Shear Stress Weight).....	43
2.3 Modelos constitutivos de los materiales.....	44
2.3.1 Modelo de Maekawa.....	44
2.3.2 Modelo de Menegotto de acuerdo con Bosco et al.....	46
Capítulo 3	51
Experimento de Leonhardt y Walther.....	51
3.1 Alcance del estudio	51
3.2 Características de las vigas escogidas para la simulación	51
3.3 Propiedades de los materiales	53
3.3.1 Propiedades del concreto.....	53
3.3.2 Propiedades del acero.....	53

3.4 Resultados del experimento.....	53
3.4.1 Patrones de agrietamiento y tipos de falla	53
3.4.2 Deflexiones	58
3.4.3 Anclaje -Deslizamiento	59
3.4.4 Resistencia al corte y esfuerzo de cortante	59
Capítulo 4	61
Simulación numérica de vigas simplemente apoyadas con ELS	61
4.1 Geometría de los especímenes	61
4.2 Propiedades del concreto en ELS	61
4.3 Propiedades del acero en ELS	62
4.3.1 Matriz de sensibilidad	63
4.4 Mallado.....	71
4.5 Naturaleza de la carga aplicada.....	73
4.5.1 Tipo de carga	73
4.5.2 Etapas de carga.....	73
4.6 Condiciones de borde.....	75
4.6.1 Restricción de los grados de libertad	76
4.6.2 Conectividad de elementos.....	77
4.7 Resumen del programa de simulación.....	77
4.8 Resultados	82
4.8.1 Test 1	82
4.8.2 Test 2	86
4.8.3 Test 3	90
4.8.4 Test 4	94
4.8.5 Test 5	98
4.8.6 Test 6	102
4.8.7 Test 7	106
4.8.8 Test 8	110
4.8.9 Test 9	114
4.8.10 Vigas de Leonhardt y Walther	117
4.8.11 Exploración adicional del <i>contact spring unloading stiffness factor</i>	122
Conclusiones.....	129
Recomendaciones	133
Referencias bibliográficas.....	135



Lista de tablas

Tabla 1. Contraste entre las principales características de AEM y FEM	31
Tabla 2. Información de la geometría de las vigas escogidas del experimento.....	52
Tabla 3. Resistencia a compresión del concreto	53
Tabla 4. Propiedades del acero de refuerzo	53
Tabla 5. Valores de carga de rotura, momento de flexión y esfuerzo cortante.	60
Tabla 6. Propiedades variables del concreto	62
Tabla 7. Propiedades comunes del concreto en todas las vigas	62
Tabla 8. Propiedades del acero de las placas de carga y apoyos.....	63
Tabla 9. Propiedades en ELS del acero de estribos y refuerzo longitudinal.	63
Tabla 10. Propiedades comunes del concreto en el test 1	65
Tabla 11. Propiedades en ELS del acero de estribos y refuerzo longitudinal en el test 1.	65
Tabla 12. Propiedades en ELS del acero de estribos y refuerzo longitudinal en el test 2.	66
Tabla 13. Propiedades comunes del concreto en ELS para el test 2.....	66
Tabla 14. Propiedades comunes del concreto en ELS para el test 3.....	67
Tabla 15. Propiedades en ELS del acero de estribos y refuerzo longitudinal para el test 3. ...	67
Tabla 16. Propiedades en ELS del acero de estribos y refuerzo longitudinal para el test 4. ...	68
Tabla 17. Propiedades comunes del concreto en ELS para el test 4.....	68
Tabla 18. Propiedades comunes del concreto en ELS para el test 5.....	69
Tabla 19. Propiedades en ELS del acero de estribos y refuerzo longitudinal para el test 5	69
Tabla 20. Propiedades en ELS del acero de estribos y refuerzo longitudinal para el test 6. ...	70
Tabla 21. Propiedades comunes del concreto en ELS para el test 6.....	70
Tabla 22. Propiedades en ELS del acero de estribos y refuerzo longitudinal para el test 7	71
Tabla 23. Importancia y uso de etapas de carga en ELS	74
Tabla 24. Resumen del programa de simulación - 1.....	78
Tabla 25. Resumen del programa de simulación - 2.....	79

Tabla 26. Resumen del programa de simulación - 3.....	80
Tabla 27. Resumen del programa de simulación - 4.....	81
Tabla 28. Valores más adecuados de parámetros estudiados hasta el test 7.....	110
Tabla 29. Valores más adecuados de parámetros estudiados hasta el test 8.....	114
Tabla 30. Exploración adicional del contact spring unloading stiffness factor	122



Lista de figuras

Figura 1. Agrietamiento debido a tracción diagonal.....	20
Figura 2. Agrietamiento debido a la falla de adherencia por corte	20
Figura 3. Agrietamiento producido en la falla de compresión por cortante	20
Figura 4. Falla por anclaje.....	21
Figura 5. Agrietamiento en la falla por flexión.....	21
Figura 6. Diagrama de cuerpo libre de una grieta diagonal en una viga sin refuerzo de corte	22
Figura 7. Estado biaxial de esfuerzos en elementos sometidos a fuerza cortante.....	23
Figura 8. Influencia de la cuantía de refuerzo longitudinal en la resistencia al cortante de vigas sin estribos	24
Figura 9. Forma de los elementos en el mallado en AEM.....	27
Figura 10. Discretización de estructuras en AEM y representación de los resortes de concreto (matrix springs)	28
Figura 11. Representación de las barras de refuerzo en el concreto armado.....	29
Figura 12. Modelos de grietas -a) Discrete Crack Method -b) Smeared Crack Approach	30
Figura 13. Comparación entre dominios del AEM y FEM	30
Figura 14. Comparación de resultados experimentales, AEM y FEM	32
Figura 15. Patrón de agrietamiento y primera carga de fisuración	33
Figura 16. Comparación de patrón de agrietamiento de ELS y agrietamiento experimental observado.....	34
Figura 17. Comparación de resultados experimentales de deflexión en el centro de luz con los obtenidos en ELS.....	34
Figura 18. Representación de un estado de carga en el cual los resortes de conexión entre elementos pueden alcanzar su “separation strain”	35
Figura 19. Proceso de separación y recontacto de 2 elementos	36
Figura 20. Relación entre la rigidez de carga y descarga en el contacto de 2 elementos	37
Figura 21. Representación de la disipación de energía durante el contacto de 2 elementos para diferentes valores de “n”	37
Figura 22. Fricción entre 2 elementos cuando hacen contacto.....	38

Figura 23. Envolvente Mohr Coulomb para el concreto sometido a combinación de esfuerzos normales y cortantes.	38
Figura 24. Influencia del residual shear strength en el esfuerzo cortante de una grieta	39
Figura 25. Comportamiento del concreto en compresión, tensión y cortante.	41
Figura 26. Post yield stiffness ratio	42
Figura 27. Curva esfuerzo-deformación del acero	42
Figura 28. Failure softening factor	43
Figura 29. Envolvente del concreto bajo cargas axiales tensión y compresión.....	45
Figura 30. Comportamiento cíclico del acero – Giuffre & Pinto 1970	47
Figura 31. Comportamiento cíclico del acero – Menegotto & Pinto 1973	48
Figura 32. Puntos y zonas notables en la envolvente del modelo de acero de Menegotto-Pinto	49
Figura 33. Disposición del acero de refuerzo longitudinal y detalle de voladizos en las vigas del experimento de Leonhardt y Walther (1962)	52
Figura 34. Configuración experimental para los ensayos de las vigas seleccionadas.....	52
Figura 35. Representación del mecanismo de puntal de compresión.....	54
Figura 36. Viga 1	55
Figura 37. Vigas 2 y 3.....	56
Figura 38. Vigas 4, 5 y 6.....	56
Figura 39. Vigas 7 y 8.....	57
Figura 40. Vigas 9 y 10.....	57
Figura 41. Patrones de agrietamiento de las 10 vigas escogidas.....	58
Figura 42. Curvas carga vs deflexión de vigas 3,5, 7 y 9.....	59
Figura 43. Viga representativa simulada en ELS	61
Figura 44. Ubicación de los ejes globales usados en la simulación de las vigas	71
Figura 45. Mallado representativo de las vigas en estudio.....	73
Figura 46. Proceso de introducción y aplicación de cargas en ELS	75
Figura 47. Creación de condiciones de apoyo de vigas.....	76
Figura 48. Restricción de grados de libertad.....	76
Figura 49. Patrones de agrietamiento del test 1 en ELS para viga 3 ($a/d = 2$).....	82
Figura 50. Rango de deformaciones principales para separation strain del concreto 0.1	83
Figura 51. Patrón de agrietamiento para sep. strain concreto 0.1	83
Figura 52. Contornos de esfuerzos para separation strain del concreto 0.1.....	84
Figura 53. Curvas fuerza - deformación del test 1 (separation strain del concreto – ssc).....	85

Figura 54. Porcentaje de error en el test 1.....	85
Figura 55. Patrones de agrietamiento del test 2 en ELS para viga 3 ($a/d = 2$)	86
Figura 56. Rango de deformaciones principales para separation strain del acero 0.2.....	87
Figura 57. Patrón de agrietamiento sep. Strain acero 0.2	87
Figura 58. Contorno de esfuerzos para separation strain del acero 0.2.....	88
Figura 59. Curvas fuerza - deformación del test 2 (separation strain del acero – ssa).....	89
Figura 60. Porcentaje de error test 2	89
Figura 61. Patrones de agrietamiento del test 3 en ELS para viga 3($a/d=2$).....	90
Figura 62. Deformaciones principales con un friction coefficient del concreto 0.8	91
Figura 63. Patrón de agrietamiento para friction coefficient concreto 0.8	91
Figura 64. Contorno de esfuerzo para un friction coefficient del concreto 0.8	92
Figura 65. Curvas fuerza – deformación del test 3 (friction coefficient del concreto – fcc)....	93
Figura 66. Porcentaje de error test 3	93
Figura 67. Patrones de agrietamiento del test 4 en ELS para viga 3 ($a/d = 2$)	94
Figura 68. Rango de deformaciones principales para un friction coefficient del acero 0.8	95
Figura 69. Patrón de agrietamiento para friction coefficient acero 0.8	95
Figura 70. Contorno de esfuerzo para un friction coefficient del acero 0.8.....	96
Figura 71. Curvas fuerza – deformación del test 4 (friction coefficient del acero – fca).....	97
Figura 72. Porcentaje de error test 4	97
Figura 73. Patrones de agrietamiento del test 5 en ELS para viga 3 ($a/d = 2$)	98
Figura 74. Rango de deformaciones principales en el test 5	99
Figura 75. Patrón de agrietamiento para c.s.u.s.f concreto 2.....	99
Figura 76. Contornos de esfuerzos para un c.s.u.s.f del concreto 2	100
Figura 77. Curvas fuerza - deformación del test 5 (contact spring unloading stiffness factor del concreto – csufc).....	101
Figura 78. Porcentaje de error test 5	101
Figura 79. Patrones de agrietamiento del test 6 en ELS para viga 3 ($a/d = 2$)	102
Figura 80. Rango de deformaciones principales en el test 6	103
Figura 81. Patrón de agrietamiento para c.s.u.s.f acero 2	103
Figura 82. Contornos de esfuerzos para un c.s.u.s.f del acero 2	104
Figura 83. Curvas fuerza - deformación del test 6 (contact spring unloading stiffness factor del acero – csusfa).....	105
Figura 84. Porcentaje de error test 6	105
Figura 85. Patrones de agrietamiento del test 7 en ELS para viga 3 ($a/d = 2$).....	106

Figura 86. Rango de deformaciones principales en el test 7	107
Figura 87. Patrón de agrietamiento para u.y.s.r igual a 1.4.....	107
Figura 88. Contornos de esfuerzo para un u.y.s.r igual a 1.4.....	108
Figura 89. Curvas fuerza – deformación del test 7 (Ultimate yield stress ratio – uysr).....	109
Figura 90. Porcentaje de error test 7	109
Figura 91. Patrones de agrietamiento del test 8 en ELS para la viga 3 (a/d =2)	111
Figura 92. Rango de deformaciones principales en el test 8	111
Figura 93. Patrón de agrietamiento para el mallado mediano	112
Figura 94. Contornos de esfuerzos para un mallado mediano	112
Figura 95. Curvas fuerza – deformación del test 8 y experimentales.....	113
Figura 96. Porcentaje de error test 8	113
Figura 97. Patrones de agrietamiento del test 9 en ELS para la viga 3 (a/d =2)	115
Figura 98. Curvas fuerzas – deformación del test 9 y experimentales.	116
Figura 99. Porcentaje de error test 9	117
Figura 100. Patrones de agrietamiento – c.s.u.s.f concreto 2 – c.s.u.s.f acero 2	118
Figura 101. Contornos de deformación principal – c.s.u.s.f concreto 2 – c.s.u.s.f acero 2 ...	119
Figura 102. Contornos de esfuerzos normales – Vigas de Leonhardt y Walther.....	120
Figura 103. Curvas fuerza – deformación de vigas 3,5, 7 y 9.....	121
Figura 104. Porcentajes de error máximo en las vigas con mayor información experimental disponible.....	121
Figura 105. Patrones de agrietamiento – c.s.u.s.f concreto 0 – c.s.u.s.f acero 2	123
Figura 106. Contornos de deformación principal - c.s.u.s.f concreto 0 – c.s.u.s.f acero 2 ...	123
Figura 107. Curvas fuerza vs deformación de la simulación adicional 1.....	124
Figura 108. Patrones de agrietamiento – c.s.u.s.f concreto 10 – c.s.u.s.f acero 10	125
Figura 109. Contornos de deformación – c.s.u.s.f concreto 10 – c.s.u.s.f acero 10	125
Figura 110. Curvas fuerza vs deformación – simulación adicional 2	126
Figura 111. Porcentajes de error de las simulaciones adicionales e inicial	127

Introducción

En una viga simplemente apoyada, sin refuerzo de corte, sección constante y bajo cargas estáticas puntuales existe interacción entre la flexión y el cortante, por lo que no se puede tratar independientemente una de la otra. Esta situación hace posible que pueda desarrollarse desde una falla por cortante de tipo frágil, de naturaleza repentina y súbita, hasta una falla por flexión que puede ser, tanto de tipo frágil como dúctil. La complejidad de la falla que puede presentarse en este tipo de elementos, se ve incrementada cuando, a las condiciones mencionadas líneas arriba se adiciona la influencia del cambio en la esbeltez. Esto se refleja en los patrones de agrietamiento difíciles de predecir que se desarrollan en la viga, y que pueden deberse a tracción diagonal, adherencia por cortante y compresión por cortante.

Dependiendo del nivel de esbeltez, las vigas simplemente apoyadas de concreto armado pueden tener un comportamiento dominado por el cortante, por la flexión, o por una combinación de ambos. Cuando el cortante tiene una participación relevante en la falla, el comportamiento se caracteriza por la presencia de grietas diagonales y por una naturaleza frágil. Simular la complejidad de fallas dominadas por cortante o por cortante – flexión, es un reto para los softwares tradicionales basados en los elementos finitos. El método de análisis que se usa mayoritariamente en la actualidad es el FEM (*Finite Element Method*), el cual, a pesar de sus ventajas presenta limitaciones para mostrar el tipo de falla de elementos estructurales y la ubicación de grietas, debido a la naturaleza del mallado del método que no permite la separación de elementos.

En esta tesis se simuló 10 vigas de concreto armado con diferente esbeltez usando el software *Extreme Loading for Structures* (ELS) basado en el *Applied Element Method* (AEM). Las vigas fueron simplemente apoyadas, sin refuerzo de corte, sección transversal constante y bajo cargas estáticas puntuales. ELS es un software basado en AEM que es una técnica de modelación innovadora para el análisis estructural. Las simulaciones con AEM son capaces de reproducir la separación de elementos en su mallado lo cual representa un importante valor agregado para investigaciones enfocadas en un comportamiento complejo como el del cortante.

La presente investigación fue principalmente de carácter cualitativo, dado que, se compararon visualmente los patrones de agrietamiento obtenidos en ELS con los

experimentales. Sin embargo, este trabajo tuvo cierto alcance cuantitativo, ya que se comparó los valores de las curvas “fuerza – deformación” brindadas por el software con las disponibles del experimento original. Se abordó la tesis mediante tres etapas. La primera fue la revisión de trabajos de investigación que expliquen la complejidad del comportamiento a cortante y fallas relacionadas, además de trabajos con AEM en este tipo de elementos, con las características y condiciones mencionadas. La segunda fue la recopilación de información y desarrollo de habilidades para el dominio del ELS, que permitieron una adecuada representación de la geometría de las vigas, propiedades de los materiales y condiciones de borde. La tercera etapa fue la simulación con ELS de las vigas mencionadas, además de la calibración y ajustes necesarios en las propiedades de los materiales, condiciones de borde y otros parámetros que posibiliten una adecuada representación del comportamiento y posterior comparación y análisis de los patrones de agrietamiento y curvas fuerza – deformación con los resultados experimentales disponibles. Finalmente se tuvo la interpretación de resultados y presentación de conclusiones.



Capítulo 1

Comportamiento a cortante en vigas simplemente apoyadas bajo cargas estáticas puntuales

1.1 Importancia del comportamiento a cortante

Dependiendo del nivel de esbeltez, las vigas simplemente apoyadas de concreto armado pueden tener un comportamiento dominado por el cortante, por la flexión, o por una combinación de ambos. Cuando el cortante tiene una participación relevante en la falla, el comportamiento se caracteriza por la presencia de grietas diagonales y por una naturaleza frágil. La mayor parte de los miembros estructurales de concreto reforzado no pueden escapar de tener que resistir fuerzas cortantes, las cuales en realidad actúan en combinación con momentos de flexión y posiblemente torsión. En consecuencia, es difícil estudiar independientemente el comportamiento del elemento bajo dicha sollicitación.

La transmisión de esfuerzos cortantes en las vigas de concreto armado está vinculada de la resistencia a tracción y compresión del concreto. Por lo tanto, cuando dichas resistencias son superadas, el elemento puede desarrollar distintos patrones de agrietamiento, difíciles de predecir y que posteriormente podrían hacer que el elemento falle.

1.2 Tipos de falla relacionados al cortante

Los tipos de falla a cortante en vigas de concreto armado, simplemente soportadas, bajo cargas estáticas puntuales y sin refuerzo de corte, se clasifican según las características del agrietamiento que eventualmente podría hacer que el elemento colapse. A continuación, se describen las principales fallas según Wigth & MacGregor (2012) relacionadas al cortante en vigas con las características y condiciones mencionadas.

1.2.1 Tracción diagonal

En este tipo de falla, la grieta se produce súbitamente, sin previo aviso, en una sola etapa de carga y se extiende hasta causar el colapso del elemento. Esta falla es esperada en elementos poco esbeltos, es decir, en vigas de luz corta. En la **Figura 1** se muestra el patrón esperado de agrietamiento que se desarrolla en esta falla.

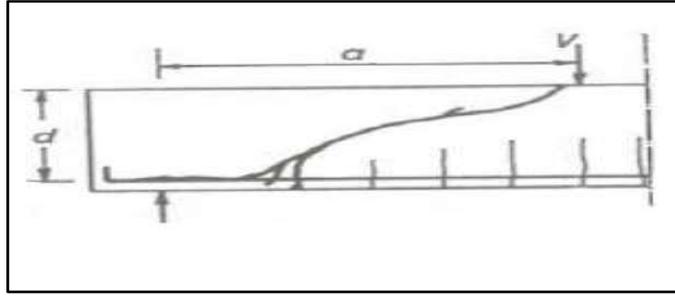


Figura 1. Agrietamiento debido a tracción diagonal

Fuente: Kong & Evans (1975)

1.2.2 Adherencia por cortante

Se le conoce también como falla de tensión por corte, se produce de manera progresiva en varias etapas de carga cuando el agrietamiento inclinado alcanza el acero de refuerzo y la grieta se vuelve paralela al eje longitudinal de la viga, destruyendo la adherencia existente entre las barras de acero y el concreto que las rodea. En la **Figura 2** se muestra el agrietamiento que se produce debido a la falla de adherencia por corte.

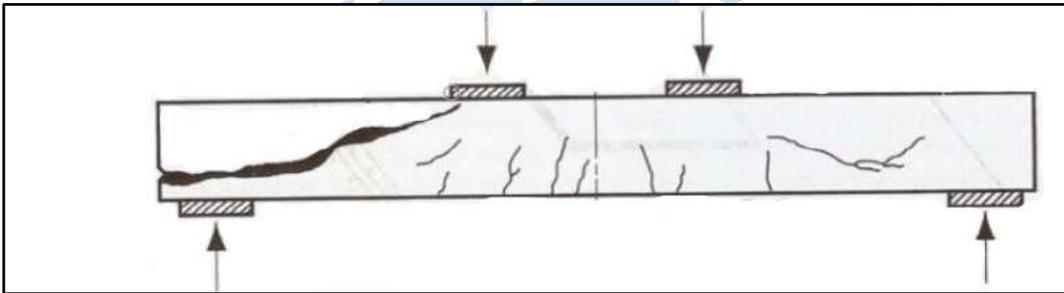


Figura 2. Agrietamiento debido a la falla de adherencia por corte

Fuente: Gonzales Cuevas & Robles Fernández-Villegas (2005)

1.2.3 Compresión por cortante

La grieta inclinada se desarrolla gradualmente en varias etapas de carga, normalmente aparece como una extensión de una grieta iniciada previamente por la flexión. El colapso del elemento se produce finalmente por el aplastamiento de la zona comprimida en el extremo de la grieta inclinada, tal como se muestra a continuación en la **Figura 3**.

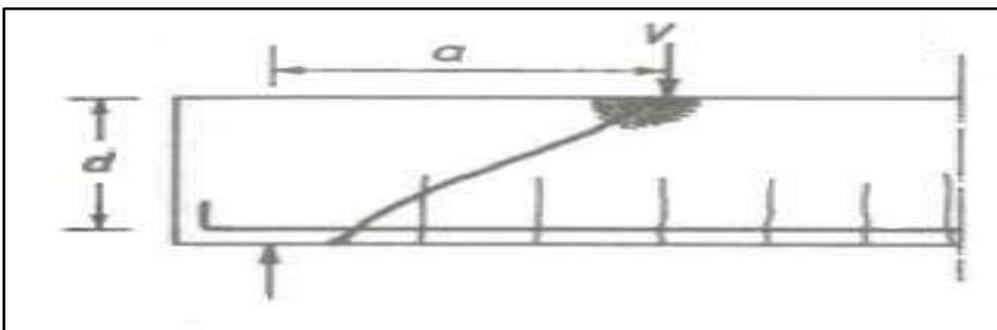


Figura 3. Agrietamiento producido en la falla de compresión por cortante

Fuente: Kong & Evans (1975)

1.2.4 Anclaje

Se produce cuando hay deslizamiento del refuerzo longitudinal respecto al concreto que lo rodea, debido a concentraciones de esfuerzo de tensión. El agrietamiento que se origina es horizontal a lo largo del acero de refuerzo, de manera que puede extenderse a lo largo de toda la viga, ocasionando que ésta reduzca drásticamente su capacidad de resistir flexión. En la **Figura 4** se ilustra la falla por anclaje.

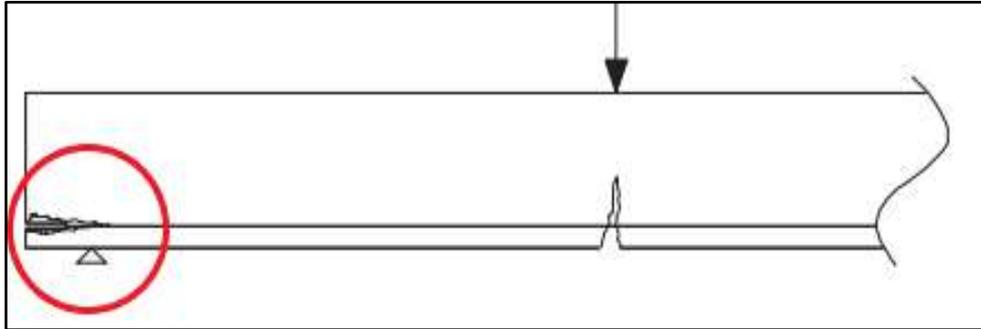


Figura 4. Falla por anclaje

Fuente: Wigh & MacGregor (2012)

1.2.5 Flexión

En este tipo de falla las grietas que se producen son principalmente perpendiculares al eje longitudinal del elemento. Esta falla es esperada en vigas con gran esbeltez donde los elementos normalmente desarrollan su capacidad de flexión antes de sobrevenir la falla por corte. En la **Figura 5** se puede observar el patrón de agrietamiento esperado en una viga que falla a flexión.

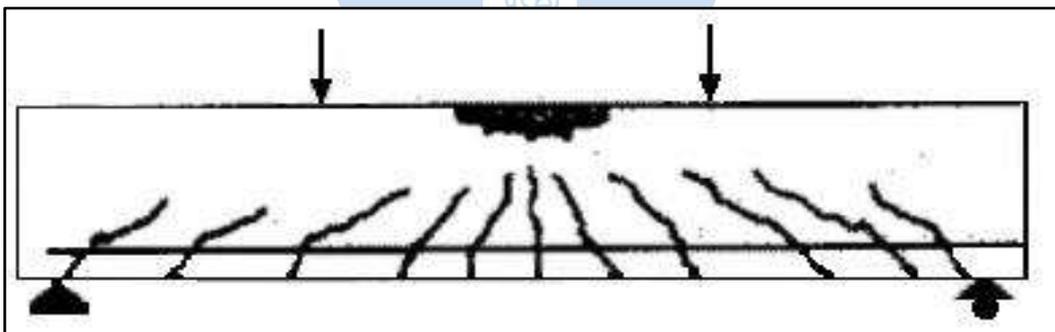


Figura 5. Agrietamiento en la falla por flexión

Fuente: Wigh & MacGregor (2012)

1.3 Parámetros que influyen en el comportamiento a cortante

La complejidad del comportamiento a cortante hace que, el uso adecuado de conceptos clásicos de esfuerzo cortante en cuerpos homogéneos, isotrópicos y elásticos proporcione predicciones aceptables respecto a resistencia y a la formación de grietas. Sin embargo, con el desarrollo de grietas se origina un patrón esfuerzos sumamente complejo. Al grado que en esta etapa muchas ecuaciones que actualmente se utilizan tienen poco que ver con el comportamiento real. (Park & T., 1988)

La aparición de grietas diagonales es un fenómeno difícil de estudiar debido a la influencia de diferentes factores que influyen en el correcto desempeño del elemento ante fuerzas cortantes. En la **Figura 6** se muestra el diagrama de cuerpo libre de una grieta diagonal en una viga sin refuerzo de corte.

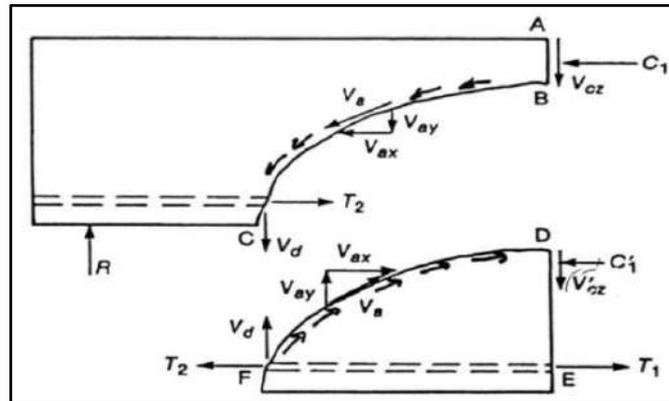


Figura 6. Diagrama de cuerpo libre de una grieta diagonal en una viga sin refuerzo de corte

Fuente: Kong & Evans (1975)

Para que exista equilibrio según la figura anterior se debe cumplir que:

$$V_c = V_{cz} + V_d + V_{ay} \quad \text{Ecuación 1}$$

V_{cz} : Fuerza cortante que toma el concreto comprimido. Representa únicamente entre el 20% y el 40% de la resistencia total

V_d : Fuerza cortante que toma el acero longitudinal por acción de dovela. Representa entre el 15% y el 25% del cortante total.

V_{ay} : Fuerza cortante que se transfiere por la interacción o trabazón entre los agregados a lo largo de la grieta inclinada.

Como consecuencia de la dificultad para el cálculo individual de V_{cz} , V_d y V_{ay} el diseño suele basarse en el valor de la resistencia nominal del concreto " V_c ", que es un valor muy conservador producto del ajuste de los resultados de numerosos ensayos en vigas sin refuerzo en el alma.

La Norma E.060 acepta la siguiente ecuación para el cálculo de la resistencia nominal del concreto.

$$V_c = 0.53\sqrt{f'c} b_w d \quad \text{Ecuación 2}$$

$f'c$: Resistencia a compresión del concreto (kg/cm^2)

b_w : Ancho de la viga (cm)

d : Peralte efectivo de la viga (cm)

V_c : Resistencia nominal del concreto (kg)

1.3.1 Resistencia a tracción del concreto

La carga de agrietamiento diagonal es una función de la resistencia a la tracción del concreto, f_{ct} . El estado de esfuerzos en el alma de la viga involucra esfuerzos de tensión y compresión biaxiales, como se muestra en la **Figura 7**.

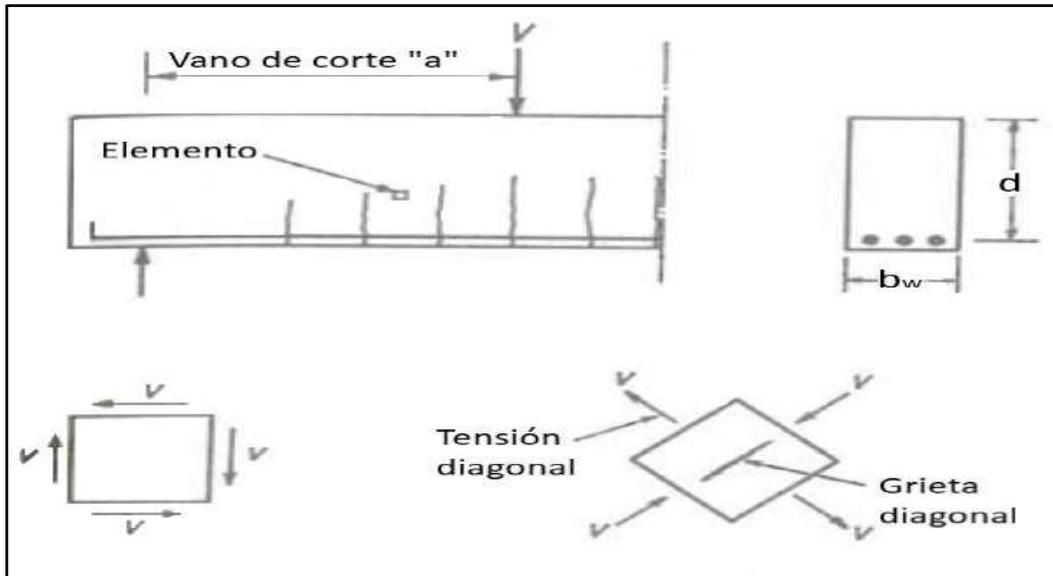


Figura 7. Estado biaxial de esfuerzos en elementos sometidos a fuerza cortante
Fuente: Kong & Evans (1975)

1.3.2 Cuantía de acero longitudinal por flexión

Cuando la cuantía es pequeña las grietas de flexión se extienden más alto en la viga y se abren más ancho que en el caso de valores más grandes de cuantía. Un incremento en el ancho de las grietas causa una disminución en el valor de los componentes de cortante que son transferidos a través de las grietas inclinadas por los esfuerzos cortantes en las superficies de las grietas. Eventualmente, la resistencia a lo largo de la grieta cae por debajo de la requerida para resistir las cargas y la viga falla repentinamente en cortante.

A mayor cuantía de acero longitudinal del elemento tendrá menos grietas de flexión (verticales) y en consecuencia se reduce el agrietamiento de flexión – cortante, las grietas de flexión serán más delgadas y esto permitirá que el mecanismo de trabazón entre los agregados, así como el mecanismo de dovela puedan soportar cargas mayores. En la **Figura 8** se ilustra la influencia de la cuantía de refuerzo longitudinal en la resistencia al cortante de vigas sin estribos.

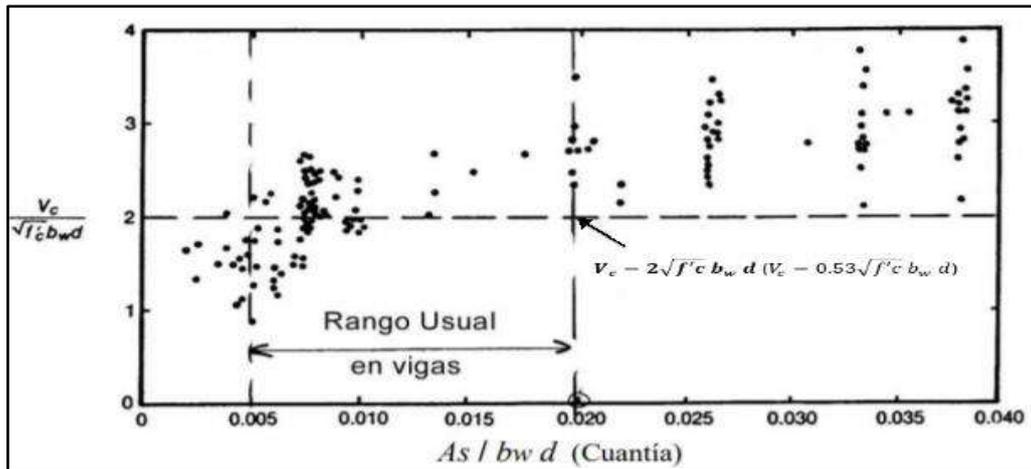


Figura 8. Influencia de la cuantía de refuerzo longitudinal en la resistencia al cortante de vigas sin estribos

Fuente: American Concrete Institute (1978)

1.3.3 Esbeltez del elemento

La esbeltez en este tipo de vigas se cuantifica según la relación a/d , donde “ a ” es la distancia horizontal desde el punto de aplicación de la carga hasta el apoyo y “ d ” es el peralte efectivo del elemento.

En vigas esbeltas ($a/d > 6$) por lo general predomina la falla por flexión, es decir el elemento puede desarrollar su capacidad de flexión antes de sobrevenir la falla por corte. Las fisuras se desarrollan principalmente perpendiculares al eje longitudinal de la viga, con ligera inclinación de fisura por corte. La falla se produce por aplastamiento de la zona de compresión por flexión, sin falla por cortante.

Las vigas con a/d entre 2.5 y 6 tienden a fallar por cortante antes de alcanzar su capacidad de flexión. La falla se caracteriza por grietas muy inclinadas que se extienden a lo largo de las barras longitudinales inferiores, que se inician desde la parte inferior de la viga. Tales fallas pueden ser especialmente frágiles. Las grietas inclinadas primarias también pueden penetrar la zona de compresión por flexión, lo que conduce a la falla de la zona de compresión.

Las vigas con a/d entre 1 y 2.5 tienden a formar una grieta diagonal que no es una extensión de una grieta de flexión. Bajo cargas sostenidas la grieta es estable, al aumentar la carga la grieta progresa hacia la zona de compresión pudiendo causar una falla explosiva.

1.3.4 Presencia de cargas axiales

Las fuerzas axiales de tracción tienden a disminuir la carga de agrietamiento diagonal, mientras que las cargas axiales de compresión tienden a incrementarla. A medida que aumenta la fuerza de compresión axial, se retrasa la aparición de grietas por flexión y las grietas de flexión no penetran tanto en la viga. Las fuerzas de tensión axiales aumentan directamente el esfuerzo de tensión, y por lo tanto la deformación, en el refuerzo longitudinal.

Esto causa un incremento en el ancho de la grieta inclinada, lo cual a su vez, da como resultado una disminución del esfuerzo de tensión de corte máximo, que se puede transmitir a través de la fisura.

1.3.5 Tipo de agregado

El tipo de agregado tiene influencia en el mecanismo de trabazón de los agregados. Por este motivo, la resistencia al corte de los concretos livianos es menor que la de los concretos de peso normal, aun cuando ambos tengan la misma resistencia de compresión

1.3.6 Ubicación de los puntos de corte de la armadura de flexión

En los puntos de corte de las armaduras se produce concentración de esfuerzos que favorece el inicio del agrietamiento diagonal.

1.3.7 Profundidad de la viga

A medida que se incrementa el peralte de una viga, la fuerza cortante que origina el agrietamiento diagonal se reduce. Esto se debe a que el tamaño de la grieta por encima del refuerzo principal de flexión tiende a crecer en vigas de gran peralte. Este efecto reduce la trabazón entre los agregados a cada lado de la grieta. En vigas con refuerzo en el alma el tamaño de las grietas inclinadas está controlado por el refuerzo, de tal modo que no debería ocurrir una reducción importante por efecto del tamaño de la viga.

1.3.8 Tamaño del agregado grueso

Cuando el tamaño del agregado grueso incrementa, la rugosidad de la superficie de la grieta también lo hace, permitiendo que esfuerzos de corte más altos sean transmitidos a través de las grietas.



Capítulo 2

Applied element method

2.1 Applied element method

El *Applied Element Method* (AEM por sus siglas en inglés) es una herramienta de análisis estructural desarrollada recientemente por Kimiro Meguro an Hatem Tagel-Dim en 1997.

Este método parte de métodos basados en el *Discrete Analysis* tales como el *Distinct Element Method* que simula el comportamiento mecánico de materiales discontinuos como el suelo y la roca, *Modified Distinct Method* que analiza las grietas del concreto y *Extended Distinct Element Method*, extensión del primer método para simular las grietas por flexión en el cual se utilizan elementos esféricos o circulares para representar el agregado del concreto. (Meguro K. , 2001)

2.1.1 Características del AEM

En AEM, la estructura es discretizada en un grupo de elementos con forma de cubo. Una o más caras de estos elementos pueden deformarse en una línea o en un punto, por tanto, se pueden obtener distintos solidos geométricos para el mallado.

En la **Figura 9** se muestra la forma de los elementos en el mallado característico en el *applied element method* (AEM).

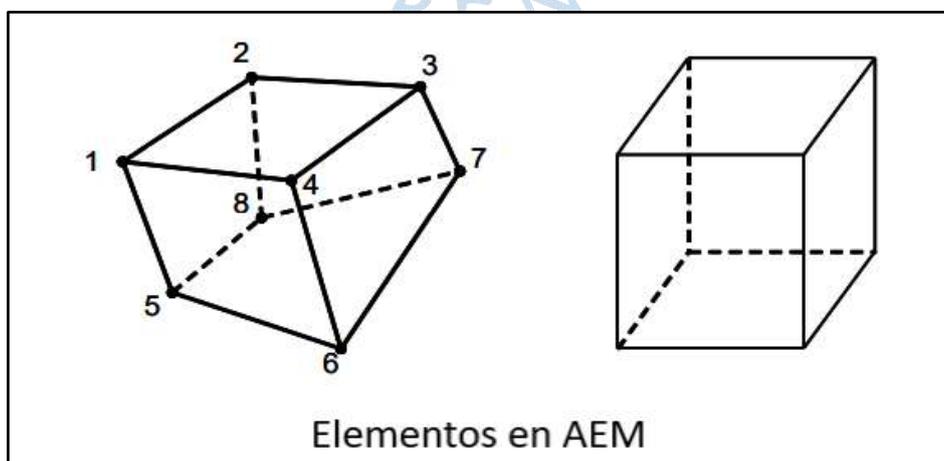


Figura 9. Forma de los elementos en el mallado en AEM

Fuente: Applied Science International (2018)

Los elementos están conectados por un arreglo de resortes normales y cortantes, que están distribuidos en las caras adyacentes de los elementos. Los resortes normales resisten esfuerzos normales mientras que los resortes cortantes resisten esfuerzos cortantes.

La deformación de cada resorte es comparada con su límite permitido. Si la deformación en un resorte excede este límite, es desprendido y no se considera más en el análisis. Después de una búsqueda completa, una nueva matriz de rigidez sin la contribución del resorte roto es evaluada. El proceso para encontrar los resortes rotos, actualizando la matriz de rigidez y analizado la estructura permite que el fenómeno de propagación de grietas pueda ser estudiado con precisión.

El concreto armado es modelado como un ensamblaje de distintos elementos dividiendo la estructura virtualmente. Estos elementos están conectados por resortes distribuidos en las direcciones normal y tangencial. Las barras de refuerzo están modeladas como resortes continuos conectando elementos juntos. La falla local del concreto es modelada por la falla de los resortes que conectan los elementos cuando el esfuerzo calculado de las fuerzas actuando en los resortes excede el esfuerzo crítico.

En la **Figura 10** se observa la forma en la que se discretizan las estructuras en AEM y la representación de los resortes de concreto.

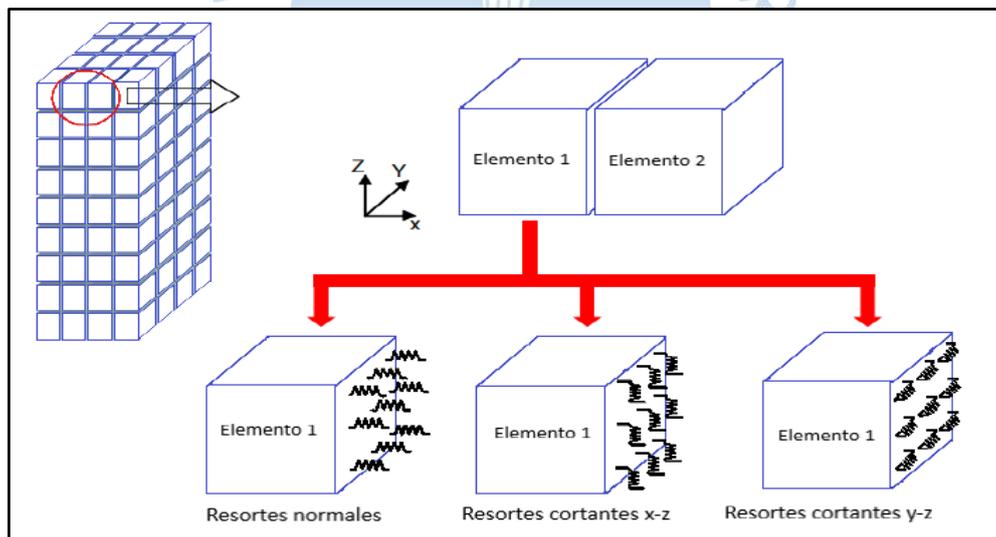


Figura 10. Discretización de estructuras en AEM y representación de los resortes de concreto (matrix springs)

Fuente: Applied Science International (2018)

En la simulación del concreto armado existen 2 tipos de resortes: *matrix springs* y *reinforcement springs*, representando cada uno al concreto y al acero de refuerzo respectivamente. En la **Figura 10** se muestra la forma en que se representa en ELS el concreto mediante resortes (*matrix springs*), a los cuales se les asigna las propiedades del material. Por otro lado, el acero de refuerzo se representa mediante resortes que no solamente están en

las caras adyacentes de los elementos. En la **Figura 11** se ilustra con detalle la simulación de los resortes de acero (*reinforcement springs*).

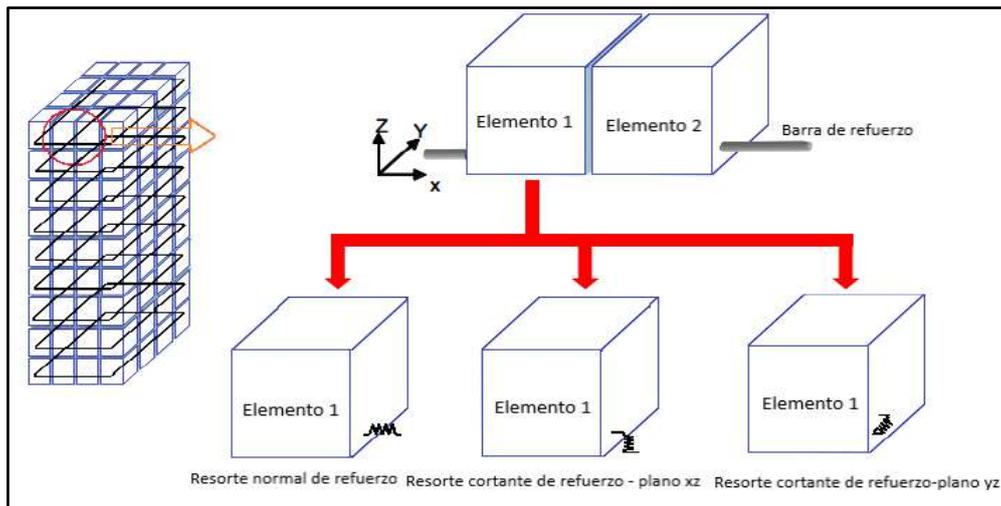


Figura 11. Representación de las barras de refuerzo en el concreto armado

Fuente: Applied Science International (2018)

2.1.2 Contraste entre AEM y FEM

El AEM es un método numérico de análisis estructural similar al FEM. La diferencia viene en la matriz de rigidez la cual se atribuye a la conectividad de los elementos. En el AEM la matriz de rigidez está atribuida a los resortes, mientras que en el FEM está atribuida a los elementos.

La rigidez de los elementos, la posición de los grados de libertad y la conectividad de los elementos es diferente en ambos métodos. Una diferencia básica entre AEM y FEM es que los elementos son rígidos en el AEM pero deformables en el caso del FEM. Los grados de libertad se encuentran en el centro geométrico del elemento en AEM. Esto mantiene los elementos rígidos, simplemente forzando los resortes a su alrededor. La conexión de elementos se logra a través de resortes a lo largo de la cara de los elementos y por nodos en AEM y FEM respectivamente. (Christy, Madhavan Pillai, & Nagarajan, 2020)

El análisis de fracturas de estructuras de concreto armado ha sido principalmente llevado a cabo usando el FEM. Sin embargo, el FEM asume que los elementos están conectados por nodos y en la mayoría de los códigos de FEM, no está permitido que estos nodos se separen durante el análisis. El FEM es apropiado especialmente antes de la generación de agrietamiento extenso. Por otro lado, muchas técnicas han sido desarrolladas para lidiar con las grietas. Estas técnicas, tales como "*Smearred Crack Approach*", asumen que no ocurre separación entre elementos. Los efectos del agrietamiento son solamente considerados en la matriz de rigidez. Por tanto, es difícil seguir la propagación de grietas usando este enfoque. Esto hace difícil la predicción del inicio de la grieta, ubicación, ancho y longitud de grieta. Además, el uso de elementos relativamente grandes hace esta predicción de las propiedades de las grietas aún más compleja. Mientras que el enfoque de "*Discrete*

Crack Method” asume que la ubicación de las grietas y dirección de propagación de las grietas está predefinida, lo cual hace que el estudio del agrietamiento sea incierto. (Applied Science International, 2018)

En la **Figura 12** se puede ver la representación de los métodos que se usan en el FEM para simular las grietas en el concreto.

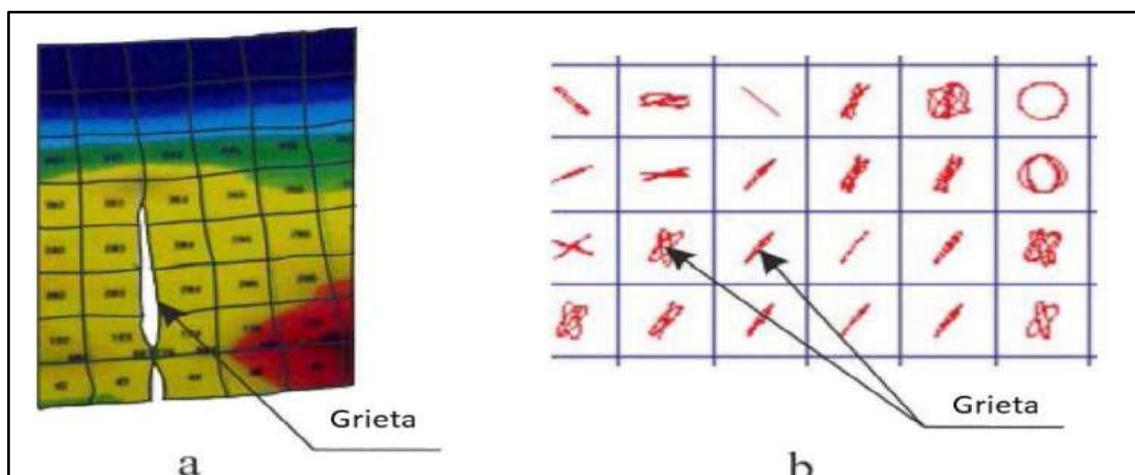


Figura 12. Modelos de grietas -a) Discrete Crack Method -b) Smeared Crack Approach
Fuente: Baetu & Ciongradi (2011)

Una diferencia muy importante del AEM respecto al FEM es su capacidad para representar el colapso progresivo de las estructuras, debido a su naturaleza que permite la separación de elementos. Las estructuras en una situación de colapso pasan por 2 etapas: Una etapa continua seguida de una etapa discreta, siendo el AEM capaz de representar muy bien ambas etapas. En la **Figura 13** se muestra del dominio del AEM comparado con el del FEM.

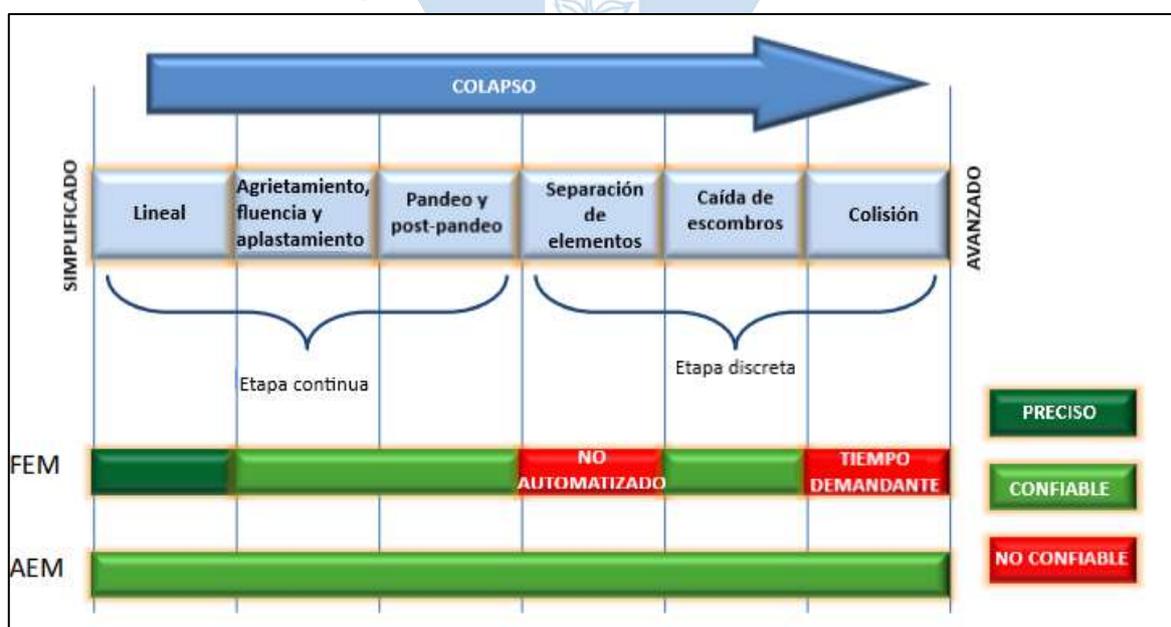


Figura 13. Comparación entre dominios del AEM y FEM

Fuente: Applied Science International (2018)

Para resumir las diferencias entre los 2 métodos de análisis estructural mencionados anteriormente, se muestran en la **Tabla 1** las principales características del *Applied Element Method* en contraste con las del *Finite Element Method*.

Tabla 1. Contraste entre las principales características de AEM y FEM

	AEM	FEM
Tiempo de procesamiento (CPU time)	Corto	Corto
Grados de libertad	Hasta 6 grados de libertad por elemento	Hasta 24 grados de libertad por elemento.
Modelamiento de grietas	Grietas manchadas o <i>smeared cracks</i> (contornos) y grietas discretas (físicas)	Grietas manchadas o <i>smeared cracks</i> (grietas discretas a través de grietas de interfaz cuyas ubicaciones deben estar predefinidas)
	No necesita elementos de interfaz (elementos de unión)	Se necesitan elementos de unión en la ubicación de grietas anchas para simular grietas físicas
	Las grietas se propagan fácilmente en los bordes de los elementos y en cualquier dirección.	Las grietas no pueden extenderse de un elemento a otro, lo cual hace que la estructura sea inseparable en ubicaciones arbitrarias.
	La propagación de grietas puede ser capturada.	La propagación de grietas no puede ser capturada
Tiempo de preprocesamiento	Corto	Largo
Detalles de refuerzo	Se tienen en cuenta todos los detalles del refuerzo, para cada barra de refuerzo. Por ejemplo, se puede tener en cuenta el área de la barra y el recubrimiento del concreto.	Es muy difícil de contabilizar con precisión los detalles del refuerzo de manera adecuada ya que las propiedades deben agregarse en las ubicaciones de los puntos de integración.
Antes del colapso	Precisión alta	Precisión alta
Durante y después del colapso	Precisión alta	No se puede capturar dicho comportamiento

Fuente: Applied Science International (2018)

2.2 Estudios con AEM en vigas de concreto simple o armado

2.2.1 Una nueva técnica eficaz para el análisis de fracturas de estructuras.

En esta investigación, se presentan los resultados de la simulación de 2 vigas pared sin refuerzo de corte y bajo cargas estáticas puntuales. Se concluye que el tipo de análisis es generalmente difícil debido al agrietamiento excesivo el cual ocurre durante la carga. Los resultados obtenidos a través del AEM son comparados con los resultados experimentales y con los resultados del FEM como se muestra en la **Figura 14**. La geometría, condiciones de carga, refuerzo y forma de falla también son mostradas en esta figura. En general, los resultados del modelo propuesto son más precisos que los obtenidos con el FEM. La precisión del FEM disminuye y finalmente resulta imposible aplicar el FEM cuando el radio entre la longitud de la zona de corte y la longitud total de la viga incrementa. La razón es simple porque no se ha usado refuerzo en la zona de corte y, por lo tanto, la sensibilidad al agrietamiento del concreto incrementa.

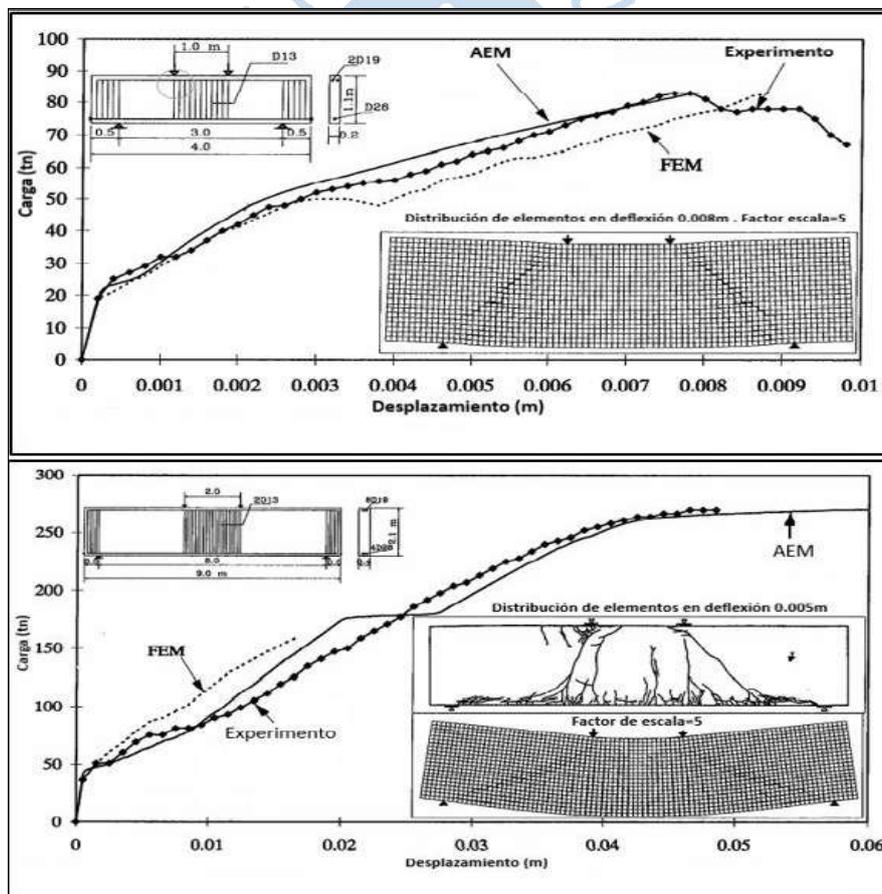


Figura 14. Comparación de resultados experimentales, AEM y FEM
Fuente: Meguro & Tagel-Din (1997)

2.2.2 Patrón de grietas en vigas de concreto simple utilizando el método de elementos aplicados

En este trabajo, se usa el *Applied Element Method* para simular el comportamiento de vigas de concreto simple. El método se usó para determinar la primera carga de fisuración,

patrones de agrietamiento y curvas de fuerza-deformación de vigas de concreto simple con diferentes condiciones de apoyo. El AEM pudo predecir con un grado razonable de precisión el comportamiento.

En la **Figura 15** se muestra una viga simplemente apoyada de concreto sin refuerzo, sección rectangular constante de 200x400 mm, bajo una carga puntual. Los puntos en el centro representan el patrón de agrietamiento, se presenta además la primera etapa de agrietamiento.

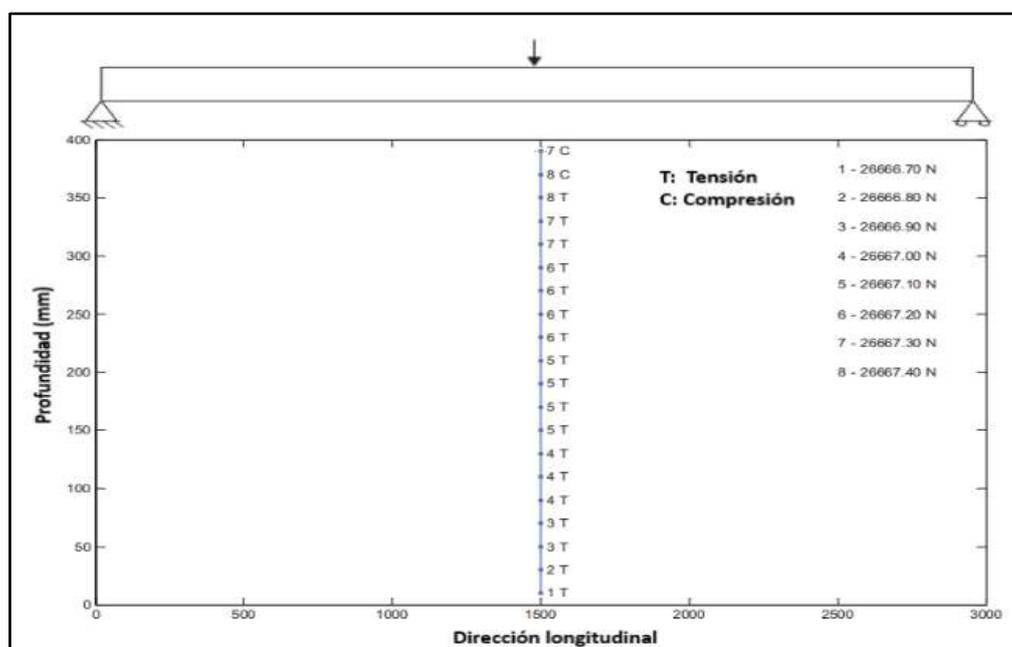


Figura 15. Patrón de agrietamiento y primera carga de fisuración

Fuente: Christy D., Madhavan Pillai, & Nagarajan (2017)

Finalmente se concluye que el AEM puede usarse efectivamente para simular el patrón de agrietamiento en vigas planas de concreto simple. No se puede apreciar la extensión de las grietas debido a que la viga no se carga hasta el colapso, sino solamente hasta instantes después de la aparición de la primera grieta.

AEM predice la primera carga de agrietamiento con buena precisión, ya que experimentalmente se obtuvo 26666.7 N y la primera carga de agrietamiento teórico es 26198.83 N. Es decir, existe un margen de error de 1.79%.

2.2.3 Viga pared de concreto armado sin refuerzo de corte sometida a carga de cuatro puntos

En este trabajo se analiza una viga de concreto armado bajo cargas puntuales sin refuerzo de corte usando *Extreme Loading for Structures* (ELS). Finalmente se compara el patrón de agrietamiento y la curva fuerza- deformación que se obtuvo en ELS con los resultados experimentales.

En la **Figura 16** se visualiza la precisión en la ubicación y extensión de las grietas diagonales, además se puede observar la apertura de las grietas que se muestra como un movimiento de los elementos vecinos alejados unos de otros.

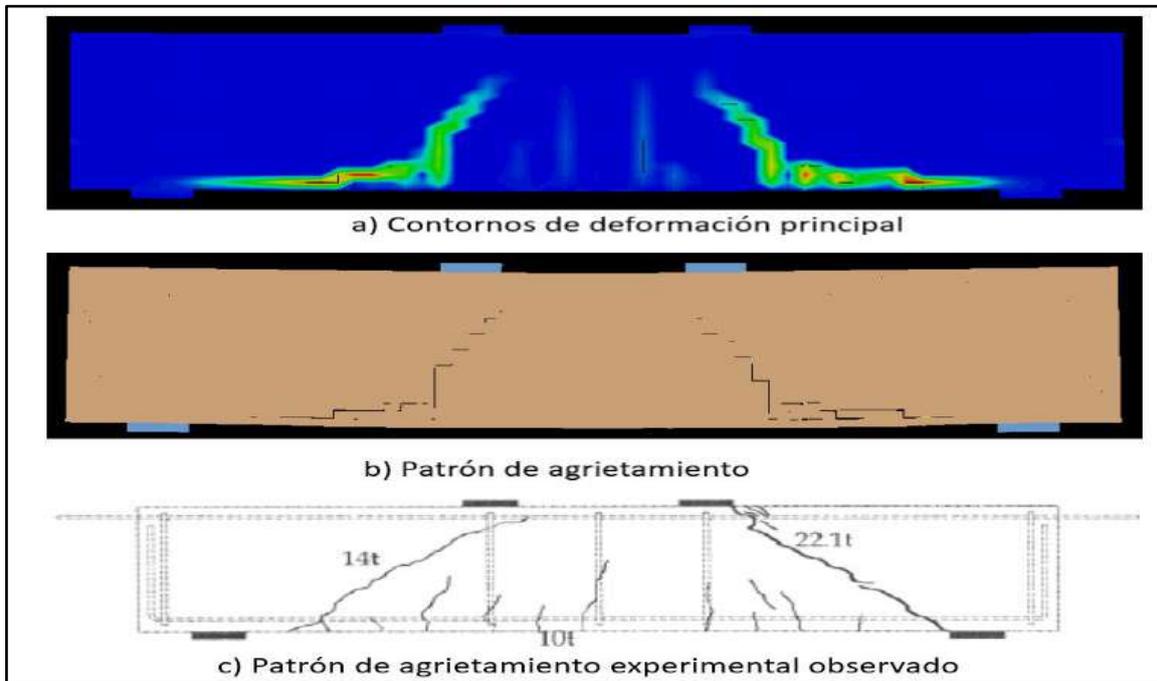


Figura 16. Comparación de patrón de agrietamiento de ELS y agrietamiento experimental observado.

Fuente: Applied Science International (2018)

La **Figura 17** ilustra los resultados analíticos de carga-deflexión obtenidos con ELS en comparación con los experimentales.

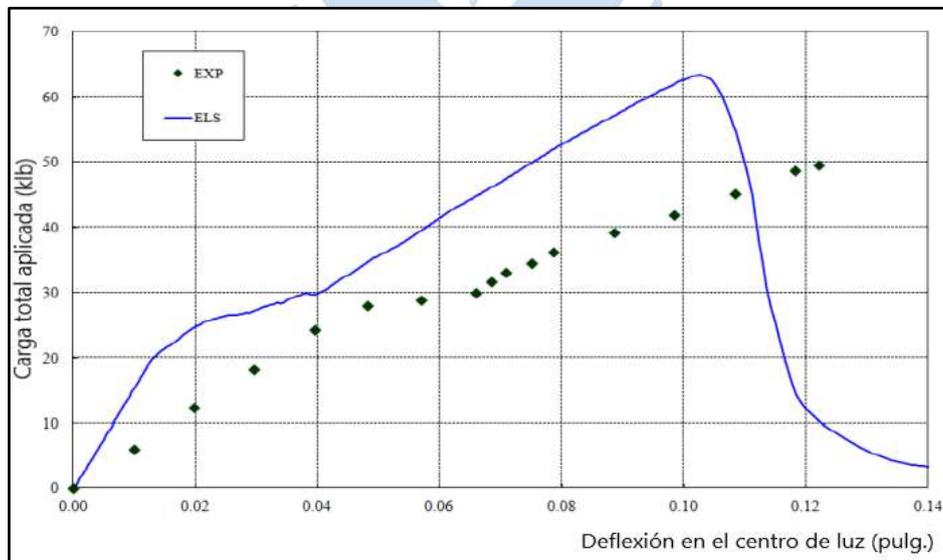


Figura 17. Comparación de resultados experimentales de deflexión en el centro de luz con los obtenidos en ELS.

Fuente: Applied Science International (2018)

2.2.4 Extreme Loading for Structures

Basado en el *Applied Element Method*, la *Applied Science International* (ASI por sus siglas en inglés) ha desarrollado un software llamado “*Extreme Loading for structures*”, con el cual el comportamiento de estructuras bajo cargas extremas tales como terremotos, huracanes, explosiones y otros desastres pueden ser estudiados.

2.2.5 Parámetros característicos del software

2.2.5.1 Deformación de separación (Separation strain)

Es la deformación en la cual el material representado pasa de ser continuo a discreto. Este parámetro es propio del software, y su importancia radica en que la ductilidad del material puede ser controlada de acuerdo con el valor que se le asigne.

Cada material tiene su *separation strain* basado en su deformación última y si la carga es monótona, donde las grietas tienden a mantenerse abiertas, o cíclica donde las grietas podrían cerrarse. Un valor entre 0.1 -0.2 para el *separation strain* es común para la mayoría de los materiales. (Applied Science International, 2018)

En la **Figura 18** se muestra una secuencia de imágenes que ilustran el proceso de separación que experimentan los elementos cuando sus resortes de conexión alcanzan su respectivo *separation strain*.

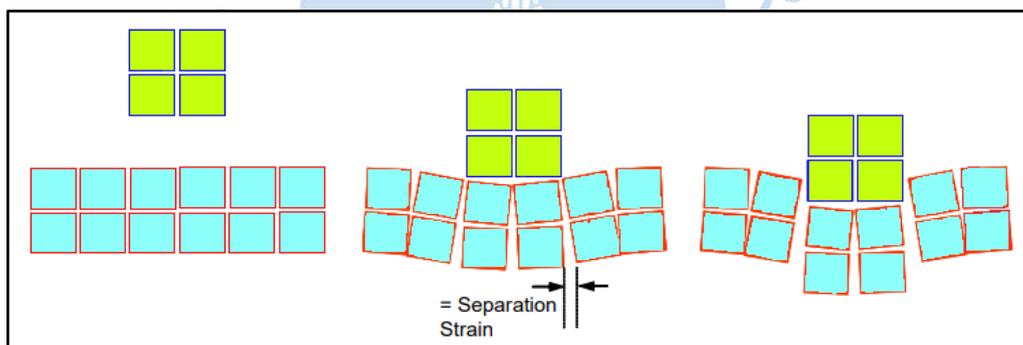


Figura 18. Representación de un estado de carga en el cual los resortes de conexión entre elementos pueden alcanzar su “separation strain”

Fuente: Applied Science International (2018)

Para el concreto armado, cuando se alcanza el *separation strain*, todos los resortes entre las caras adyacentes incluyendo los resortes del acero se cortan. Si los elementos hacen contacto de nuevo, se comportarán como 2 cuerpos rígidos diferentes que hacen contacto por primera vez. Se debe notar que, las barras de acero de refuerzo se cortan si su esfuerzo alcanza el esfuerzo último o si la matriz de resortes (resortes de concreto) alcanza su *separation strain*. (Applied Science International, 2018)

En la **Figura 19** se ilustra el proceso de generación de los resortes de contacto entre 2 elementos, que bajo un determinado estado de carga se separan debido a que sus resortes

de conexión alcanzaron su separation strain. Posteriormente se contactan como cuerpos rígidos independientes.

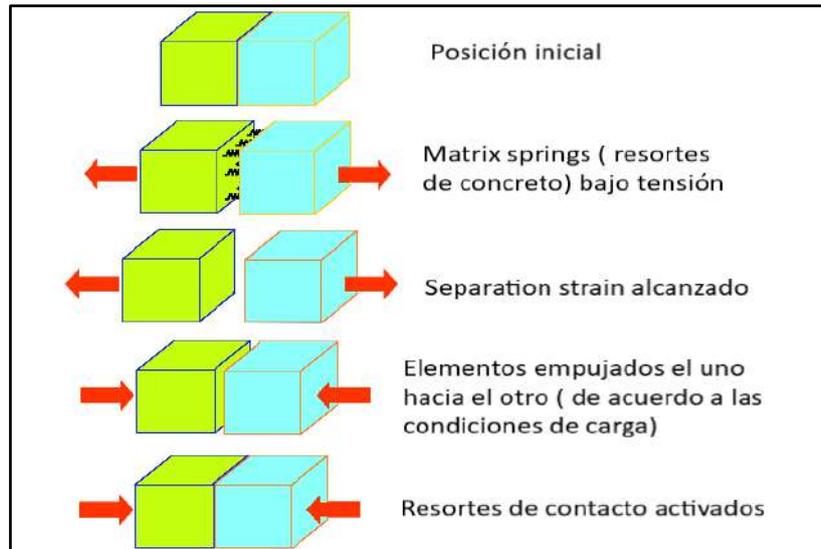


Figura 19. Proceso de separación y recontacto de 2 elementos

Fuente: Applied Science International (2018)

2.2.5.2 Factor de descarga de resorte de contacto (Contact spring unloading stiffness factor)

Cuando ocurre una colisión entre 2 elementos, se pierde una parte de la energía cinética. Para representar esto, ELS hace uso del parámetro “n” para cuantificar la disipación de energía que se produce durante el proceso de contacto entre elementos (**Figura 21**).

La relación carga desplazamiento de un resorte durante la carga (acercamiento entre elementos) y descarga (alejamiento) se muestra en la **Figura 20**. EL factor “n” representa la relación entre la rigidez de carga y descarga. El valor “n” debe ser mayor que 1. Tener n igual a 1 significa que no hay disipación de energía durante el proceso de contacto y que los elementos rebotarán con la misma velocidad antes de la colisión. El valor de 10 significa que la energía del elemento que se disipa durante el proceso de contacto es 90% y que solamente el 10% se recupera. Este valor se decide por criterio del usuario, sin embargo, el valor de 10 es razonable si el usuario no tiene una estimación de un valor más preciso. (Applied Science International, 2006)

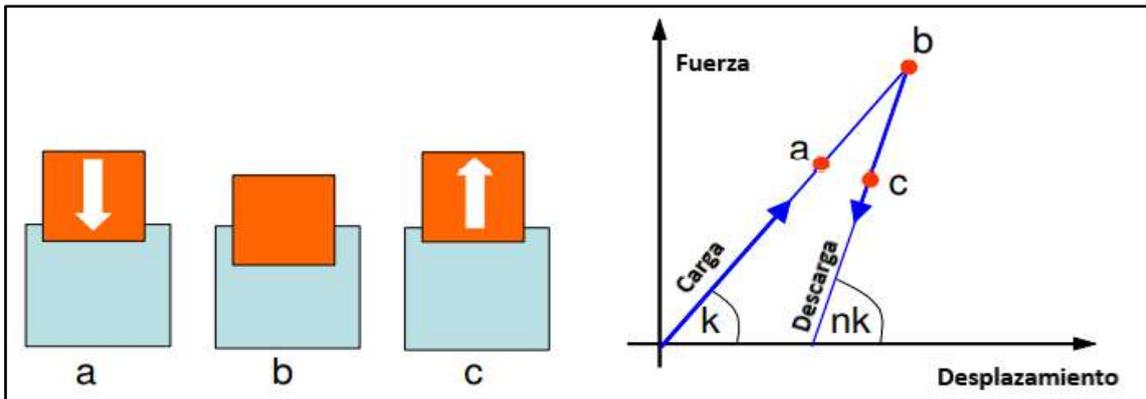


Figura 20. Relación entre la rigidez de carga y descarga en el contacto de 2 elementos
Fuente: Applied Science International (2006)

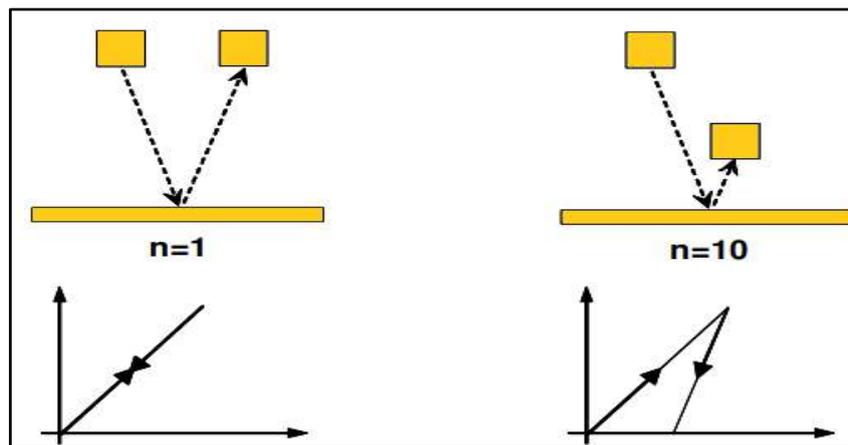


Figura 21. Representación de la disipación de energía durante el contacto de 2 elementos para diferentes valores de "n"
Fuente: Applied Science International (2006)

En todas las versiones del ELS anteriores a la 6, el análisis de contacto estaba solo permitido para análisis dinámicos. En la versión 6 de ELS, el análisis de contacto es ahora calculado durante un análisis estático.

Esto tiene su aplicación en algunos casos estáticos cuando la falla de compresión ocurre, y la estructura pierde toda su resistencia debido a la falta de resistencia a la compresión. Con esta característica el contacto ayuda agregando resistencia post falla, permitiendo que el análisis continúe para deformaciones más grandes en vez de dar inestabilidad.

2.2.5.3 Coeficiente de fricción (Friction coefficient)

Este coeficiente está disponible para todos los materiales. El coeficiente de fricción es un importante factor para calcular la envolvente de la falla corte-compresión, así como también la fricción entre diferentes elementos en contacto como se muestra en la **Figura 22**. En otras palabras, es efectivo cuando se generan los resortes de contacto entre elementos. (Applied Science International, 2018)

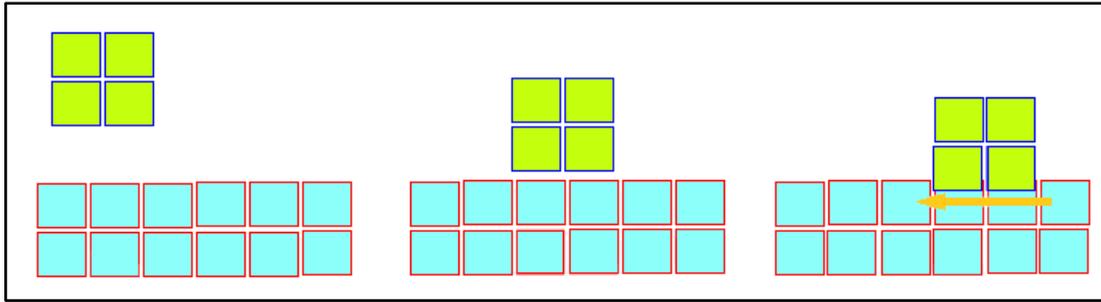


Figura 22. Fricción entre 2 elementos cuando hacen contacto

Fuente: Applied Science International (2018)

El ángulo de fricción interna (Φ) del concreto varia usualmente de 36° a 45° para la mayoría de las resistencias (f'_c) del concreto. Este ángulo no es fácil de obtener de la observación experimental; por tanto, puede ser expresado como una función de la resistencia a compresión (f'_c) del concreto. (Lignola, 2006)

$$\Phi = 36^\circ + 1^\circ \left(\frac{f'_c}{35} \right) \leq 45^\circ$$

Ecuación 3

Φ : Ángulo de fricción interna

f'_c : Resistencia a la compresión del concreto (M Pa)

La tangente de este ángulo representa el coeficiente de fricción según el Applied Science International, (2018)

2.2.5.4 Resistencia de corte (Shear strength)

Es la resistencia del material cuando está sujeto a cortante puro, es decir cuando los esfuerzos normales son nulos. Si el material está sujeto a combinaciones de esfuerzo normales y cortantes la falla del material sigue la envolvente de Mohr-Coulomb como se muestra en la **Figura 23**.

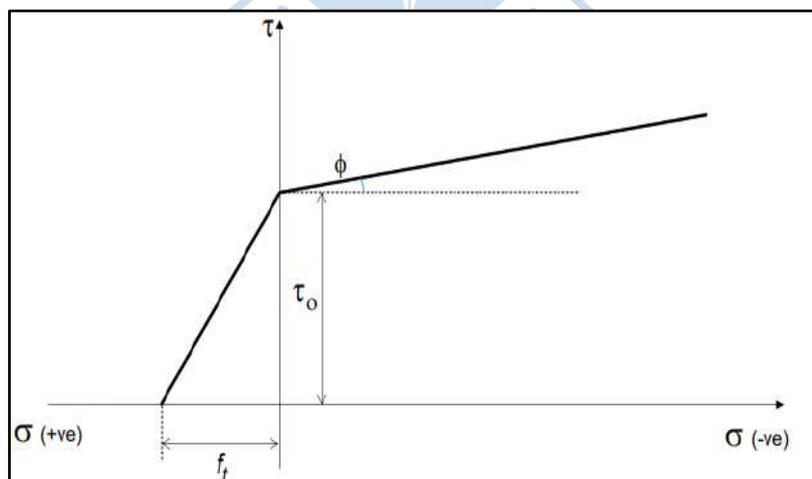


Figura 23. Envolvente Mohr Coulomb para el concreto sometido a combinación de esfuerzos normales y cortantes.

Fuente: Applied Science International (2018)

La resistencia al corte bajo esfuerzos normales y cortantes se describe con la expresión de la **Ecuación 4**.

$$\tau = \tau_0 + \mu\sigma$$

Ecuación 4

τ : Resistencia al corte bajo esfuerzos normales y cortantes.

τ_0 : Resistencia al cortante puro

μ : Coeficiente de fricción ($\tan(\Phi)$)

Φ : Ángulo de fricción interna

σ : Esfuerzo normal de compresión

Este parámetro es importante porque representa el esfuerzo cortante máximo que puede ser trasferido a través de una grieta. Según el modelo de densidad de contacto para la transferencia de esfuerzos a través de grietas en concreto (Maekawa, Okamura, & Li, 1989), τ_0 se calcula según la siguiente expresión.

$$\tau_0 = 18f'_c{}^{1/3}$$

Ecuación 5

f'_c : Resistencia a la compresión del concreto (kg/cm^2)

2.2.5.5 Factor de rugosidad (Roughness Factor)

Se le denomina también “*Residual Shear Strength Factor*” y es un indicador del nivel de rugosidad que tienen las grietas para determinado material. Toma el valor de 0 para representar una superficie suave de grieta y 1 cuando la grieta tiene superficie rugosa. (Applied Science Intenational, 2018)

En la **Figura 24** se ilustra la manera que el esfuerzo cortante en una grieta se ve afectado por la rugosidad de la superficie de ésta.

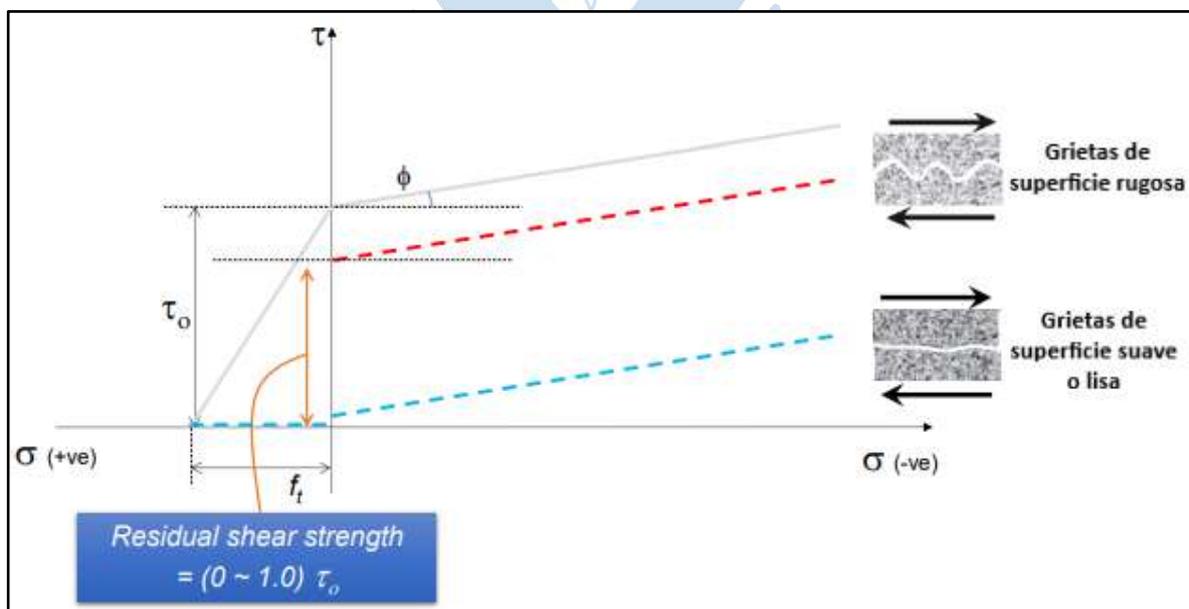


Figura 24. Influencia del residual shear strength en el esfuerzo cortante de una grieta

Fuente: Applied Science Intenational (2018)

2.2.5.6 Coeficiente de amortiguamiento externo (External damping coefficient)

El amortiguamiento representa las fuerzas de fricción y está dividido en amortiguamiento interno y externo. El amortiguamiento interno se presenta en el comportamiento de la estructura en los siguientes casos: Agrietamiento del concreto, liberación energía debido a la aplicación de carga histerética, fricción entre elementos, la apertura y cierre de grietas, el efecto de colisión y rebote.

El amortiguamiento externo aparece como resultado de la interacción entre la estructura y su ambiente externo (fuerza del viento, dispositivos amortiguadores de fuerza sísmica, fuerza de un fluido interactuando con la estructura). En ELS un amortiguamiento externo causa una fuerza de desaceleración en la caída de los objetos, lo cual se refleja en una caída lenta y poco realista de éstos.

El manual teórico del ELS propone el valor "0" como un valor por defecto, diciendo que, en la mayoría de los casos no lineales, el amortiguamiento es simulado correctamente a través del amortiguamiento interno. (Applied Science International, 2018)

2.2.5.7 Factor de rigidez de contacto normal /cortante (Normal/ Shear Contact stiffness factor)

Cuando ocurre un contacto entre elementos durante el análisis, aparecen resortes en estos puntos de colisión que se encargan de transferir energía. Un valor muy alto de la rigidez de estos resortes ocasiona una gran fuerza de choque, mientras que un valor muy bajo causa una reducción a la fuerza que transmite el resorte.

En caso de colisión aparecen tres resortes, uno normal y dos de corte. En caso de que el contacto que se produzca sea de la naturaleza esquina-cara, el resorte normal es perpendicular a la cara del elemento y los dos resortes de corte pertenecen al plano de la cara del elemento. Por otro lado, en caso de contacto arista-arista, el resorte normal es perpendicular al plano que se genera por estas dos aristas y los dos resortes de corte pertenecen al plano que se genera por estas dos aristas. (Applied Science International, 2018)

Estos parámetros sirven para evitar problemas numéricos de divergencia en el análisis y representan la rigidez de los resortes generados en el contacto. El valor por defecto del *Normal Stiffness Factor* que el manual establece para todos los materiales de 0.0001. (Applied Science Intenational, 2018)

En el caso del *Shear Stiffness Factor* es parecido al *Normal Stiffness Factor*, pero al ser las fuerzas normales mayores que las de corte, se determina un valor de 0.00001 a este factor. (Applied Science Intenational, 2018)

2.2.5.8 Coeficiente de expansión lineal por temperatura (Linear temperature expansion coefficient)

ELS puede tomar en cuenta los esfuerzos internos por el aumento o disminución de la temperatura. Estos cambios de temperatura producen una deformación en los resortes que es calculada a partir de la **Ecuación 6**.

$$\varepsilon = \alpha \Delta T \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde, ε es la deformación por temperatura, α es el coeficiente de expansión térmica (*Linear Temperature Expansion Coefficient*) y ΔT es el cambio de temperatura. ELS distribuye el cambio de temperatura a cada resorte. (Applied Science International, 2018)

En este trabajo no se evaluó la influencia de los cambios de temperatura. Por tanto, se mantuvo los valores por defecto que recomienda el manual de usuario del software.

2.2.5.9 Mínimo factor de rigidez por esfuerzo normal/ cortante (Minimum normal/shear stiffness factor)

El comportamiento del concreto en compresión, tensión o corte tiene un pico que representa su mayor resistencia, tal valor que luego suele caer. Cuando la rigidez es pequeña, negativa o cero como se muestra en la **Figura 25**, el programa reemplaza esta rigidez por una rigidez mínima que es igual al uno por ciento de la rigidez inicial, para evitar problemas numéricos de divergencia en el análisis.

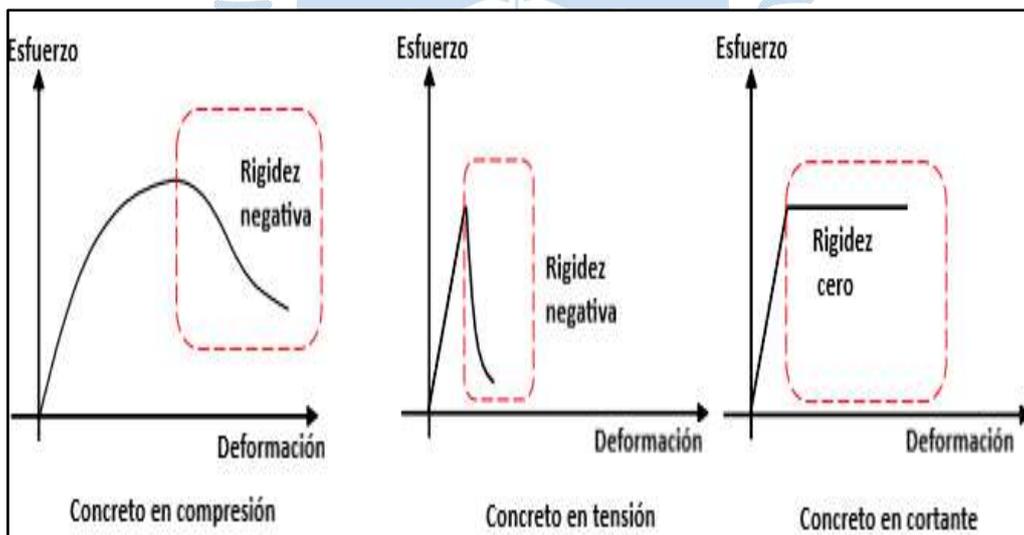


Figura 25. Comportamiento del concreto en compresión, tensión y cortante.

Fuente: Applied Science International (2018)

2.2.5.10 Ratio de rigidez post - fluencia (Post yield stiffness ratio)

Este factor controla la estabilidad numérica del comportamiento del acero. El estado de fluencia en el acero es un estado en el que la relación esfuerzo-deformación es constante y horizontal.

ELS necesita un valor mínimo de rigidez para evitar esa divergencia numérica, y este es una relación entre el estado después de la fluencia y antes de la fluencia. Dicha relación se ve representada por E_1 y E en la **Figura 26**.

El valor por defecto que presenta el manual del ELS para materiales como el acero y el aluminio es de 0.01. (Applied Science International, 2018)

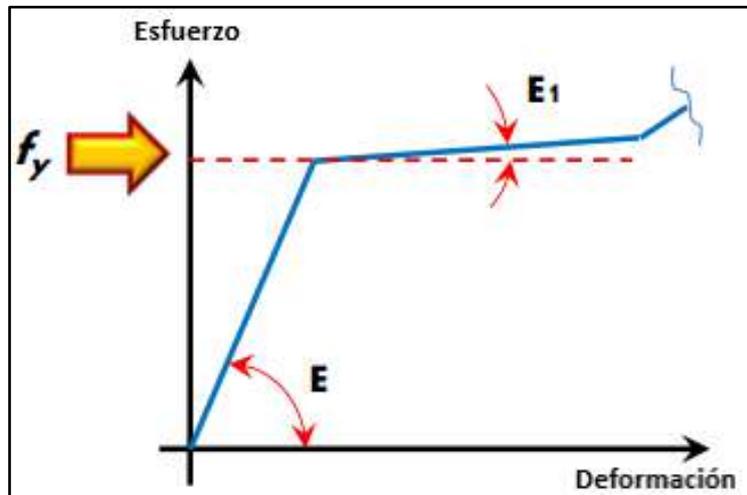


Figura 26. Post yield stiffness ratio

Fuente: Applied Science International (2018)

2.2.5.11 Ratio de esfuerzo último / de fluencia (Ultimate/yield stress ratio)

Este parámetro se usa especialmente en el acero. Representa la relación entre el esfuerzo último y el esfuerzo de fluencia. El valor predeterminado varía de 1.11 a 1.67. Esta relación no tiene unidades. (Applied Science International, 2018)

En la **Figura 27** se ilustra la curva esfuerzo deformación del acero, además se muestran los puntos correspondientes al esfuerzo último y al esfuerzo de fluencia.



Figura 27. Curva esfuerzo-deformación del acero

Fuente: Applied Science International (2018)

2.2.5.12 Factor de atenuación de falla (Failure softening factor)

La ruptura de materiales dúctiles como las barras de acero, se produce a altos niveles de esfuerzo. La repentina pérdida de ese esfuerzo puede conllevar a altas concentraciones de esfuerzo e inestabilidad numérica. Es por eso que ELS utiliza un factor denominado *Failure Softening Factor* que reduce estas concentraciones de esfuerzo gradualmente. Este factor permite valores entre “0” y “1”, siendo “1” cuando el esfuerzo cae repentinamente sin ninguna reducción y “0” cuando no se reduce en ningún momento la concentración de esfuerzos y se mantiene un comportamiento plástico como se puede ver en la **Figura 28**. ELS recomienda un valor por defecto de “0.1”. (Applied Science International, 2018)

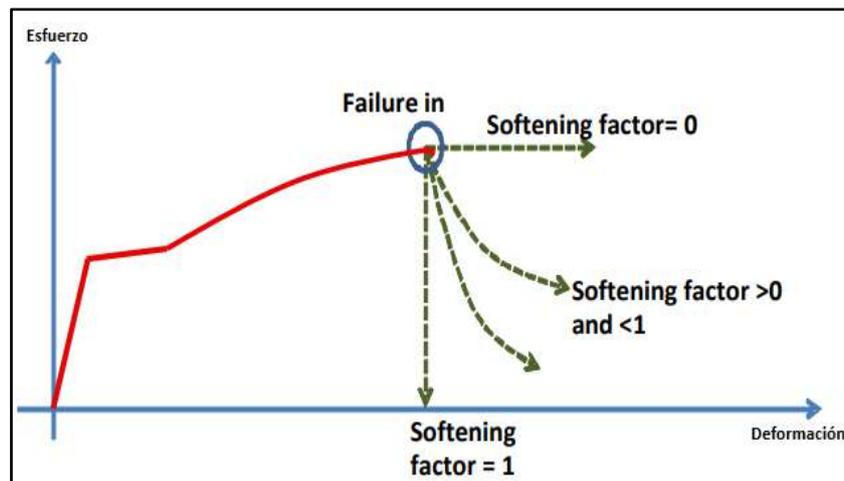


Figura 28. Failure softening factor

Fuente: Applied Science International (2018)

2.2.5.13 Factor de esfuerzo por cortante (Shear Stress Weight)

La fractura de una barra de refuerzo en el concreto reforzado ocurre cuando la suma de los esfuerzos alcanza la resistencia última de la barra como se describe en la **Ecuación 7**.

$$\sqrt{\sigma^2 + \tau_1^2 + \tau_2^2} = f_u \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde, σ es el esfuerzo normal, τ_1 y τ_2 son los esfuerzos de corte en ambas direcciones, cada uno correspondiente a un resorte de contacto, y f_u es la resistencia última de la barra de acero.

Cuando la barra de acero está sometida a altos niveles de corte puede causar una falla temprana. Por tal motivo, se introduce el *Shear Stress Weight* cuyo rango se encuentra entre el “0” y “1”. Cuando este factor es “0” significa que los esfuerzos cortantes son nulos en la **Ecuación 7** y “1” cuando estos valores se toman por completo sin ningún tipo de disminución. (Applied Science International, 2018)

2.3 Modelos constitutivos de los materiales

Para simular los materiales usados en la construcción de elementos estructurales, en este caso, concreto armado, se necesita de modelos matemáticos que representen el comportamiento del material frente a la aplicación de cargas de distinta naturaleza. En el caso de ELS, para la simulación del concreto armado se cuenta con 2 modelos constitutivos, uno para el concreto y otro para el acero de refuerzo.

2.3.1 Modelo de Maekawa

Para modelar el concreto en compresión, el software adopta el modelo de Maekawa. En este modelo se usan 3 valores de entrada para definir la envolvente de esfuerzos y deformaciones de compresión. El módulo de Young Inicial (E), el parámetro de factura (K), y la deformación plástica de compresión (ε_p). EL parámetro de fractura representa la extensión del daño interno del concreto mientras que la deformación plástica representa el nivel de las deformaciones plásticas residuales en compresión. La descarga y recarga pueden ser convenientemente descritos en el modelo. (Maekawa & Okamura, 1990)

El punto atractivo del modelo de concreto de Maekawa es que está definido por parámetros de ingeniería como la resistencia del concreto en tracción, la resistencia del concreto en compresión y la energía de fractura, los cuales cubren todas las situaciones de carga. Otros modelos, enfocados en situaciones de carga específica pueden proporcionar mejores resultados en tales situaciones. Sin embargo, estos modelos generalmente no funcionan tan bien en condiciones para las que no están diseñados. (Lignola, 2006)

Para conseguir la curva de la envolvente del concreto se necesitan de las ecuaciones que se presentan a continuación.

- Carga de compresión ($\varepsilon \leq \varepsilon_{CMAX}$)

$$\sigma_c = K * E(\varepsilon - \varepsilon_p) \quad \text{Ecuación 8}$$

$$K = \exp\left\{-0.73 * \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} * \left[1 - \exp\left(-1.25 * \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c}\right)\right]\right\} \quad \text{Ecuación 9}$$

$$\varepsilon_p = \left\{\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} - \frac{20}{7} \left[1 - \exp\left(-0.35 * \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c}\right)\right]\right\} * \varepsilon_c \quad \text{Ecuación 10}$$

$$\varepsilon_c = 2 * \frac{f'_c}{E} \quad \text{Ecuación 11}$$

- Carga de tensión ($\varepsilon > \varepsilon_{TMAX}$)

$$\sigma_c = K * f_t(\varepsilon - \varepsilon_p) \quad \text{Ecuación 12}$$

Para graficar las curvas de descarga y descarga se usan las siguientes ecuaciones:

- Descarga de compresión ($\varepsilon > \varepsilon_{CMAX}, \varepsilon > \varepsilon_0, \varepsilon < 0$)

$$\sigma = K * E(\varepsilon - \varepsilon_p)\alpha \quad \text{Ecuación 13}$$

$$\alpha = K^2 + \left(\frac{\sigma_0}{K * E(\varepsilon - \varepsilon_0)} - K^2\right) \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_p}{\varepsilon_0 - \varepsilon_p}\right) \quad \text{Ecuación 14}$$

- Recarga de compresión ($\varepsilon > \varepsilon_{CMÁX}$, $\varepsilon \leq \varepsilon_0$, $\varepsilon < 0$)

$$\sigma = \sigma_{CMÁX} - (\sigma_{CMÁX} - \sigma_0) \frac{\varepsilon_{CMÁX} - \varepsilon}{\varepsilon_{CMÁX} - \varepsilon_0} \quad \text{Ecuación 15}$$

- Descarga de tensión ($\varepsilon < \varepsilon_{TMÁX}$, $\varepsilon < \varepsilon_0$, $\varepsilon > 0$)

$$\sigma = E_{b0}(\varepsilon - \varepsilon_p)\alpha + \sigma_b \quad \text{Ecuación 16}$$

$$\sigma_b = -f_t \left[0.05 + 0.15 \frac{(\varepsilon_{TMÁX} - \varepsilon_p)E}{5f_t} \right] > -0.2f_t \quad \text{Ecuación 17}$$

$$\alpha = \left[\frac{\sigma_0}{E_{b0}(\varepsilon - \varepsilon_p)} \right] \left[\frac{\varepsilon - \varepsilon_p}{\varepsilon_0 - \varepsilon_p} \right]^3 \quad \text{Ecuación 18}$$

$$E_{b0} = \frac{\sigma_{TMÁX} - \sigma_b}{\varepsilon_{TMÁX} - \varepsilon_p} \quad \text{Ecuación 19}$$

- Recarga de tensión ($\varepsilon < \varepsilon_{TMÁX}$, $\varepsilon \geq \varepsilon_0$, $\varepsilon > 0$)

$$\sigma = \sigma_{TMÁX} - (\sigma_{TMÁX} - \sigma_0) \frac{\varepsilon_{TMÁX} - \varepsilon + \varepsilon_p}{\varepsilon_{TMÁX} - \varepsilon_0 + \varepsilon_p} \quad \text{Ecuación 20}$$

$\varepsilon_{TMÁX}$: Deformación máxima de tensión

$\sigma_{TMÁX}$: Esfuerzo correspondiente a $\varepsilon_{TMÁX}$

$\varepsilon_{CMÁX}$: Deformación máxima de compresión

$\sigma_{CMÁX}$: Esfuerzo correspondiente a $\varepsilon_{CMÁX}$

f_t : Resistencia a la tracción del concreto.

ε_0 : Deformación actual

σ_0 : Esfuerzo correspondiente a ε_0 .

En la **Figura 29** se muestra la envolvente del concreto bajo cargas axiales de tensión y compresión.

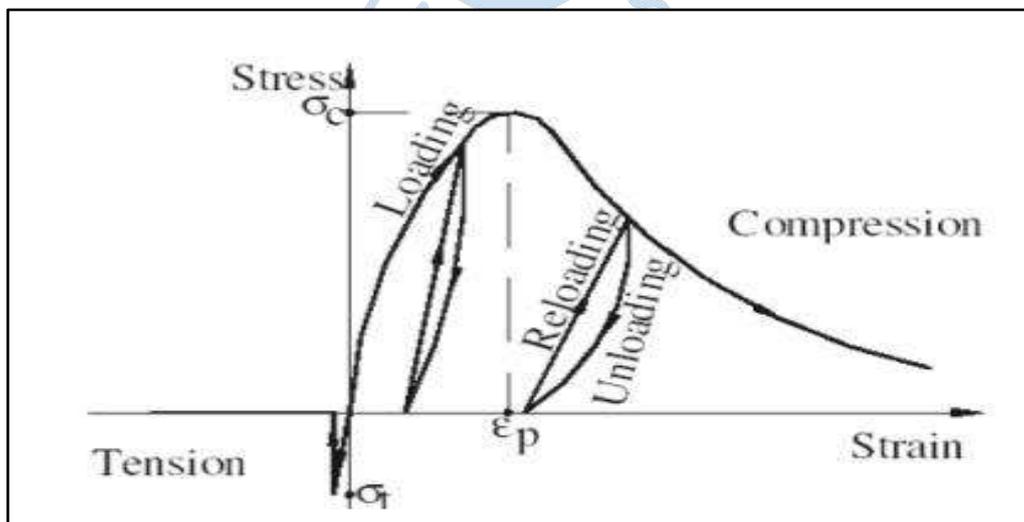


Figura 29. Envolvente del concreto bajo cargas axiales tensión y compresión.

Fuente: Applied Science Intenational (2018)

2.3.2 Modelo de Menegotto de acuerdo con Bosco et al.

El modelo propuesto originalmente por Menegotto y Pinto es un modelo de material uniaxial capaz de simular los principales aspectos de la respuesta cíclica del acero. Es muy utilizado para simular la respuesta dinámica de elementos de acero discretizados mediante fibras y sometidos a tensiones normales (o la respuesta de barras de acero de estructuras de concreto armado). Por la sencillez de su formulación, se implementa en numerosos programas destinados a la evaluación de la respuesta de estructuras. La primera formulación del modelo, publicada en 1970 por Giuffre y Pinto, tomó su origen de una investigación previa de Goldberg y Richard y consideró la posibilidad de trayectorias de descarga y recarga. El modelo propuesto por Giuffre y Pinto fue mejorado por Menegotto y Pinto (1973) para simular el endurecimiento cinemático. (Bosco, Ferrara, Gherzi, Marino, & Rossi, 2016)

El modelo fue publicado por primera vez por Giuffre y Pinto. Estos investigadores modificaron las relaciones propuestas anteriormente por Goldberg y Richard para que pudieran describir la respuesta del acero a la carga cíclica inversa. El esfuerzo uniaxial σ se calculó a partir de un esfuerzo normalizado σ^* , de forma similar a Ramberg y Osgood. La relación que proporcionó el esfuerzo normalizado en función de la deformación normalizada ε^* fue:

$$\sigma^* = \frac{\varepsilon^*}{(1 + \varepsilon^{*R})^{\frac{1}{R}}} \quad \text{Ecuación 21}$$

Y representó la ecuación de transición de una asíntota con pendiente E_0 igual al módulo de Young inicial del acero a otra asíntota con pendiente E_∞ igual a cero (**Figura 30**). En la **Ecuación 21**, el parámetro R influye en la forma de la curva de transición. Para describir este efecto con precisión, se consideró que el parámetro R variaba en función de la deformación plástica normalizada variable ξ de la trayectoria de carga anterior dada por la siguiente relación.

$$R = R_0 - \frac{a_1 * \xi}{a_2 + \xi} \quad \text{Ecuación 22}$$

Donde R_0 es el valor del parámetro R durante la primera carga y a_1 , a_2 son parámetros determinados experimentalmente.

Para la curva de la primera carga, las relaciones que proporcionan el esfuerzo y la deformación normalizados son:

$$\sigma^* = \frac{\sigma}{\sigma_0} \quad \text{Ecuación 23}$$

$$\varepsilon^* = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \quad \text{Ecuación 24}$$

Donde σ_0 es el esfuerzo de fluencia y ε_0 es la deformación de fluencia. Para las curvas subsecuentes a la primera carga inversa, las relaciones son:

$$\sigma^* = \frac{\sigma - \sigma_r}{2 * \sigma_0} \quad \text{Ecuación 25}$$

$$\varepsilon^* = \frac{\varepsilon - \varepsilon_r}{2\varepsilon_0} \quad \text{Ecuación 26}$$

Donde σ_r and ε_r son el esfuerzo y deformación, respectivamente, en la última carga inversa.

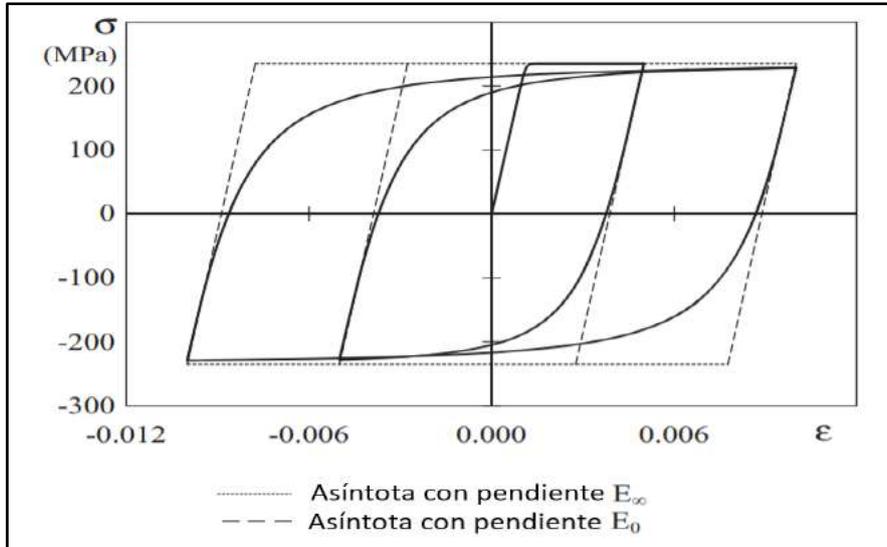


Figura 30. Comportamiento cíclico del acero – Giuffre & Pinto 1970

Fuente: Bosco, Ferrara, Gherzi, Marino, & Rossi (2016)

El modelo fue posteriormente enriquecido por Menegotto y Pinto para tomar en cuenta al endurecimiento cinemático. Esta versión del modelo es la que se utiliza en ELS. La relación que proporcionó el esfuerzo normalizado fue:

$$\sigma^* = b\varepsilon^* + \frac{(1 - b)\varepsilon^*}{(1 + \varepsilon^{*R})^{\frac{1}{R}}} \quad \text{Ecuación 27}$$

Donde b es la relación de endurecimiento por deformación, es decir, la relación entre el módulo de elasticidad E_∞ de la segunda asíntota y el módulo de Young inicial del acero. Se sustituyó la Ecuación 25 y Ecuación 26 por:

$$\sigma^* = \frac{\sigma - \sigma_r}{\sigma_0 - \sigma_r} \quad \text{Ecuación 28}$$

$$\varepsilon^* = \frac{\varepsilon - \varepsilon_r}{\varepsilon_0 - \varepsilon_r} \quad \text{Ecuación 29}$$

Donde σ_0 y ε_0 son esfuerzos y deformaciones en el punto donde las 2 asíntotas de la rama en consideración se encuentran y σ_r , ε_r son esfuerzos y deformaciones en el punto donde toma lugar la última deformación inversa con esfuerzo de igual signo.

Como un ejemplo, la **Figura 31** muestra los puntos $P_0(\varepsilon_0, \sigma_0)$ y $P_r(\varepsilon_r, \sigma_r)$ correspondientes a la primera carga inversa del acero. El parámetro R se considera dependiente de la diferencia de deformación entre el punto de intersección de la asíntota

actual y el punto de la carga inversa previa con deformación máxima o mínima dependiendo de si el esfuerzo en el acero es positivo o negativo.

Los parámetros ε_0 , σ_0 , ε_r , σ_r y R se actualizan después de cada deformación inversa. Como ejemplo, en la **Figura 31** se ilustra el cambio en $P_0(\varepsilon_0, \sigma_0)$ y $P_r(\varepsilon_r, \sigma_r)$ en la ocurrencia de cuatro inversiones de carga. Los ramales de carga posteriores a las inversiones de carga están etiquetados con números romanos y de manera similar los puntos P_0 y P_r .

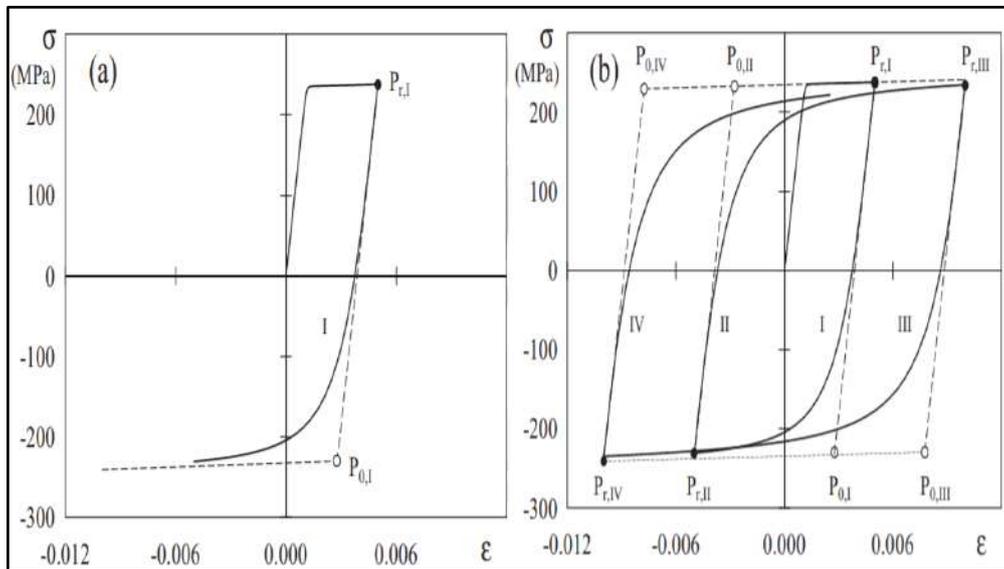


Figura 31. Comportamiento cíclico del acero – Menegotto & Pinto 1973

Fuente: Bosco, Ferrara, Gherzi, Marino, & Rossi (2016)

Para los resortes de refuerzo, el esquema para el acero de la curva envolvente en tensión y compresión se muestra en la **Figura 32**. Se consideran tres etapas; elástico, meseta de fluencia y endurecimiento por deformación. Las ecuaciones constitutivas básicas son:

$$\sigma = E * \varepsilon \quad \varepsilon \leq \varepsilon_y \quad \text{Ecuación 30}$$

$$\sigma = f_y + E_{sh} (\varepsilon - \varepsilon_y) \quad \varepsilon_y < \varepsilon \leq \varepsilon_{sh} \quad \text{Ecuación 31}$$

$$\sigma = f_{sh} + \{1 - e^{[(\varepsilon_{sh} - \varepsilon)/k]}\} \{1.01f_u - f_{sh}\} \quad \varepsilon_{sh} < \varepsilon \leq \varepsilon_u \quad \text{Ecuación 32}$$

Donde:

$$k = 0.032 * (4000/f_y)^{0.333} \quad \text{Ecuación 33}$$

$$f_{sh} = f_y + E_{sh} (\varepsilon_{sh} - \varepsilon_y) \quad \text{Ecuación 34}$$

E: Modulo de Elasticidad.

E_{sh} = Módulo de meseta de Rendimiento.

σ = Esfuerzo.

f_{sh} = Esfuerzo final de la etapa de meseta de rendimiento.

ε_y = Deformación correspondiente al esfuerzo de fluencia

f_y = Esfuerzo de fluencia.

f_u = Esfuerzo último.

ε_{sh} = Deformación final de la etapa de meseta de rendimiento.

ε_u = Deformación última.

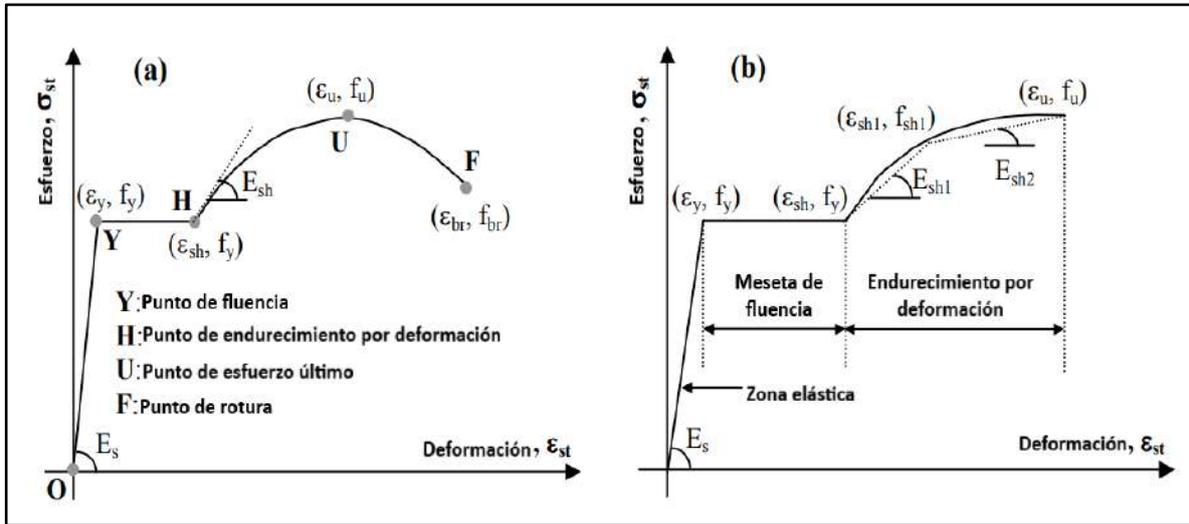


Figura 32. Puntos y zonas notables en la envolvente del modelo de acero de Menegotto-Pinto

Fuente: Prasad Dhakal & Maekawa (2002)



Capítulo 3

Experimento de Leonhardt y Walther

3.1 Alcance del estudio

El experimento de Leonhardt y Walther (1962) consistió en un conjunto de ensayos en diferentes tipos de vigas de concreto armado. Se estudió la influencia de distintos factores en el tipo de falla de las vigas tales como: geometría de la sección transversal, tipo de refuerzo, cuantía de acero, esbeltez, inclinación y tipos de estribo.

Con dicha investigación se logró una gran contribución al tratamiento del cortante en vigas de concreto reforzado, debido a que se ensayaron varias series de vigas. Además, se consolidaron las bases de la teoría del cortante en este tipo de elementos, de tal forma que, se obtuvo una mejor comprensión de los mecanismos de la resistencia al corte y las variables principales que afectan la resistencia al corte. (Verschuren & MacGregor, 1965)

3.2 Características de las vigas escogidas para la simulación

Se escogió una serie de 10 vigas simplemente apoyadas para este trabajo de investigación, las cuales tuvieron las siguientes características: Sección transversal rectangular constante de 19x32cm, refuerzo de 2Ø26 mm en la dirección longitudinal y un voladizo de 300 mm en los extremos, zona que fue provista de estribos para evitar problemas de anclaje.

Las vigas escogidas para la simulación fueron sometidas a cargas estáticas puntuales y monotónicas. Es decir que las cargas se aplicaron en una sola dirección. Por otro lado, cada una de las 10 vigas en mención fueron cargadas en incrementos de la décima parte de la carga de rotura esperada.

La principal variable en estudio en esta serie de vigas fue la relación a/d , es decir la esbeltez. En la **Figura 33** se muestra la geometría básica de todos los especímenes en estudio. Además, se ilustran las variables asignadas a las dimensiones que variaron en todas las vigas y que permitieron tener diferentes valores de esbeltez.

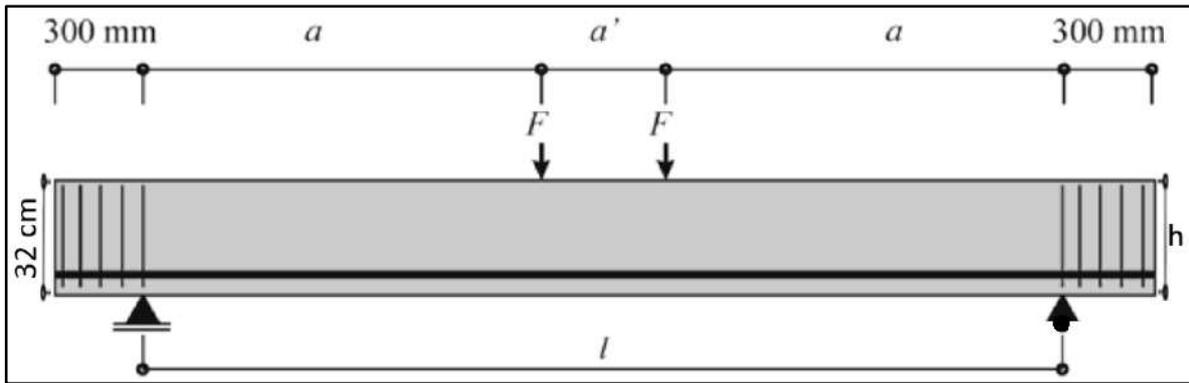


Figura 33. Disposición del acero de refuerzo longitudinal y detalle de voladizos en las vigas del experimento de Leonhardt y Walther (1962)

Fuente: Latte (2010)

En la **Tabla 2** se muestra la información detallada de la geometría de cada una de las vigas. Se observan los valores numéricos de las dimensiones referidas a la **Figura 33**, además de la relación a/d que representa la esbeltez.

Tabla 2. Información de la geometría de las vigas escogidas del experimento

Identificador	l (m)	a (m)	a' (m)	d (m)	b (m)	ρ (%)	a/d
1	0.9	0.27	0.36	0.27	0.19	2.07	1
2	1.15	0.4	0.35	0.27	0.19	2.07	1.5
3	1.45	0.54	0.37	0.27	0.19	2.07	2
4	1.7	0.67	0.36	0.27	0.19	2.07	2.5
5	1.95	0.81	0.33	0.27	0.19	2.07	3
6	2.53	1.1	0.33	0.27	0.19	2.07	4
7	3.1	1.35	0.4	0.27	0.19	2.07	5
8	3.6	1.62	0.36	0.27	0.19	2.07	6
9	5.8	1.89	2.02	0.27	0.19	2.07	7
10	4.72	2.16	0.4	0.27	0.19	2.07	8

Fuente: Leonhardt & Walther (1962)

La configuración experimental para las pruebas de Leonhardt y Walther (1962) se muestra en la **Figura 34**. Además, se incluye el detalle de la sección transversal.

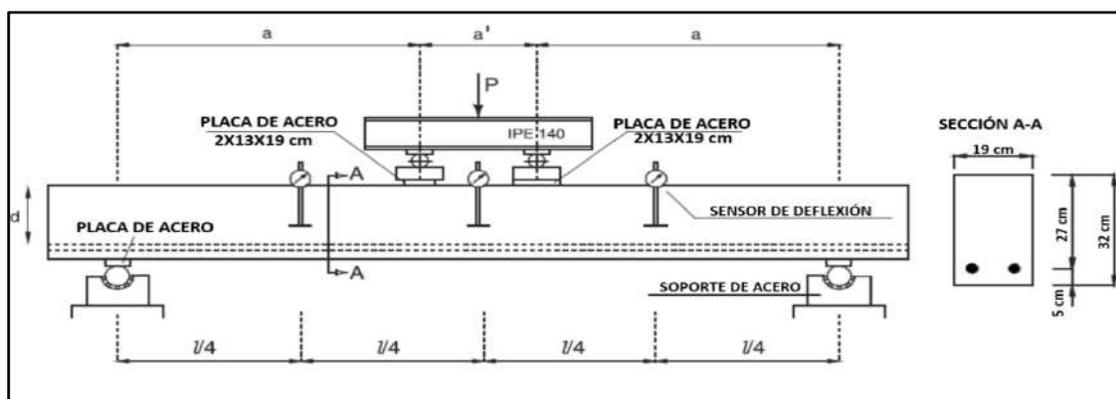


Figura 34. Configuración experimental para los ensayos de las vigas seleccionadas.

Fuente: (Leonhardt & Walther, 1962)

3.3 Propiedades de los materiales

3.3.1 Propiedades del concreto

En la construcción de las vigas ensayadas se empleó concreto simple con un peso específico aproximado de 2300 kg/m^3 .

El valor de la resistencia a compresión del concreto (f'_c) varió ligeramente en cada una de las 10 vigas mencionadas previamente. La resistencia a tracción del concreto (f_t) se estimó en 30 kg/cm^2 . En la **Tabla 3** se puede observar el valor de la resistencia a compresión del concreto para cada uno de los especímenes escogidos para esta investigación.

Tabla 3. Resistencia a compresión del concreto

Identificador	$f'_c \text{ (kg/cm}^2\text{)}$
1	299.80
2	299.80
3	299.80
4	299.80
5	299.80
6	299.80
7	314.07
8	315.09
9	323.25
10	304.90

Fuente: Leonhardt & Walther (1962)

3.3.2 Propiedades del acero

El acero de refuerzo usado en las vigas previamente mencionadas tuvo las características que se muestran en la **Tabla 4**.

Tabla 4. Propiedades del acero de refuerzo

	Diámetro (mm)	Esfuerzo de fluencia (f_y)	Módulo de Young (kg/cm^2)	Deformación última (%)	Peso específico (kg/cm^3)
Estribos	12	4200	2.1×10^6	0.17	0.00784
Refuerzo longitudinal	26	4200	2.1×10^6	0.17	0.00784

Fuente: Leonhardt & Walther (1962)

3.4 Resultados del experimento

3.4.1 Patrones de agrietamiento y tipos de falla

En las pruebas de Leonhardt y Walther, el comportamiento estuvo fuertemente influenciado por la relación de luz de corte a/d , donde "a" es la luz desde la carga puntual a la reacción y "d" es el peralte efectivo de la viga. (Moehle, 2015)

Las vigas con mayor a/d (viga 10 y viga 9) tuvieron una carga de rotura más baja en comparación con las vigas restantes. Sin embargo, a diferencia de las demás, la capacidad de carga de la fuerza cortante no se agotó en éstas últimas. Desarrollaron fisuras principalmente perpendiculares al eje longitudinal de la viga, con ligera inclinación debido al cortante. La falla fue por aplastamiento de la zona de compresión por flexión, sin falla por corte.

Las vigas con $2.5 \leq a/d \leq 6$ tuvieron fallas de cortante asociadas con grietas muy inclinadas (vigas 8, 7, 6, 5 y 4). Inicialmente, las vigas fueron estables debido principalmente a la transferencia de corte a través de la trabazón de agregados en las grietas inclinadas. La carga adicional aumentó la apertura de la grieta, lo que redujo la trabazón de agregados y provocó fallas por tracción diagonal. La falla se caracterizó por grietas muy inclinadas que se extendieron a lo largo de las barras longitudinales inferiores. Tales fallas fueron especialmente frágiles. Las grietas inclinadas primarias también pudieron penetrar la zona de compresión por flexión, y conducir a la falla de la zona de compresión. Sin embargo, esto último no sucedió en este grupo de vigas mencionadas.

Las vigas con $a/d < 2.5$ desarrollaron un puntal de compresión diagonal que soportó las cargas concentradas mediante la acción del arco (vigas 1, 2 y 3). La falla fue por división del puntal de compresión diagonal (viga 1) y por falla de la cuerda de compresión en la parte superior de la viga (vigas 2 y 3). En la **Figura 35** se ilustra el mecanismo del puntal de compresión, el cual se representa como una armadura que soporta 2 cargas concentradas en la parte superior. (Moehle, 2015)

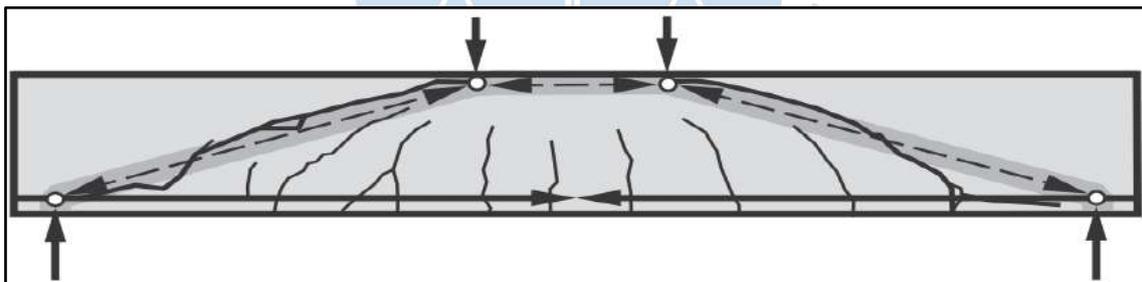


Figura 35. Representación del mecanismo de puntal de compresión.

Fuente: Zilch (2010)

Herbrand (2017) presentó comentarios acerca de los resultados en 4 vigas (vigas 5, 6, 7 y 8 de la **Figura 41**) ensayadas por Leonhardt y Walther (1962). Dichos comentarios se presentan en los 2 párrafos siguientes.

Un aumento del espacio de corte (a) condujo a una relación a/d mayor, lo que resultó en momentos más grandes debido a las fuerzas de corte constantes. Momentos más grandes provocaron anchos de fisura más grandes debido a una mayor rotación, lo que disminuyó el efecto estabilizador de la trabazón de agregados y los esfuerzos de tracción en la punta de la fisura. Además, el patrón de fisuras por flexión que resulta de la relación a/d fue crucial para las acciones de transferencia de carga resultantes.

Las dos primeras pruebas con $a/d = 3$ y 4 presentaron falla por tensión diagonal, ya que la grieta crítica resultó de una grieta por flexión junto al soporte. La capacidad de corte fue significativamente mayor ya que no hubo grietas de flexión adicionales entre la grieta crítica y el soporte que perturbe la transferencia de carga. Para valores de $a/d = 5$ y 6 , hubo grietas por flexión adicionales detrás de la grieta por cortante crítica, de modo que la fuerza en la zona de compresión debida a la flexión no se inclinó de ninguna manera en el plano crítico de falla por cortante. El cortante tuvo que ser soportado principalmente por la fricción de la fisura, que se redujo debido a anchos de fisura más grandes, por fuerzas de tracción en la punta de la fisura y por la acción de dovela en el refuerzo longitudinal. La pérdida de fricción de la fisura y la activación de la acción de dovela condujeron a una ruptura a lo largo del refuerzo longitudinal, como se muestra en la **Figura 41**. Cuando se activaron las fuerzas en la punta de la grieta y la flexión en voladizo, se produjo una falla de cizallamiento repentina debido a grietas horizontales. (Herbrand, 2017)

De acuerdo con lo expuesto en el **Capítulo 1**, se hizo una comparación con los resultados del experimento y se estableció el tipo de falla para cada una de las 10 vigas. A continuación, se exponen los comentarios acerca del tipo de falla y patrones de agrietamiento obtenidos.

En la viga 1 que fue la menos esbelta, la falla fue abrupta porque el punto de aplicación de la carga fue muy cercano a los apoyos. Esto se justifica por ser un elemento de luz corta y de acuerdo con lo descrito en el capítulo 1. La falla en esta viga fue por tracción diagonal. En la **Figura 36** se visualiza el patrón de agrietamiento que tuvo un gran parecido con el de la **Figura 1**. La grieta principal debido al cortante se extendió desde el apoyo hasta el punto de aplicación de la carga.



Figura 36. Viga 1

Fuente: Leonhardt & Walther (1962)

En las vigas 2 y 3 se observa que la grieta principal de corte no fue tan pronunciada como en la viga 1. Sin embargo, en estos elementos la grieta de corte alcanzó la zona de flexión. Además, se visualiza en ambas vigas que en la parte superior de la grieta de corte el concreto sufrió aplastamiento. Por tanto, teniendo en cuenta este detalle y haciendo una comparación con los tipos de falla descritos en el primer capítulo, se puede establecer luego de comparar visualmente el patrón de agrietamiento de la **Figura 37** con el patrón de agrietamiento esperado de la **Figura 3**, que la falla para estas 2 vigas fue de compresión por cortante.

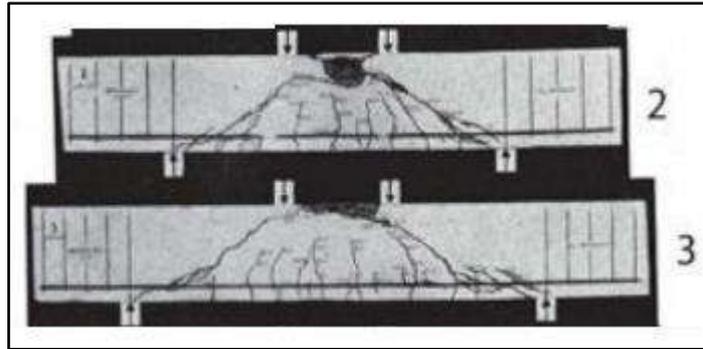


Figura 37. Vigas 2 y 3

Fuente: Leonhardt & Walther (1962)

En las vigas 4,5 y 6 se obtuvieron resultados similares. Se desarrollaron grietas de corte en ambos lados del elemento. Sin embargo, dichas grietas no se extendieron hasta la zona de flexión pura, como sucedió en las vigas 2 y 3. Al comparar el patrón de agrietamiento real mostrado en la **Figura 38** y el patrón de agrietamiento esperado de la **Figura 1**, es posible decir que la falla en este grupo de vigas fue por tracción diagonal.

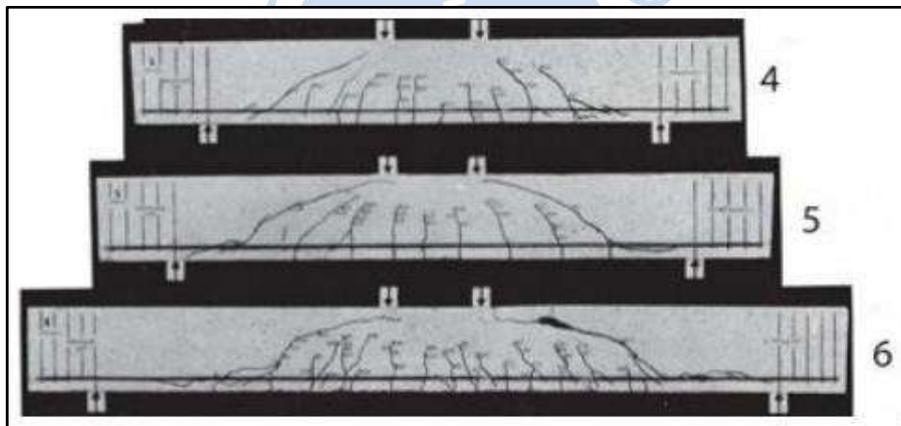


Figura 38. Vigas 4, 5 y 6.

Fuente: Leonhardt & Walther (1962)

En las vigas 7 y 8 hubo gran similitud en el tipo de falla y patrón de agrietamiento. Se puede observar en la **Figura 39** que solamente hubo grieta de corte en el lado izquierdo de ambas vigas. Además, se visualiza que dicha grieta alcanzó el acero de refuerzo longitudinal y se extendió a lo largo de éste. Por tanto, de acuerdo con las características de las fallas descritas en el capítulo 1 el tipo de falla fue de adherencia por cortante. Esto se evidencia contrastando el patrón de agrietamiento que se muestra en la **Figura 39** con el patrón esperado de la **Figura 2**.

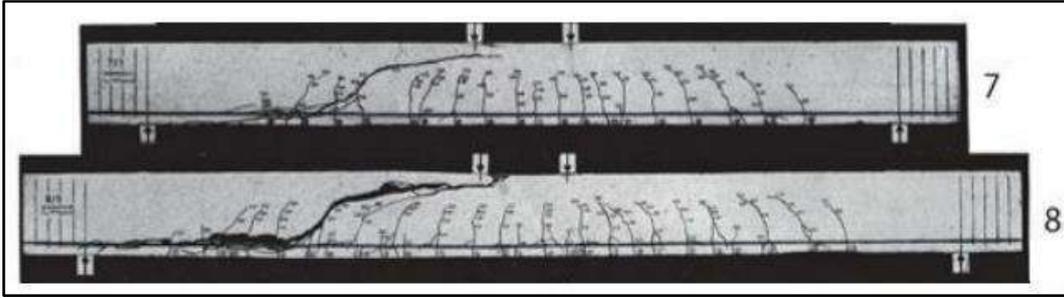


Figura 39. Vigas 7 y 8.

Fuente: Leonhardt & Walther (1962)

En las vigas 9 y 10 se puede observar en la **Figura 40** que las grietas de corte fueron menos evidentes. La característica común entre éstas fue la zona de concreto aplastada en la zona de flexión. El tipo de falla en estos elementos fue de flexión. Esto queda en evidencia al comparar el patrón de agrietamiento obtenido (**Figura 40**) y el patrón de agrietamiento esperado que se muestra en la **Figura 5**. En la viga 9, la distancia entre las cargas fue mayor respecto a la viga 10. Se evaluó la influencia de la cercanía de la carga a los apoyos en el tipo de falla y patrón de agrietamiento. Al final se obtuvo un tipo de falla y patrón de agrietamiento muy similares.

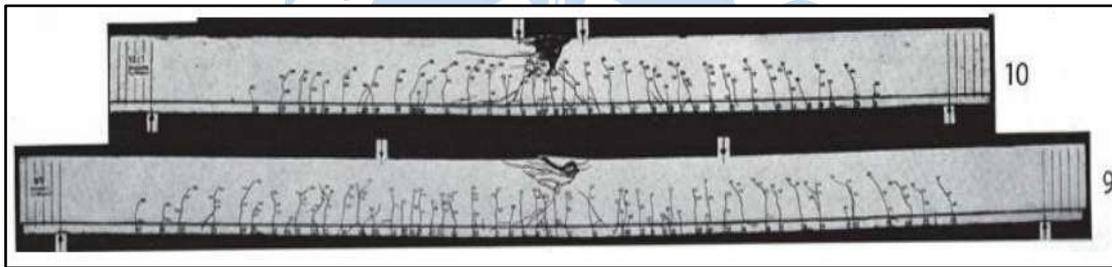


Figura 40. Vigas 9 y 10

Fuente: Leonhardt & Walther (1962)

Se puede observar en la **Figura 41** que a medida que la longitud de las vigas se incrementó, también lo hizo el número de grietas por flexión. En las vigas menos esbeltas ($a/d \leq 3$) las grietas perpendiculares al eje longitudinal estuvieron separadas notablemente. En las vigas restantes las grietas por flexión estuvieron mucho más juntas.

En la **Figura 41** se muestra el patrón de agrietamiento de las 10 vigas mencionadas previamente obtenido en los ensayos de Leonhardt y Walther (1962).

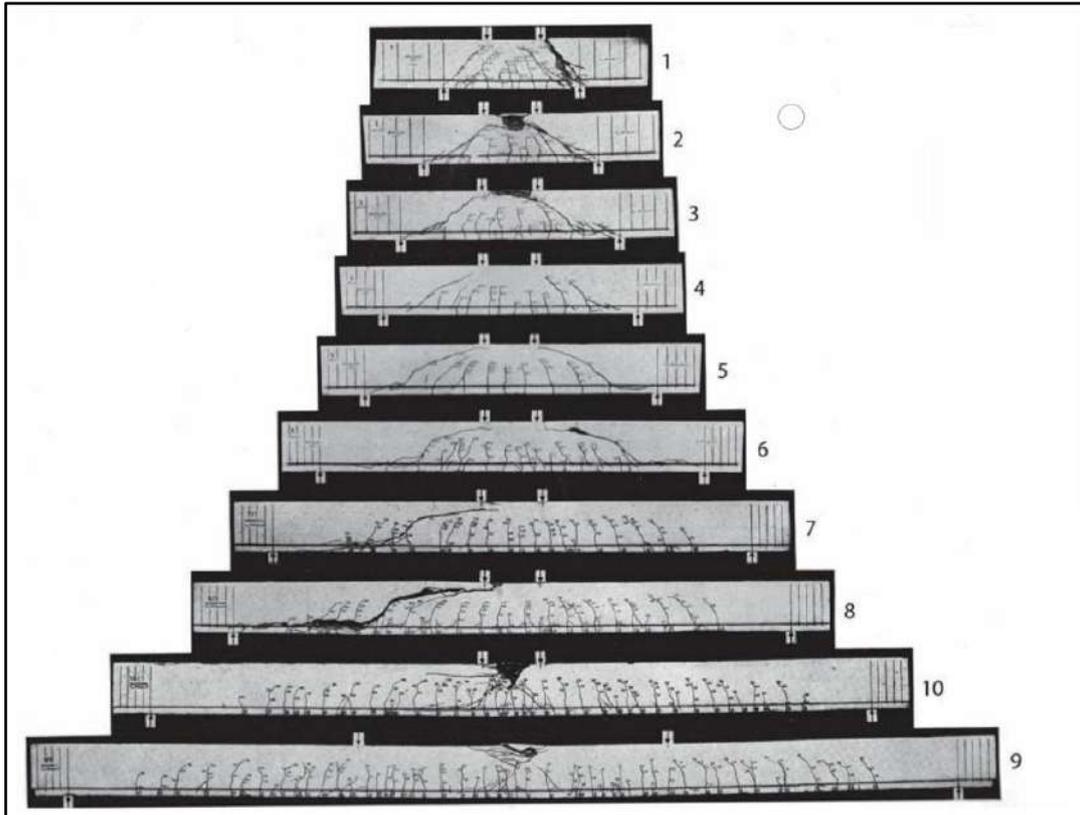


Figura 41. Patrones de agrietamiento de las 10 vigas escogidas

Fuente: Leonhardt & Walther (1962)

3.4.2 Deflexiones

No se documentó la información respecto a las deflexiones de todas las vigas previamente mencionadas. Sin embargo, se obtuvo la curva fuerza carga-deformación de 4 vigas representativas (vigas 3, 5, 7 y 9) de la serie escogida para esta tesis. Se evidenció la manera en que el valor de la esbeltez (a/d) influye en el comportamiento de las vigas. Para los valores $a/d = 2$ y 3 se observa en la **Figura 42** que las vigas tuvieron bajas deformaciones para cargas altas. Por otro lado, para $a/d = 5$ y 7 se observa que las vigas correspondientes tuvieron una gran capacidad de deflexión, pero resistieron mucho menos que las 2 anteriores.

Para los niveles más bajos de carga, es decir los primeros incrementos de carga, los diagramas de carga-deflexión mostraron valores más bajos que los esperados teóricamente. Con una carga más alta se excedieron los valores calculados solo para flexión, especialmente para vigas cortas, porque para estas vigas ocurren deformaciones de cortante considerables que pueden alcanzar la magnitud de las deformaciones por flexión poco antes de la falla. (Leonhardt & Walther, 1962)

En la **Figura 42** se muestra la gráfica carga-deflexión de 4 vigas representativas de la serie escogida para esta tesis.

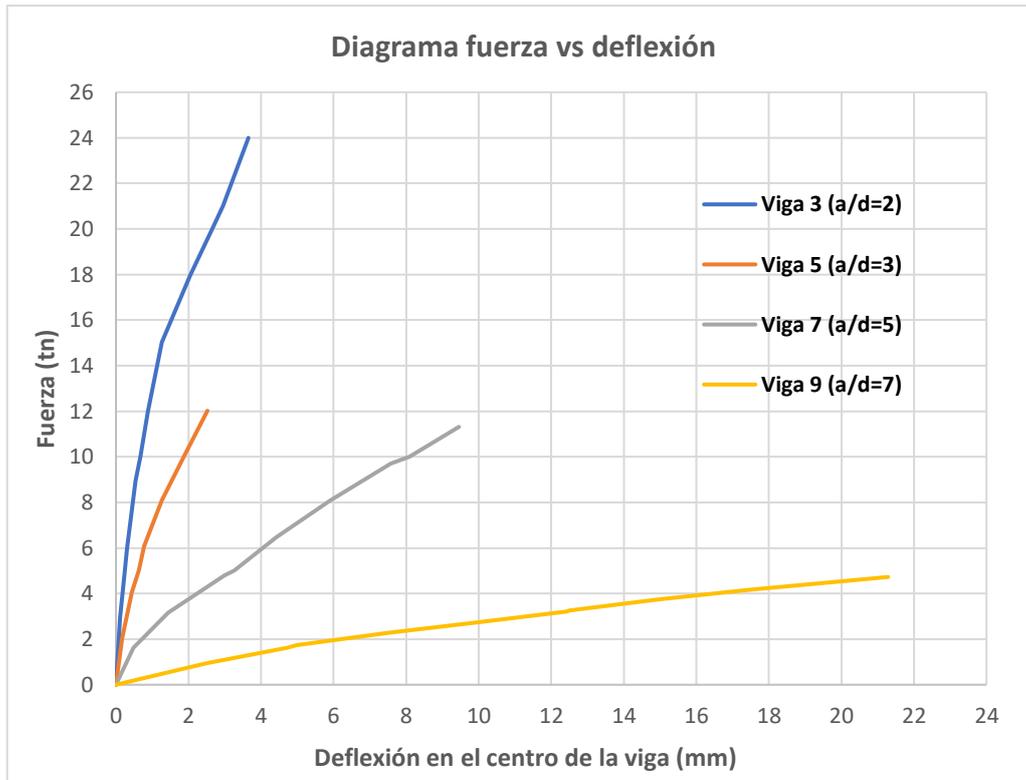


Figura 42. Curvas carga vs deflexión de vigas 3,5, 7 y 9

Fuente: Leonhardt & Walther (1962)

3.4.3 Anclaje -Deslizamiento

En ninguna de las vigas se pudo medir un deslizamiento de los extremos del acero de refuerzo antes de la falla. Solo para las vigas muy cortas se observó un movimiento promedio de 0.18 mm con respecto al extremo de la viga después de que ocurrió la falla. Sin embargo, esto es suficiente para describir la causa de la falla.

3.4.4 Resistencia al corte y esfuerzo de cortante

Se puede ver que la fuerza de corte, que se alcanzó en la falla de corte, estuvo lejos de ser constante; de hecho, el valor de F osciló entre 5,22 y 39,6 toneladas y el esfuerzo cortante (τ) correspondiente entre 12.4 y 94.2 kg/cm^2 . Además, los momentos de falla de corte M_{su} no son de igual magnitud, aunque son menos variables que el F . Si se excluyen las vigas muy cortas con un $\frac{a}{d} \leq 1.5$, debido a que los esfuerzos verticales en las reacciones permiten esperar un τ (esfuerzo cortante) más alto, los valores de τ aún se encuentran entre 12.4 y 54.4 kg/cm^2 . (Leonhardt & Walther, 1962)

En la **Tabla 5** se reportan los resultados experimentales en términos de la reacción de soporte F correspondiente a la carga última y el momento flector relacionado M_u .

Para las vigas con $a/d = 2.5, 3$ y 4 el valor menor de F correspondió a la carga a la que aparece la primera fisura cortante en un lado de la viga. El valor más alto corresponde a la carga a la que se produjo el agrietamiento por cortante también en el otro lado de la viga.

Para las vigas con $a/d = 5,6,7$ y 8 los dos valores de F fueron obtenidos por dos muestras diferentes. (Mazzarolo, Scotta, Bert, & Saetta, 2012)

Tabla 5. Valores de carga de rotura, momento de flexión y esfuerzo cortante.

Identificador	P (tn)	M_{su} (tn.m)	F (tn)	τ (kg/cm ²)
1	79.2	10.75	39.60	94.2
2	53.0	10.60	26.50	62.8
3	30.0	8.10	15.00	35.5
4	I*=16.4, D*=17.5	I=5.58, D=5.90	I=8.32, D=8.87	I=19.8, D=21
5	I=12, D=15.3	I=4.93, D= 6.27	I=6.15, D=7.8	I=14.6, D= 18.6
6	I=12, D=13.5	I=6.72, D=7.42	I=6,20, D=6.95	I= 14.7, D=16.4
7	12.2	8.42	6.35	14.8
8	12.8	10.61	6.70	15.4
9	11.1	11.14	6.00	14.0
10	9.60	10.79	5.15	12.1

I*: Carga izquierda según Figura 33, **D*:** Carga derecha según Figura 33

Fuente: Leonhardt & Walther (1962)



Capítulo 4

Simulación numérica de vigas simplemente apoyadas con ELS

El capítulo 3 estuvo basado en el experimento de Leonhart y Walther (1962). Se expuso el alcance de dicha investigación y su importancia en la teoría del cortante en vigas de concreto armado. Además, se detalló información acerca de la configuración experimental, geometría y materiales de las 10 vigas que se escogió para esta tesis. Finalmente se exponen los resultados que se obtuvieron en el experimento y se hizo comentarios del tipo de falla y patrones de agrietamiento que se desarrollaron en las vigas en estudio.

En este capítulo se consolidará la información expuesta en el capítulo anterior y se utilizará para una adecuada simulación en el software ELS.

4.1 Geometría de los especímenes

En la **Figura 43** se muestra una viga que representa la manera en la que se simularon cada una de las vigas en el software ELS. Se puede visualizar la representación tanto de las placas de aplicación de cargas, así como la de los apoyos.

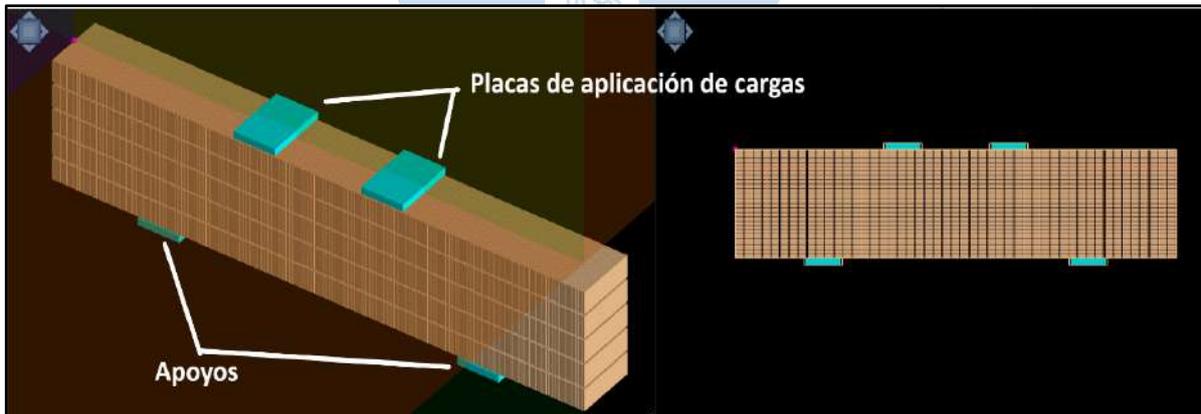


Figura 43. Viga representativa simulada en ELS

4.2 Propiedades del concreto en ELS

Para la estimación del módulo de Young (E_c) del concreto en kg/cm^2 se usó la expresión dada por el American Concrete Institute, (2019). Donde W_c es el peso específico (kg/m^3) del concreto y f'_c es la resistencia a compresión del concreto (kg/cm^2).

$$E_C = W_C^{1.5} 0.14 \sqrt{f'_C} \quad \text{Ecuación 35}$$

El módulo de corte (G) se calculó según la Ecuación 36, donde ν es módulo de Poisson, el cual según ELS toma por defecto el valor de 0.25.

$$G = \frac{E_C}{2(1 + \nu)} \quad \text{Ecuación 36}$$

La resistencia al cortante puro (shear strength) se calculó según la **Ecuación 5**. Se muestran en la **Tabla 6** las propiedades del concreto que variaron de una viga a otra.

Tabla 6. Propiedades variables del concreto

Viga	E (kg/cm ²)	G (kg/cm ²)	Shear strength(kg/cm ²)
1	267382.6	106953.04	120.47
2	267382.6	106953.04	120.47
3	267382.6	106953.04	120.47
4	267382.6	106953.04	120.47
5	267382.6	106953.04	120.47
6	267382.6	106953.04	120.47
7	273674.80	109469.91	122.35
8	274118.71	109647.45	122.49
9	277644.48	111057.75	123.53
10	269646.63	107858.66	121.15

En la **Tabla 7** se presentan las propiedades del concreto cuyos valores fueron comunes a las 10 vigas.

Tabla 7. Propiedades comunes del concreto en todas las vigas

Propiedades del concreto	valor	Unidades
Separation strain	0.1	-
Friction Coefficient	0.8	-
Contact Spring Unloading Stiffness Factor	10	-
Residual Shear Strength	1	-
External Damping Coefficient	0	-
Normal Contact Stiffness Factor	0.0001	-
Shear Contact Stiffness Factor	0.00001	-
Linear Temperature Expansion Coefficient	0.0000145	*
Minimum Normal Stiffness Factor	0.01	-
Minimum Shear Stiffness Factor	0.01	-

***En el manual teórico del software se explica que el coeficiente de expansión lineal por temperatura (Linear Temperature Expansion Coefficient) tiene unidades de longitud sobre temperatura (Longitud/ Temperatura). Sin embargo, en el interfaz de usuario de ELS se requiere un factor adimensional. 7**

4.3 Propiedades del acero en ELS

Para las placas de aplicación de cargas y los apoyos no se tuvo información del experimento respecto a las propiedades del acero que los compone. Sin embargo, se supo que fue un material de alta rigidez, ya que su finalidad es transmitir y soportar cargas sin

deformarse o con la mínima deformación posible. Se optó por usar las propiedades por defecto que tiene el ELS para un acero de alta resistencia (High Strength Steel). En la **Tabla 8** se muestran las propiedades por defecto en ELS para el acero mencionado previamente.

Tabla 8. Propiedades del acero de las placas de carga y apoyos

Propiedades del acero	Valor	Unidades
Young's Modulus	2.04E+06	kg/cm^2
Shear modulus	815561	kg/cm^2
Separation Strain	0.2	-
Friction Coefficient	0.8	-
Specific Weight	0.00784	kg/cm^3
External Damping Coefficient	0	-
Normal Contact Stiffness Factor	0.0001	-
Shear Contact Stiffness Factor	1.00E-05	-
Contact Spring Unloading Stiffness Factor	10	-
Linear Temperature Expansion Coefficient	1.30E-05	Ver Tabla 7
Yield Stress	6000	kg/cm^2
Ultimate Strain	0.1	-
Post Yield Stiffness Ratio	0.01	-
Ultimate/ Yield Stress Ratio	1.2	-
Failure Softening Factor	0.1	-
Shear Stress Weight	1	-

En la **Tabla 9** se muestran las propiedades en ELS para el acero de refuerzo longitudinal y transversal.

Tabla 9. Propiedades en ELS del acero de estribos y refuerzo longitudinal.

Propiedades del acero	valor	unidades
Shear modulus	800000	kg/cm^2
Separation Strain	0.2	-
Friction Coefficient	0.8	-
External Damping Coefficient	0	-
Normal Contact Stiffness Factor	0.0001	-
Shear Contact Stiffness Factor	1.00E-05	-
Contact Spring Unloading Stiffness Factor	10	-
Linear Temperature Expansion Coefficient	1.30E-05	Ver Tabla 7
Post Yield Stiffness Ratio	0.01	-
Ultimate/ Yield Stress Ratio	1.4	-
Failure Softening Factor	0.1	-
Shear Stress Weight	1	-

4.3.1 Matriz de sensibilidad

La estrategia seguida para el análisis de sensibilidad consistió en la variación y elección del valor más adecuado de 4 parámetros que son propios del software. Dentro de estos parámetros se tuvo el *separation strain*, *friction coefficient* y *contact spring unloading stiffness factor* que fueron comunes al concreto y al acero. Adicionalmente se estudió el *ultimate/yield*

stress ratio que fue específico para el acero. Los parámetros previamente mencionados se escogieron porque son propios del software, y hay poca información disponible limitada a rangos recomendados por el manual de usuario. En los test de sensibilidad se tomarán principalmente 3 valores de los rangos recomendados: límite inferior, valor central y límite superior.

El alcance de esta tesis está basado en identificar de manera básica el mejor valor de parámetros escogidos en este análisis de sensibilidad preliminar, a partir de las recomendaciones y rangos que entrega el manual del software, fijando aquellos valores que el software establece por defecto para que no existan problemas de divergencia en el análisis.

Se escogió la viga 3, que es la viga menos esbelta de la cual se tiene información de su curva fuerza-deflexión y patrón de agrietamiento. Además, en esta viga al ser una de las más cortas, predomina el comportamiento a cortante.

Para los parámetros comunes al concreto y al acero, se decidió realizar 2 tests de sensibilidad para cada parámetro. Primero se varió el parámetro escogido en el acero y se varió el valor de este en el concreto. El valor fijado en el acero fue el valor por defecto que recomienda el manual de usuario del software.

La elección del valor más adecuado se hizo luego de tener en cuenta 2 criterios. El primero fue la similitud del patrón de agrietamiento obtenido en ELS y el experimental, es decir, la precisión de la distribución y ubicación de grietas. Por otro lado, el segundo criterio en consideración fue el grado de ajuste en la curva fuerza-deflexión obtenida en el software y la experimental.

Con los mejores resultados obtenidos de los parámetros evaluados en los 7 primeros test de sensibilidad, se realizó un test de estabilidad (test 8) de la simulación. La viga 3 se simuló 8 veces con las mismas propiedades y se compararon los resultados entre sí, con la intención de evaluar la capacidad del software para capturar fenómenos aleatorios, que pueden llevarse a cabo en un experimento real.

El primer test de sensibilidad se basó en el cambio de valores del *separation strain* del concreto. El manual teórico del software establece que el valor de este parámetro para todos los materiales se encuentra en el rango de 0.1-0.2. Además, se menciona que en el caso de concreto reforzado, el comportamiento de la estructura está dominado por el valor del *separation strain* del concreto. Se eligieron los valores 0.1, 0.15 y 0.2 para llevar a cabo este test y evaluar el valor que brinde mejores resultados.

En este test, las propiedades del acero se mantuvieron sin modificaciones. En la **Tabla 10** se muestran las propiedades del concreto. Además, se muestran los valores usados para la evaluación del *separation strain*.

En la **Tabla 11** se muestran las propiedades en ELS del acero que se tomaron en cuenta para el test 1. El valor del *separation strain* y el resto de las propiedades del acero se

mantuvieron constantes para las simulaciones correspondientes a cada uno de los 3 valores del *separation strain* del concreto.

Tabla 10. Propiedades comunes del concreto en el test 1

Propiedades del concreto	Valor	Unidades
Separation strain	0.1/0.15/0.2	-
Friction Coefficient	0.8	-
Contact Spring Unloading Stiffness Factor	10	-
Residual Shear Strength	1	-
External Damping Coefficient	0	-
Normal Contact Stiffness Factor	0.0001	-
Shear Contact Stiffness Factor	0.00001	-
Linear Temperature Expansion Coefficient	0.0000145	Ver Tabla 7
Minimum Normal Stiffness Factor	0.01	-
Minimum Shear Stiffness Factor	0.01	-

Tabla 11. Propiedades en ELS del acero de estribos y refuerzo longitudinal en el test 1.

Propiedades del acero	Valor	Unidades
Shear modulus	800000	kg/cm^2
Separation Strain	0.1	-
Friction Coefficient	0.8	-
External Damping Coefficient	0	-
Normal Contact Stiffness Factor	0.0001	-
Shear Contact Stiffness Factor	1.00E-05	-
Contact Spring Unloading Stiffness Factor	10	-
Linear Temperature Expansion Coefficient	1.30E-05	Ver Tabla 7
Post Yield Stiffness Ratio	0.01	-
Ultimate/ Yield Stress Ratio	1.4	-
Failure Softening Factor	0.1	-
Shear Stress Weight	1	-

El segundo test de sensibilidad estuvo basado en el *separation strain* del acero. Ya que en el manual del software se menciona que el comportamiento de la estructura está dominado por el *separation strain* del concreto, se esperaba que este test de sensibilidad lo demuestre. Por tanto, el *separation strain* del acero no debería causar ningún cambio. Los valores que se eligieron para este test de sensibilidad fueron 0.1, 0.15 y 0.2. En la **Tabla 12** se muestran las propiedades en ELS del acero que fueron constantes. Además, se pueden observar los valores del *separation strain* del acero que fueron usados en el test de sensibilidad.

En la **Tabla 13** se muestran las propiedades en ELS del concreto que se tomaron en cuenta para el test 2. El valor del *separation strain* y el resto de las propiedades del acero se mantuvieron constantes para las simulaciones correspondientes a cada uno de los 3 valores del *separation strain* del acero.

Tabla 12. Propiedades en ELS del acero de estribos y refuerzo longitudinal en el test 2.

Propiedades del acero	Valor	Unidades
Shear modulus	800000	kg/cm^2
Separation Strain	0.1/0.15/0.2	-
Friction Coefficient	0.8	-
External Damping Coefficient	0	-
Normal Contact Stiffness Factor	0.0001	-
Shear Contact Stiffness Factor	1.00E-05	-
Contact Spring Unloading Stiffness Factor	10	-
Linear Temperature Expansion Coefficient	1.30E-05	Ver Tabla 7
Post Yield Stiffness Ratio	0.01	-
Ultimate/ Yield Stress Ratio	1.4	-
Failure Softening Factor	0.1	-
Shear Stress Weight	1	-

Tabla 13. Propiedades comunes del concreto en ELS para el test 2

Propiedades del concreto	Valor	unidades
Separation strain	0.1	-
Friction Coefficient	0.8	-
Contact Spring Unloading Stiffness Factor	0	-
Residual Shear Strength	1	-
External Damping Coefficient	0	-
Normal Contact Stiffness Factor	0.0001	-
Shear Contact Stiffness Factor	0.00001	-
Linear Temperature Expansion Coefficient	0.0000145	Ver Tabla 7
Minimum Normal Stiffness Factor	0.01	-
Minimum Shear Stiffness Factor	0.01	-

El tercer test de sensibilidad fue respecto al *friction coefficient* del concreto. El valor por defecto en el software para para el concreto y el acero es 0.8. Sin embargo, según el manual teórico del software este valor varía entre 0 y 1. Por lo tanto, se eligieron los valores de 0, 0.5, 0.8 y 1 para la realización de este test. En la **Tabla 14** se muestran las propiedades comunes del concreto en ELS para el test 3.

En la **Tabla 15** se detallan las propiedades en ELS del acero que se tomaron en cuenta para el test de sensibilidad 3. El valor del *friction coefficient* y el resto de las propiedades del acero se mantuvieron constantes para las simulaciones correspondientes a cada uno de los 3 valores del *friction coefficient* del concreto.

Tabla 14. Propiedades comunes del concreto en ELS para el test 3.

Propiedades del concreto	Valor	Unidades
Separation strain	0.1	-
Friction Coefficient	0/0.5/0.8/1	-
Contact Spring Unloading Stiffness Factor	10	-
Residual Shear Strength	1	-
External Damping Coefficient	0	-
Normal Contact Stiffness Factor	0.0001	-
Shear Contact Stiffness Factor	0.00001	-
Linear Temperature Expansion Coefficient	0.0000145	Ver Tabla 7
Minimum Normal Stiffness Factor	0.01	-
Minimum Shear Stiffness Factor	0.01	-

Tabla 15. Propiedades en ELS del acero de estribos y refuerzo longitudinal para el test 3.

Propiedades del acero	Valor	Unidades
Shear modulus	800000	kg/cm^2
Separation Strain	0.1	-
Friction Coefficient	0.8	-
External Damping Coefficient	0	-
Normal Contact Stiffness Factor	0.0001	-
Shear Contact Stiffness Factor	1.00E-05	-
Contact Spring Unloading Stiffness Factor	10	-
Linear Temperature Expansion Coefficient	1.30E-05	Ver Tabla 7
Post Yield Stiffness Ratio	0.01	-
Ultimate/ Yield Stress Ratio	1.4	-
Failure Softening Factor	0.1	-
Shear Stress Weight	1	-

El cuarto test de sensibilidad se basó en el cambio de valores del *friction coefficient* del acero. Al igual que el concreto el valor por defecto de este parámetro para el acero es 0.8. Sin embargo, este valor de acuerdo con el manual del software varía entre 0 y 1. Por lo tanto, se eligieron los valores de 0, 0.5, 0.8 y 1 para la realización de este test. En la **Tabla 16** se muestran las propiedades del acero que fueron fijas. Además, se observan los valores del *friction coefficient* del acero que fueron usados para el test de sensibilidad 4.

De forma similar que en el test 3, en este test se mantuvieron constantes las propiedades del concreto para todas las simulaciones correspondientes a cada valor que se evaluó en el *friction coefficient* del acero. El valor del *friction coefficient* del concreto se fijó en 0.8, tal como se observa en la **Tabla 17**.

Tabla 16. Propiedades en ELS del acero de estribos y refuerzo longitudinal para el test 4.

Propiedades del acero	Valor	Unidades
Shear modulus	800000	kg/cm^2
Separation Strain	0.1	-
Friction Coefficient	0/0.5/0.8/1	-
External Damping Coefficient	0	-
Normal Contact Stiffness Factor	0.0001	-
Shear Contact Stiffness Factor	1.00E-05	-
Contact Spring Unloading Stiffness Factor	10	-
Linear Temperature Expansion Coefficient	1.30E-05	Ver Tabla 7
Post Yield Stiffness Ratio	0.01	-
Ultimate/ Yield Stress Ratio	1.4	-
Failure Softening Factor	0.1	-
Shear Stress Weight	1	-

Tabla 17. Propiedades comunes del concreto en ELS para el test 4

Propiedades del concreto	Valor	Unidades
Separation strain	0.1	-
Friction Coefficient	0.8	-
Contact Spring Unloading Stiffness Factor	10	-
Residual Shear Strength	1	-
External Damping Coefficient	0	-
Normal Contact Stiffness Factor	0.0001	-
Shear Contact Stiffness Factor	0.00001	-
Linear Temperature Expansion Coefficient	0.0000145	Ver Tabla 7
Minimum Normal Stiffness Factor	0.01	-
Minimum Shear Stiffness Factor	0.01	-

El quinto test de sensibilidad se basó en el cambio de valores del *contact spring unloading stiffness factor* del concreto. En el manual teórico del software el valor por defecto es 2. Sin embargo, se menciona que un valor adecuado para una correcta disipación de energía cuando dos elementos hacen contacto es 10. Se eligieron los valores de 0, 2, 5 y 10 para evaluar el grado de influencia de este parámetro en el comportamiento de la estructura en estudio. En la **Tabla 18** se muestran las propiedades del concreto que fueron fijas. Además, se observan los valores del *contact spring unloading stiffness factor* del concreto que fueron usados.

En la **Tabla 19** se detallan las propiedades en ELS para el acero en el test 5. El *contact spring unloading stiffness factor* y el resto de las propiedades del acero fueron las mismas para las simulaciones correspondientes a cada valor del *contact spring unloading stiffness factor* del concreto.

Tabla 18. Propiedades comunes del concreto en ELS para el test 5

Propiedades del concreto	Valor	Unidades
Separation strain	0.1	-
Friction Coefficient	0.8	-
Contact Spring Unloading Stiffness Factor	0/2/5/10	-
Residual Shear Strength	1	-
External Damping Coefficient	0	-
Normal Contact Stiffness Factor	0.0001	-
Shear Contact Stiffness Factor	0.00001	-
Linear Temperature Expansion Coefficient	0.0000145	Ver Tabla 7
Minimum Normal Stiffness Factor	0.01	-
Minimum Shear Stiffness Factor	0.01	-

Tabla 19. Propiedades en ELS del acero de estribos y refuerzo longitudinal para el test 5

Propiedades del acero	Valor	Unidades
Shear modulus	800000	kg/cm^2
Separation Strain	0.1	-
Friction Coefficient	0.8	-
External Damping Coefficient	0	-
Normal Contact Stiffness Factor	0.0001	-
Shear Contact Stiffness Factor	1.00E-05	-
Contact Spring Unloading Stiffness Factor	2	-
Linear Temperature Expansion Coefficient	1.30E-05	Ver Tabla 7
Post Yield Stiffness Ratio	0.01	-
Ultimate/ Yield Stress Ratio	1.4	-
Failure Softening Factor	0.1	-
Shear Stress Weight	1	-

El sexto test de sensibilidad se basó en el cambio de valores del *contact spring unloading stiffness factor* del acero. Al igual que en el quinto test se eligieron los valores de 0, 2, 5 y 10. En la **Tabla 20** se muestran las propiedades del acero que se mantuvieron fijas y se observan los valores de su *contact spring unloading stiffness factor* que fueron usados para el test de sensibilidad.

En la **Tabla 21** se detallan las propiedades en ELS del concreto que se tomaron en cuenta para el test de sensibilidad 6. El valor del *contact spring unloading stiffness factor* y el resto de las propiedades del concreto se mantuvieron constantes para las simulaciones correspondientes a cada uno de los 3 valores del *contact spring unloading stiffness factor* del concreto.

Tabla 20. Propiedades en ELS del acero de estribos y refuerzo longitudinal para el test 6.

Propiedades del acero	Valor	Unidades
Shear modulus	800000	kg/cm^2
Separation Strain	0.1	-
Friction Coefficient	0.8	-
External Damping Coefficient	0	-
Normal Contact Stiffness Factor	0.0001	-
Shear Contact Stiffness Factor	1.00E-05	-
Contact Spring Unloading Stiffness Factor	0/2/5/10	-
Linear Temperature Expansion Coefficient	1.30E-05	Ver Tabla 7
Post Yield Stiffness Ratio	0.01	-
Ultimate/ Yield Stress Ratio	1.4	-
Failure Softening Factor	0.1	-
Shear Stress Weight	1	-

Tabla 21. Propiedades comunes del concreto en ELS para el test 6

Propiedades del concreto	Valor	Unidades
Separation strain	0.1	-
Friction Coefficient	0.8	-
Contact Spring Unloading Stiffness Factor	2	-
Residual Shear Strength	1	-
External Damping Coefficient	0	-
Normal Contact Stiffness Factor	0.0001	-
Shear Contact Stiffness Factor	0.00001	-
Linear Temperature Expansion Coefficient	0.0000145	Ver Tabla 7
Minimum Normal Stiffness Factor	0.01	-
Minimum Shear Stiffness Factor	0.01	-

El séptimo test de sensibilidad estuvo basado en el cambio de valores del *ultimate/ yield stress ratio*. Este parámetro solo está disponible para el acero y su valor por defecto de acuerdo con el manual teórico del software es 1.4. Sin embargo, se menciona que su valor varía entre 1.11 y 1.67, razón por la cual los valores que se eligieron para la realización de este test fueron 1.11, 1.4 y 1.67. En la **Tabla 22** se detallan las propiedades en ELS del acero de estribos y refuerzo longitudinal para el test 7.

Tabla 22. Propiedades en ELS del acero de estribos y refuerzo longitudinal para el test 7

Propiedades del acero	Valor	Unidades
Shear modulus	800000	kg/cm^2
Separation Strain	0.1	-
Friction Coefficient	0.8	-
External Damping Coefficient	0	-
Normal Contact Stiffness Factor	0.0001	-
Shear Contact Stiffness Factor	1.00E-05	-
Contact Spring Unloading Stiffness Factor	0/2/5/10	-
Linear Temperature Expansion Coefficient	1.30E-05	Ver Tabla 7
Post Yield Stiffness Ratio	0.01	-
Ultimate/ Yield Stress Ratio	1.11/1.4/1.67	-
Failure Softening Factor	0.1	-
Shear Stress Weight	1	-

4.4 Mallado

La discretización o mallado de una estructura en ELS, como se explicó en capítulos anteriores se realiza mediante elementos que están conectados con resortes, a los cuales se les asignan las propiedades del material. Se discretizó cada una de las 10 vigas en las 3 direcciones de los ejes globales. El “eje x” fue paralelo al eje longitudinal de las vigas a estudiar, el “eje y” por su parte fue paralelo al ancho de las vigas y finalmente el “eje z” fue paralelo al peralte. En la **Figura 44** se muestra con detalle la ubicación de los ejes globales, que determinaron entre sí los planos XY, XZ y ZY.

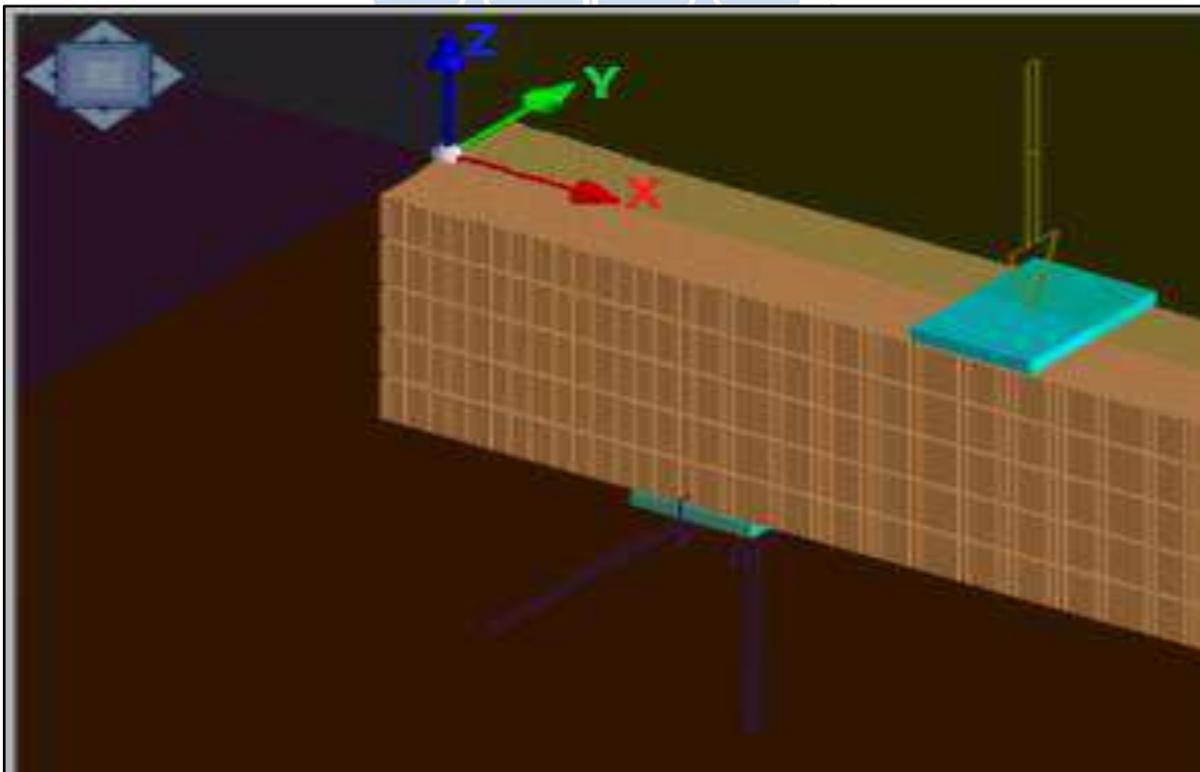


Figura 44. Ubicación de los ejes globales usados en la simulación de las vigas

El número de elementos a usar en el mallado es definido por el usuario. Sin embargo, se debe tener algunas consideraciones para determinar este número, por ejemplo:

- **Tiempo computacional:** Mientras mayor sea el número de elementos usados para discretizar la estructura, el tiempo de procesamiento será mayor.
- **Número máximo de elementos permitidos:** Esto depende del tipo de licencia con la que se cuenta, en este caso se tiene un límite de 50 000 elementos porque es la licencia más económica y es suficiente para los objetivos de esta tesis.
- **Caso de estudio:** Dependiendo del caso de estudio se puede definir un número mayor o menor de elementos. Por ejemplo, si se necesita estudiar el colapso progresivo de una estructura, se requieren elementos relativamente pequeños. Por tanto, el número total de elementos será alto.

En esta tesis se hará un análisis de sensibilidad respecto al número de elementos para discretizar una viga. Debido a que el número de elementos máximo que se puede usar con la licencia más económica es de 50 000 elementos. Se evaluarán 3 tipos de mallado, el primer mallado consistirá en 16504 elementos, el segundo estará compuesto por 33004 y finalmente el tercer mallado estará constituido por 49504.

Se comparará la precisión y calidad de los resultados obtenidos entre los mallados previamente mencionados. Los criterios para la elección del mejor resultado serán el patrón de agrietamiento y la curva fuerza deflexión de la viga 3, que fue tomada como referencia para este test de sensibilidad. También, se tomará en cuenta el tiempo computacional de procesamiento como un criterio adicional para la elección de un mallado óptimo. El test de sensibilidad del mallado se llevará cabo con los mejores resultados que se obtengan en la matriz de sensibilidad explicada previamente.

Para las vigas de esta investigación se han empleado 22504 elementos en total para cada una. Esto debido a que es un número lo suficientemente alto para asegurar una buena discretización, pero no lo suficiente para generar un tiempo computacional largo, además de estar dentro del rango de elementos permitidos por la licencia. De todos los elementos, 22500 fueron de la viga y los 4 restantes correspondieron a las placas de transmisión de carga y a los apoyos, ya que estos 4 fueron elementos de 1×1 . Es decir que cada placa estuvo compuesta de un único elemento y no se discretizó en ninguna dirección como se hizo con las vigas. En la **Figura 45** se muestra el mallado representativo de las vigas en estudio.

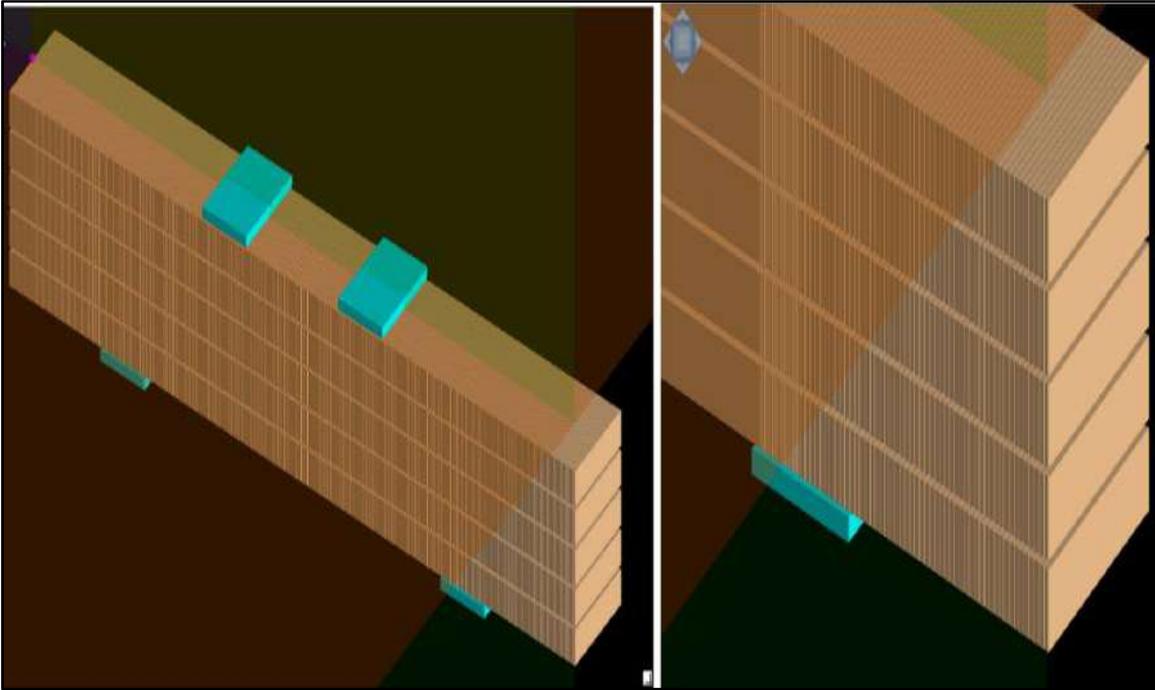


Figura 45. Mallado representativo de las vigas en estudio

4.5 Naturaleza de la carga aplicada

4.5.1 Tipo de carga

La carga usada en ELS fue de tipo estática, concentrada y monotónica, es decir que se aplicó en una sola dirección que se mantuvo durante todo el ensayo.

En ELS, se aplicó la carga total dada por el experimento directamente a las placas. El valor de la carga fue precedido de signo negativo en la dirección del eje z.

4.5.2 Etapas de carga

Las etapas de carga hacen referencia a un escenario de carga, ya que en cada etapa (*stage*) se puede definir como estática o dinámica. Es decir, una estructura puede tener distintos tipos de carga a la vez en etapas distintas. Además, las condiciones de borde (apoyos) pueden ser distintas en cada etapa.

En ELS se pueden aplicar distintas cargas (estáticas, dinámicas) a una estructura. Sin embargo, para un análisis no lineal se deben usar etapas de carga. (Applied Science International, 2018). En la **Tabla 23** se detalla el uso de etapas en ELS.

Tabla 23. Importancia y uso de etapas de carga en ELS

Caso	Análisis Lineal	Análisis no Lineal
Cargas vivas + Cargas muertas	Ambas cargas pueden aplicarse al mismo tiempo o los resultados de ambos análisis se suman.	Es importante la secuencia de cargas, el peso propio y las cargas muertas deben agregarse primero y después las cargas vivas.
Carga sísmica	Las cargas de gravedad pueden agregarse a los resultados de un análisis dinámico bajo terremoto para obtener los resultados finales.	Las cargas de gravedad deben ser aplicadas primero a la estructura antes de aplicar el sismo. El sismo se aplica a la estructura con esfuerzos iniciales resultantes de cargas de gravedad.
Carga proveniente de un impacto de proyectil	No puede ser realizado	En la primera etapa, la estructura necesita ser analizada bajo cargas de gravedad de una manera estática. El proyectil se puede activar en la segunda etapa con una velocidad inicial. La segunda etapa debería ser entonces una etapa dinámica.

Fuente: Applied Science Intenational (2018)

Es necesario aclarar que estas “etapas”, no son las mismas que las mencionadas en el acápite 1.2.2, ya que allí hacen referencia al progreso gradual en que aparecen las grietas. Según Gonzales Cuevas et al. (2005) existen 3 etapas de carga en vigas simplemente apoyadas con cargas puntuales.

- **Concreto no agrietado:** Esta etapa se caracteriza porque la sección resiste la flexión, bajo cargas pequeñas.
- **Concreto agrietado:** Esta etapa se caracteriza por la aparición de grietas de flexión debido a que los esfuerzo superan la resistencia a la tracción del concreto.
- **Falla de la viga:** En esta etapa las grietas de tensión crecen y se extienden más arriba de la mitad del peralte. Consecuentemente, el eje neutro se ubica más cerca del borde superior reduciendo de esta manera la sección resistente del concreto.

Una característica notable de las etapas de carga en ELS, es que, específicamente la primera de estas es para asignar el peso propio y cargas muertas, por lo que, las cargas vivas se adicionan a partir de la etapa 2. Se crearon 2 etapas de tipo estático, la primera para el peso propio y la segunda para aplicar la carga ultima dada por el experimento.

En la **Figura 46** se observa el escenario de carga para la viga 2. Al crear una etapa de carga de tipo estática (*static stage*) se crean también las opciones de “loads” y “boundary conditions”. En la primera opción se asignaron las cargas a las placas. Las cargas fueron concentradas y en dirección del eje z negativo.

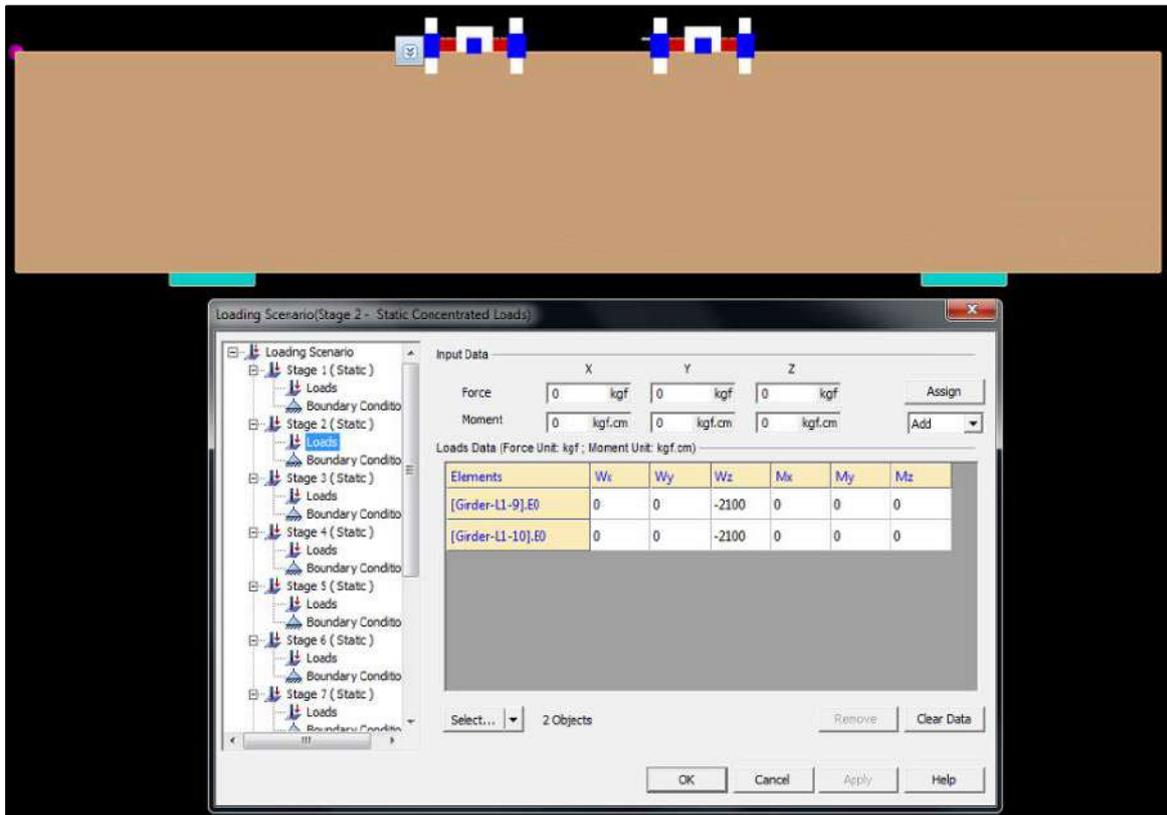


Figura 46. Proceso de introducción y aplicación de cargas en ELS

4.6 Condiciones de borde

Para simular esta condición de apoyo en ELS, se aplicó las respectivas restricciones a cada placa de soporte. Para la placa izquierda se asignó apoyo fijo, se restringió el desplazamiento en las 3 direcciones globales (x,y,z) y para la placa derecha se usó un apoyo móvil, por lo que se restringió el desplazamiento en el “eje y” y “eje z”. En la **Figura 47** se muestra una vista paralela al plano XZ en la cual se aprecia la aplicación de restricciones a las placas mencionadas. Éstas condiciones de borde se asignaron en la primera etapa “stage 1”, sin embargo, fueron las mismas para todas las etapas subsecuentes.

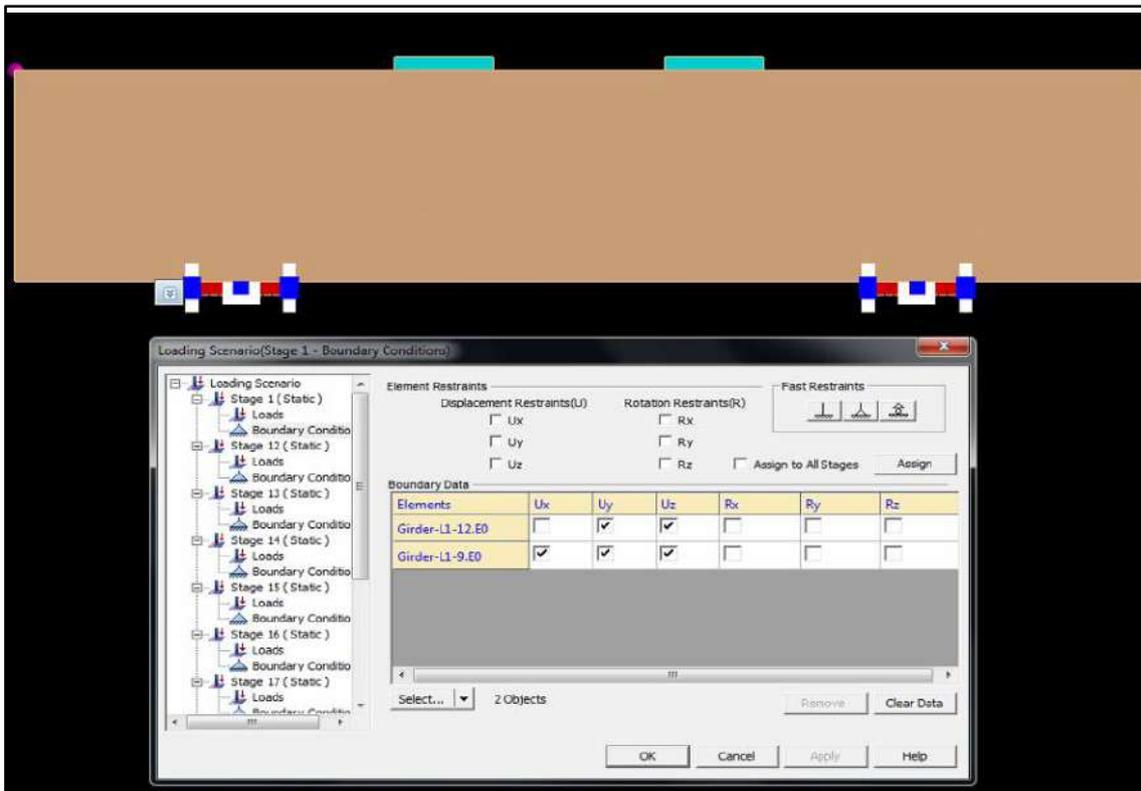


Figura 47. Creación de condiciones de apoyo de vigas.

4.6.1 Restricción de los grados de libertad

En la Figura 48 se ilustra el proceso seguido en ELS para asignar las restricciones de los grados de libertad de los elementos de la estructura. Se restringió los desplazamientos en el “eje y”, rotación en el “eje x” y rotación en el “eje z”. Esto se hizo con la finalidad de analizar el cortante puro y evitar que los elementos soporten torsiones.

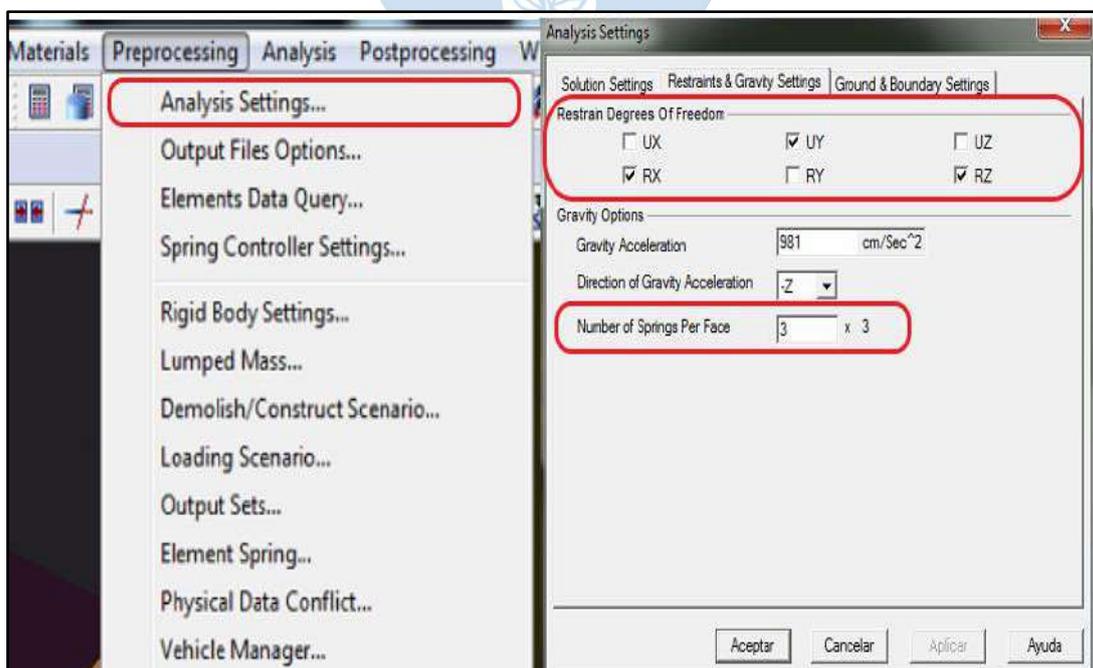


Figura 48. Restricción de grados de libertad.

4.6.2 Conectividad de elementos

Como ya se explicó en el **Capítulo 2**, los elementos se conectan entre si con resortes. Sin embargo, el número de resortes con los que se puede conectar 2 elementos no tiene restricciones, no obstante, al incrementar la cantidad de estos, el tiempo computacional de procesamiento lo hará también. Por tanto, se debe establecer la cantidad de resortes teniendo en cuenta también la cantidad de elementos, ya que mientras más refinado sea el mallado se tendrá muchos más resortes y el procesamiento de información será más largo. En la **Figura 48** se muestra la opción donde se asignó una matriz de resortes de 3x3 en las caras adyacentes de los elementos que conforman cada una de las vigas.

4.7 Resumen del programa de simulación

En la **Tabla 24** hasta la **Tabla 27** se presenta el esquema seguido en el programa de simulación de esta tesis. Se hicieron 7 tests de sensibilidad para determinar los valores más adecuados de 4 parámetros seleccionados debido a la poca información que se tuvo de estos. Posteriormente con los resultados de los 7 primeros tests se realizó un octavo test de sensibilidad para evaluar la influencia de la refinación del mallado en los resultados de la simulación. Finalmente, conociendo los resultados de los 8 tests anteriores, se hizo un noveno test para evaluar la estabilidad de la simulación.

Este último test se hizo, ya que en otras investigaciones se encontró que hubo un comportamiento aleatorio cuando una misma estructura se simuló varias veces. Cordova (2021) en su investigación llamada “Simulación de remoción de columna a un pórtico de concreto armado con extreme loading for structures”, encontró que en 8 simulaciones con las mismas condiciones de simulación (propiedades de materiales, geometría y condiciones de borde), la ubicación de las grietas fue distinta y aleatoria en algunos casos.

Tabla 24. Resumen del programa de simulación - 1

Identificador	Parámetro	Valores evaluados	Valor recomendado (rango)	Fuente	Descripción
Test 1	<i>Separation strain del concreto</i>	0.1, 0.15, 0.2	0.1 - 0.2	Applied Science International (2018)	Las propiedades del acero se mantuvieron fijas y su <i>separation strain</i> fue 0.1 para las 3 simulaciones correspondientes al test 1.
Test 2	<i>Separation strain del acero</i>	0.1, 0.15, 0.2	0.1 - 0.2	Applied Science International (2018)	Las propiedades del concreto se mantuvieron fijas y su <i>separation strain</i> fue 0.1 para las 3 simulaciones correspondientes al test 2.
Test 3	<i>Friction coefficient del concreto</i>	0, 0.5, 0.8, 1	0 - 1	Applied Science International (2018)	Las propiedades del acero se mantuvieron constantes y su <i>friction coefficient</i> fue 0.8 para las 4 simulaciones correspondientes al test 3.
Test 4	<i>Friction coefficient del acero</i>	0, 0.5, 0.8, 1	0 - 1	Applied Science International (2018)	Las propiedades del concreto se mantuvieron constantes y su <i>friction coefficient</i> fue 0.8 para las 4 simulaciones correspondientes al test 4.
Test 5	<i>Contact spring unloading stiffness factor del concreto</i>	0, 2, 5, 10	0 - 10	Applied Science International (2018)	Las propiedades del acero fueron constantes y su <i>contact spring unloading stiffness factor</i> fue 2 para las 4 simulaciones correspondientes al test 5.
Test 6	<i>Contact spring unloading stiffness factor del acero</i>	0, 2, 5, 10	0 - 10	Applied Science International (2018)	Las propiedades del concreto fueron constantes y su <i>contact spring unloading stiffness factor</i> fue 2 para las 4 simulaciones correspondientes al test 6.
Test 7	<i>Ultimate/ yield stress ratio</i>	1.14, 1.4, 1.67	1.14 – 1.67	Applied Science International (2018)	Las propiedades del concreto se mantuvieron fijas para las 3 simulaciones correspondientes al test 7.

Tabla 25. Resumen del programa de simulación - 2

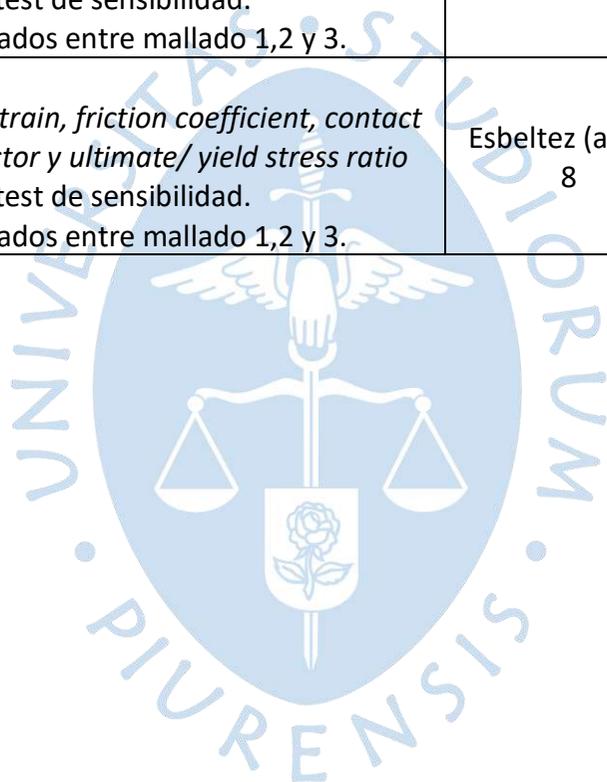
Identificador	Parámetro	Valor	Descripción
Test 8	Número de elementos	Elementos = 16504, 34004, 49612	Con los mejores resultados que se obtuvieron de los 7 tests de sensibilidad anteriores (22504 elementos) se simuló la viga 3 con un mallado grueso, mediano y fino
Test 9	<i>Estabilidad de la simulación</i>	-	Se harán 8 pruebas de la viga 3 con los mejores resultados de los parámetros investigados anteriormente. La viga tendrá las mismas características en todas las simulaciones.
Viga 1	<ul style="list-style-type: none"> - Esbeltez - Mejor valor de <i>separation strain, friction coefficient, contact spring unloading stiffness factor</i> y <i>ultimate/ yield stress ratio</i> obtenidos de los 7 primeros test de sensibilidad. - Mallado con mejores resultados entre mallado 1,2 y 3. 	Esbeltez (a/d) = 1	Con todos los parámetros y mallado ajustados después del análisis de sensibilidad, se simuló la viga 1.
Viga 2	<ul style="list-style-type: none"> - Esbeltez - Mejor valor de <i>separation strain, friction coefficient, contact spring unloading stiffness factor</i> y <i>ultimate/ yield stress ratio</i> obtenidos de los 7 primeros test de sensibilidad. - Mallado con mejores resultados entre mallado 1,2 y 3. 	Esbeltez (a/d) = 1.5	Con todos los parámetros y mallado ajustados después del análisis de sensibilidad, se simuló la viga 2.
Viga 3	<ul style="list-style-type: none"> - Esbeltez - Mejor valor de <i>separation strain, friction coefficient, contact spring unloading stiffness factor</i> y <i>ultimate/ yield stress ratio</i> obtenidos de los 7 primeros test de sensibilidad. - Mallado con mejores resultados entre mallado 1,2 y 3. 	Esbeltez (a/d) = 2	Con todos los parámetros y mallado ajustados después del análisis de sensibilidad, se simuló la viga 3.

Tabla 26. Resumen del programa de simulación - 3

Identificador	Parámetro	Valor	Descripción
Viga 4	<ul style="list-style-type: none"> - Esbeltez - Mejor valor de <i>separation strain, friction coefficient, contact spring unloading stiffness factor</i> y <i>ultimate/ yield stress ratio</i> obtenidos de los 7 primeros test de sensibilidad. - Mallado con mejores resultados entre mallado 1,2 y 3. 	Esbeltez (a/d) = 2.5	Con todos los parámetros y mallado ajustados después del análisis de sensibilidad, se simuló la viga 4.
Viga 5	<ul style="list-style-type: none"> - Esbeltez - Mejor valor de <i>separation strain, friction coefficient, contact spring unloading stiffness factor</i> y <i>ultimate/ yield stress ratio</i> obtenidos de los 7 primeros test de sensibilidad. - Mallado con mejores resultados entre mallado 1,2 y 3. 	Esbeltez (a/d) = 3	Con todos los parámetros y mallado ajustados después del análisis de sensibilidad, se simuló la viga 5.
Viga 6	<ul style="list-style-type: none"> - Esbeltez - Mejor valor de <i>separation strain, friction coefficient, contact spring unloading stiffness factor</i> y <i>ultimate/ yield stress ratio</i> obtenidos de los 7 primeros test de sensibilidad. - Mallado con mejores resultados entre mallado 1,2 y 3. 	Esbeltez (a/d) = 4	Con todos los parámetros y mallado ajustados después del análisis de sensibilidad, se simuló la viga 6.
Viga 7	<ul style="list-style-type: none"> - Esbeltez - Mejor valor de <i>separation strain, friction coefficient, contact spring unloading stiffness factor</i> y <i>ultimate/ yield stress ratio</i> obtenidos de los 7 primeros test de sensibilidad. - Mallado con mejores resultados entre mallado 1,2 y 3. 	Esbeltez (a/d) = 5	Con todos los parámetros y mallado ajustados después del análisis de sensibilidad, se simuló la viga 7.
Viga 8	<ul style="list-style-type: none"> - Esbeltez - Mejor valor de <i>separation strain, friction coefficient, contact spring unloading stiffness factor</i> y <i>ultimate/ yield stress ratio</i> obtenidos de los 7 primeros test de sensibilidad. - Mallado con mejores resultados entre mallado 1,2 y 3. 	Esbeltez (a/d) = 6	Con todos los parámetros y mallado ajustados después del análisis de sensibilidad, se simuló la viga 8.

Tabla 27. Resumen del programa de simulación - 4

Identificador	Parámetro	Valor	Descripción
Viga 9	<ul style="list-style-type: none"> - Esbeltez - Mejor valor de <i>separation strain, friction coefficient, contact spring unloading stiffness factor</i> y <i>ultimate/ yield stress ratio</i> obtenidos de los 7 primeros test de sensibilidad. - Mallado con mejores resultados entre mallado 1,2 y 3. 	Esbeltez (a/d) = 7	Con todos los parámetros y mallado ajustados después del análisis de sensibilidad, se simuló la viga 9.
Viga 10	<ul style="list-style-type: none"> - Esbeltez - Mejor valor de <i>separation strain, friction coefficient, contact spring unloading stiffness factor</i> y <i>ultimate/ yield stress ratio</i> obtenidos de los 7 primeros test de sensibilidad. - Mallado con mejores resultados entre mallado 1,2 y 3. 	Esbeltez (a/d) = 8	Con todos los parámetros y mallado ajustados después del análisis de sensibilidad, se simuló la viga 10.



4.8 Resultados

4.8.1 Test 1

El primer test de sensibilidad se realizó con la finalidad de evaluar el mejor valor del *separation strain* del concreto en el rango recomendado por el manual del software. Los resultados obtenidos en ELS para el test 1 se muestran en la **Figura 49**. En la parte superior se muestra la viga 3, que fue la que se eligió para desarrollar el análisis de sensibilidad. En la columna izquierda se observan los patrones de agrietamiento y en la derecha los contornos correspondientes a las deformaciones principales¹.

Las grietas de corte se simularon adecuadamente en ELS. Se extendieron desde los apoyos hasta los puntos de carga. Además, alcanzaron la zona de aplastamiento por compresión tal como se esperaba en esta viga. Las grietas de corte se desarrollaron a partir de grietas de flexión, tal como se muestra en los contornos de deformaciones principales. Sin embargo, las grietas de flexión no se lograron capturar al nivel de las grietas de corte. En la **Figura 49** se visualizaron puntos que indicaron su existencia, aunque con poca claridad (ver círculos con líneas rojas).

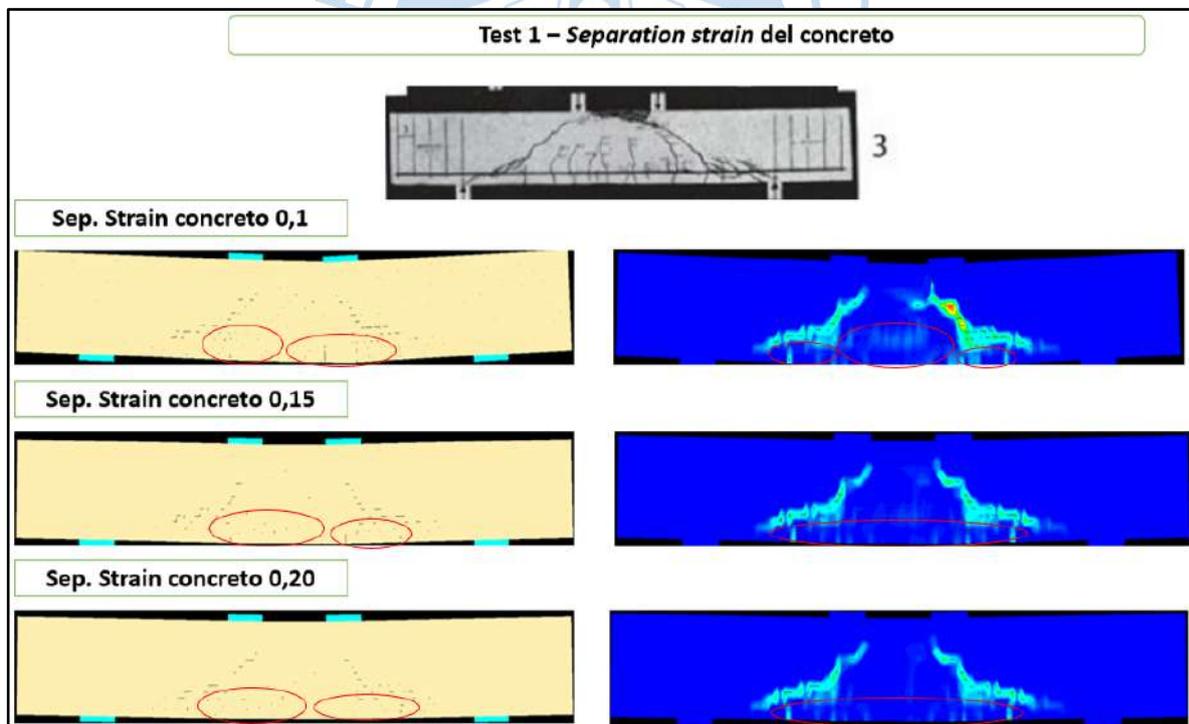


Figura 49. Patrones de agrietamiento del test 1 en ELS para viga 3 ($a/d = 2$)

Los contornos correspondientes a las deformaciones principales indicaron la ubicación de los mayores esfuerzos principales de tracción que causaron las grietas de corte (o grietas por tracción diagonal). En la **Figura 50** se muestra el rango de valores de las deformaciones

¹ Deformación principal: Deformación correspondiente al esfuerzo normal principal. Applied Science International (2003)

principales que se obtuvieron con ELS en el test 1 para un separation strain del concreto de 0.1.

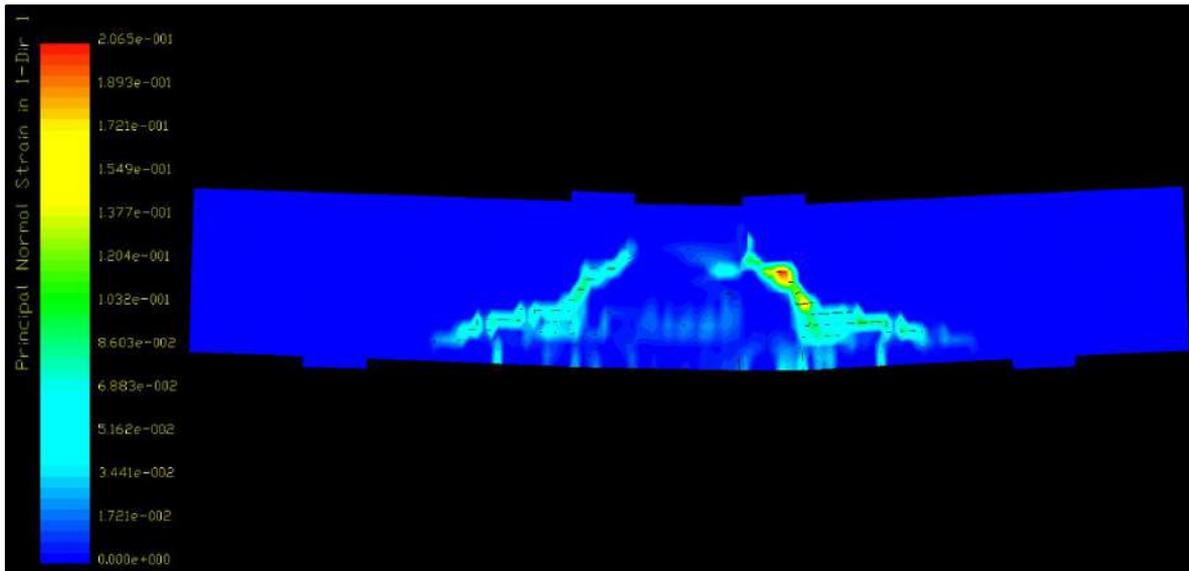


Figura 50. Rango de deformaciones principales para separation strain del concreto 0.1

En la **Figura 51** se muestra con mejor calidad la grieta de corte del lado derecho, correspondiente a un *separation strain* del concreto igual a 0.1 (el valor que dio mejores resultados respecto al patrón de agrietamiento).

Cuando el valor del *separation strain* del concreto fue 0.1, las grietas fueron más evidentes. Además, se vió una zona de color naranja en la parte superior de la grieta derecha de corte que indicó que la falla fue más pronunciada en este lado. En la viga real se pudo ver que se formaron 2 grietas de corte bien marcadas en lado derecho, y en ELS se obtuvo una grieta bien definida en este lado.

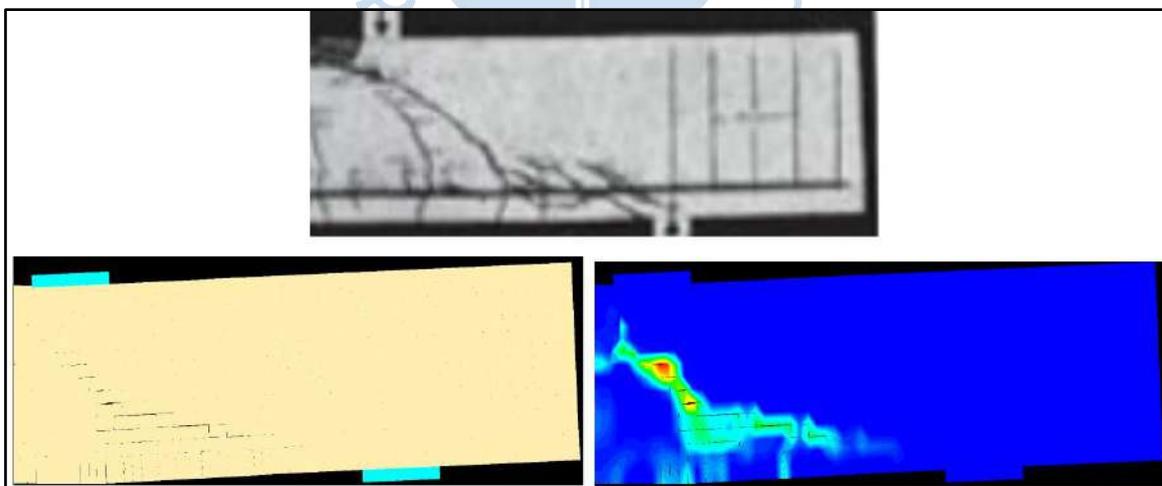


Figura 51. Patrón de agrietamiento para sep. strain concreto 0.1

En la **Figura 52** se muestran los contornos correspondientes a los esfuerzos en el eje x cuando el *separation strain* del concreto fue 0.1. Se pudo visualizar que el aplastamiento por

compresión que sufrió la zona superior entre los puntos de aplicación de carga fue simulado por una mancha verde que fue un indicador de los mayores esfuerzos negativos (compresión).

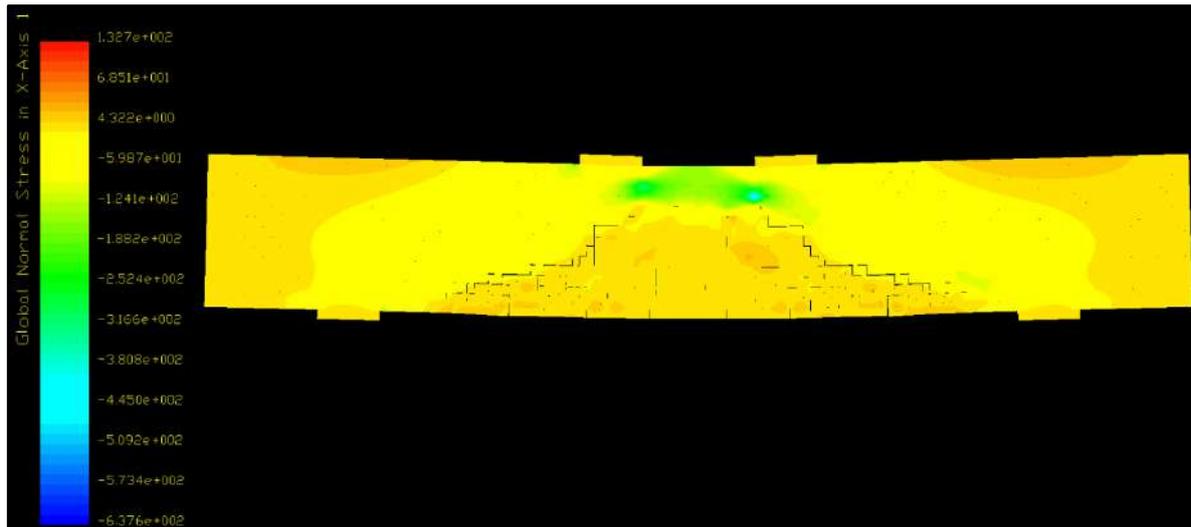


Figura 52. Contornos de esfuerzos para separation strain del concreto 0.1

El experimento estuvo controlado por fuerzas, por tanto, estas fueron datos de entrada para ELS, que simuló los desplazamientos. En consecuencia, los porcentajes de error se calcularon respecto a la diferencia de desplazamientos correspondientes a una misma fuerza. Para esto, se definieron 3 zonas que resultaron de puntos de intersección entre la curva real y la curva de ELS.

En la **Figura 53** se presentan los resultados de las curvas fuerza vs deformación obtenidas con ELS en el test 1. Adicionalmente, se detallan las zonas establecidas con el fin de comparar adecuadamente los desplazamientos experimentales con los obtenidos en ELS.

Las curvas correspondientes a los diferentes valores del *separation strain* del concreto no mostraron diferencias notables entre sí. Además, se acercaron con un error que varió entre 0 y 43.86 % dependiendo de la zona de comparación entre la curva experimental y la curva de la simulación.

En la zona 1, la diferencia entre los desplazamientos dados por ELS y los experimentales, fue muy baja. El porcentaje de error en esa zona varió entre 0 % y 8%. En la zona 2, el mayor margen de error fue de 23.20% para una fuerza aproximada de 15 tn. Por otro lado, la diferencia de desplazamientos en la zona 3 fue significativo. El máximo margen de error fue de 43.86 %, que correspondió al desplazamiento resultante de una fuerza de 22 tn.

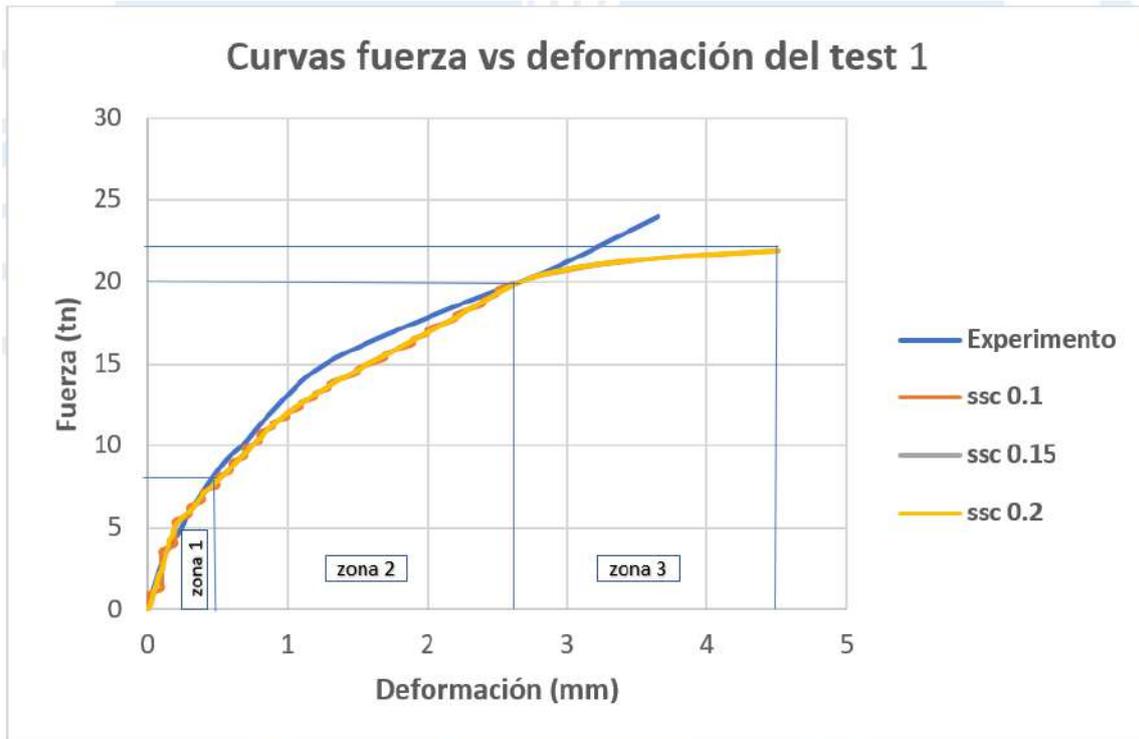


Figura 53. Curvas fuerza - deformación del test 1 (separation strain del concreto – ssc)

En la Figura 54 se muestran las gráficas de barras que muestran los mayores porcentajes de error entre los resultados obtenidos con ELS y los experimentales.

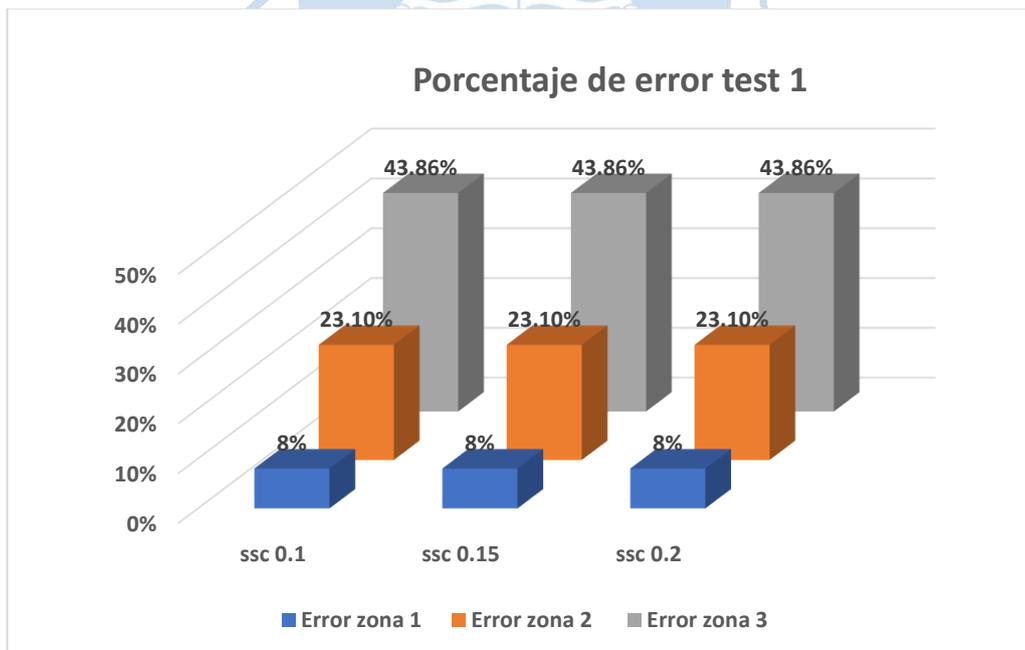


Figura 54. Porcentaje de error en el test 1

Los márgenes de error en los desplazamientos fueron los mismos para los diferentes valores. Además, se obtuvo mejores resultados para los patrones de agrietamiento cuando el *separation strain* del concreto fue 0.1. Por lo tanto, después de analizar los resultados del test 1 se decidió asignar **0.1** como mejor valor de *separation strain* del concreto.

4.8.2 Test 2

En la **Figura 55** se muestran los patrones de agrietamiento obtenidos en ELS para el test 2. Se pudo visualizar que las grietas de corte se simularon con una precisión y ubicación aceptable respecto a las obtenidas experimentalmente. En la columna izquierda se muestran los patrones de agrietamiento obtenidos para los valores de 0.1, 0.15 y 0.2 del *separation strain* del acero. En la columna derecha se muestran los contornos correspondientes a las deformaciones principales donde se apreció con mejor calidad los patrones de agrietamiento.

Las grietas de corte se extendieron desde los apoyos hasta los puntos de aplicación de la carga y alcanzaron la zona de aplastamiento por compresión, tal como sucedió en el experimento. Las grietas que mejor se apreciaron fueron las grietas de corte, mientras que las grietas de flexión fueron simuladas con menor calidad por algunos puntos en la zona de aplastamiento por compresión (ver círculos con líneas rojas en la **Figura 55**).

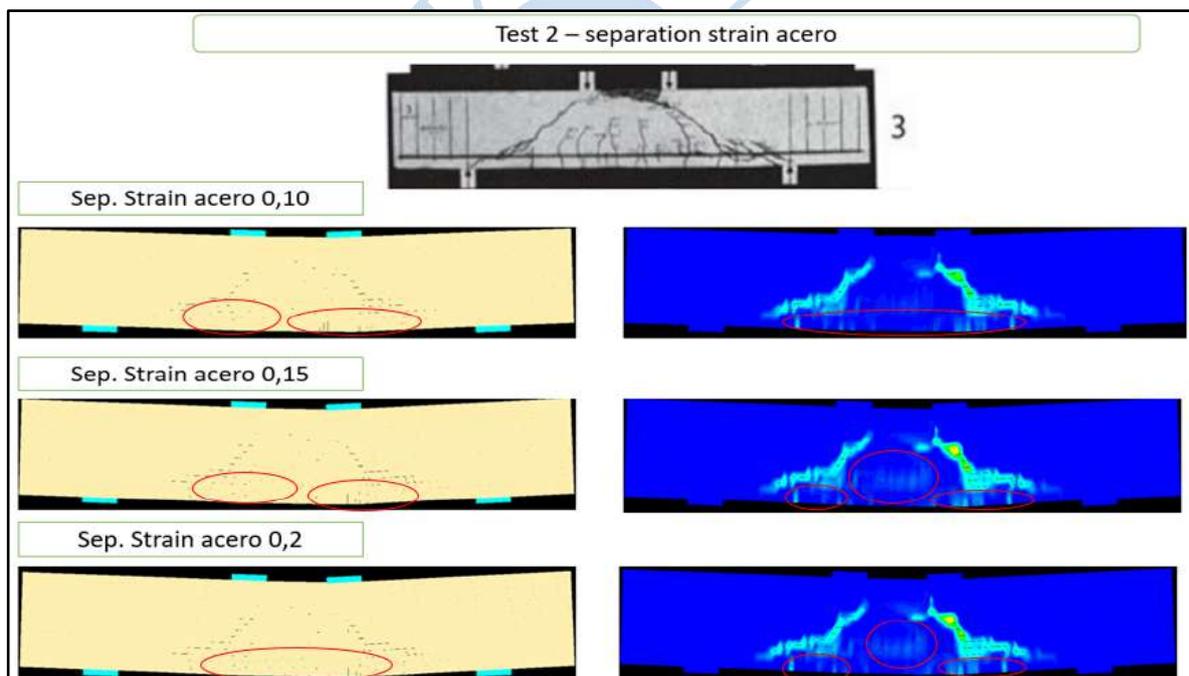


Figura 55. Patrones de agrietamiento del test 2 en ELS para viga 3 ($a/d = 2$)

Los contornos correspondientes a las deformaciones principales indicaron la ubicación de los mayores esfuerzos principales de tracción que causaron las grietas de corte. En la **Figura 56** se muestra el rango de valores de las deformaciones principales que se obtuvieron con ELS en el test 2 para un *separation strain* del acero igual 0.2.

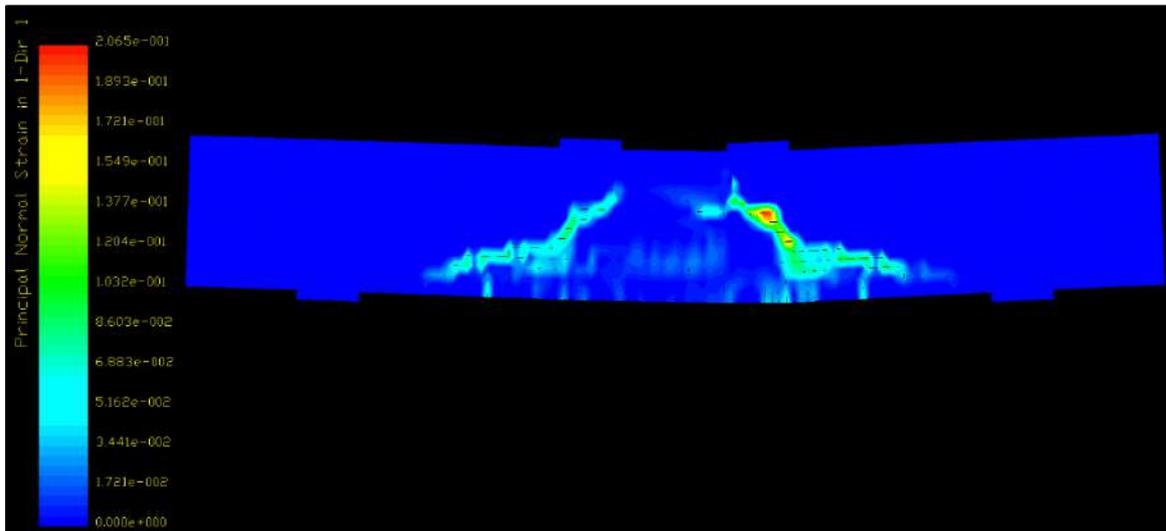


Figura 56. Rango de deformaciones principales para separation strain del acero 0.2

Se pudo ver que las grietas de corte fueron más marcadas cuando el *separation strain* del acero fue 0.2. Se visualizó una zona de color amarillo en el extremo superior de la grieta derecha que indicó que la falla fue más pronunciada de ese lado. En la viga real se pudo ver que se formaron 2 grietas de corte bien marcadas en lado derecho y en ELS se obtuvo una grieta más ancha y definida en este lado.

En la **Figura 57** se muestra con mejor resolución la grieta derecha de corte correspondiente a un *separation strain* del acero igual 0.2, que fue el valor que dio mejores resultados de agrietamiento.

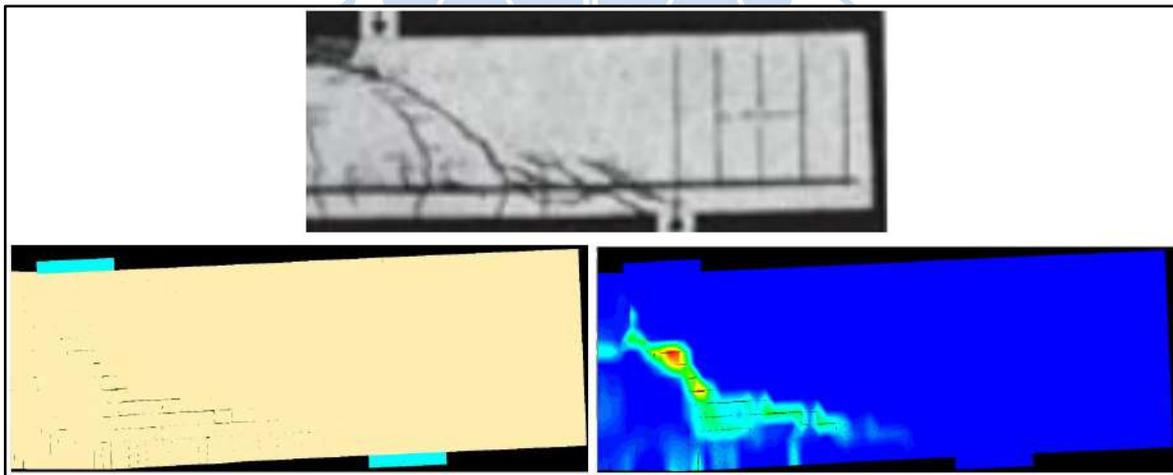


Figura 57. Patrón de agrietamiento sep. Strain acero 0.2

En la **Figura 58** se muestran los contornos correspondientes a los esfuerzos normales en el eje x cuando el *separation strain* del acero fue 0.2. Se pudo visualizar que el aplastamiento por compresión que sufrió la zona superior entre los puntos de aplicación de carga fue simulado por una mancha verde que fue un indicador de los mayores esfuerzos negativos (compresión).

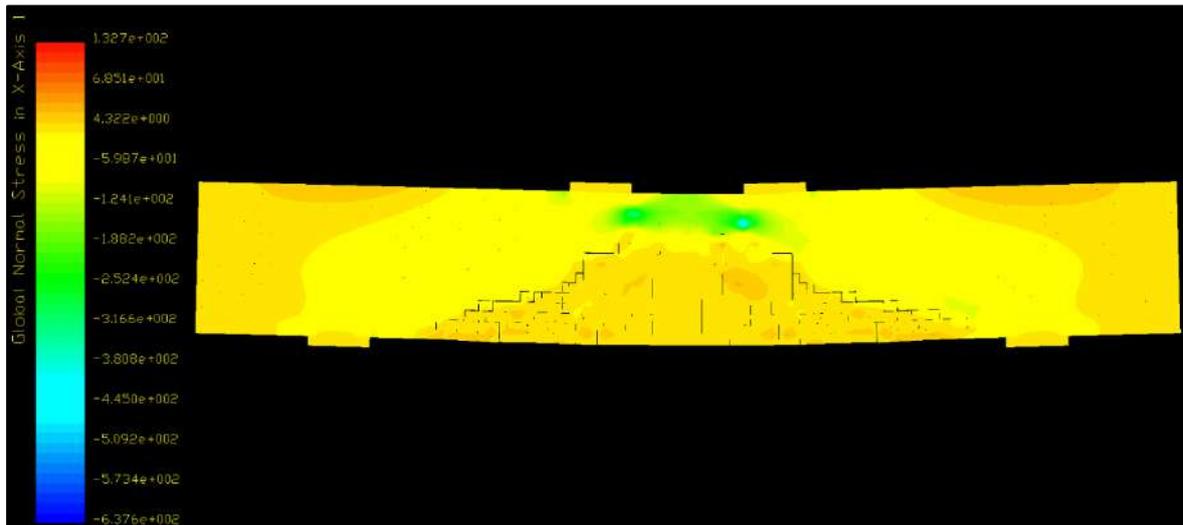


Figura 58. Contorno de esfuerzos para separation strain del acero 0.2

En la **Figura 59** se muestran las curvas fuerza vs deformación obtenidas con ELS para el test 2. Las curvas obtenidas mostraron mucha similitud entre sí y se evidenció una buena aproximación con la curva obtenida experimentalmente. Sin embargo, hubo una diferencia notable en algunas partes de las curvas.

De la misma forma que en el test 1, el margen de error se calculó respecto a la diferencia entre los desplazamientos simulados con ELS y los experimentales. El análisis se realizó en base a las 3 zonas definidas para el test anterior.

Se pudo notar que en la zona 1 el margen de error no fue apreciable entre los resultados experimentales y los de ELS. El mayor porcentaje de error en dicha zona fue 8.33 % correspondiente a una fuerza de 5.1 tn.

En la zona 2, el máximo margen de error respecto al desplazamiento fue 21.50% correspondiente a una fuerza de 15 tn.

En la zona 3, se observó un alejamiento notable entre resultados del experimento y los de ELS. El mayor margen de error en esta zona fue de 42.72% correspondiente a una fuerza de 22 tn.

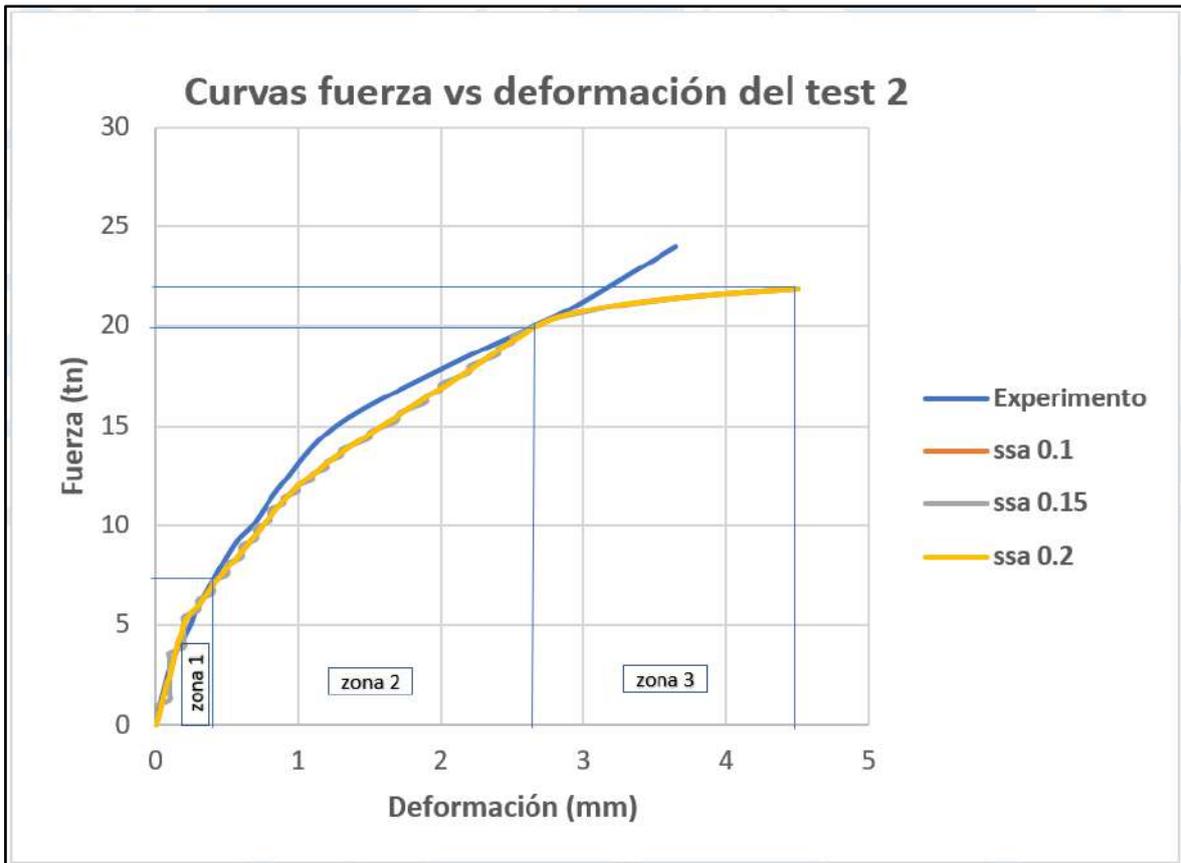


Figura 59. Curvas fuerza - deformación del test 2 (separation strain del acero – ssa)

En la Figura 60 se muestran los diagramas de barras correspondientes a los mayores porcentajes de error obtenidos en el test 2.

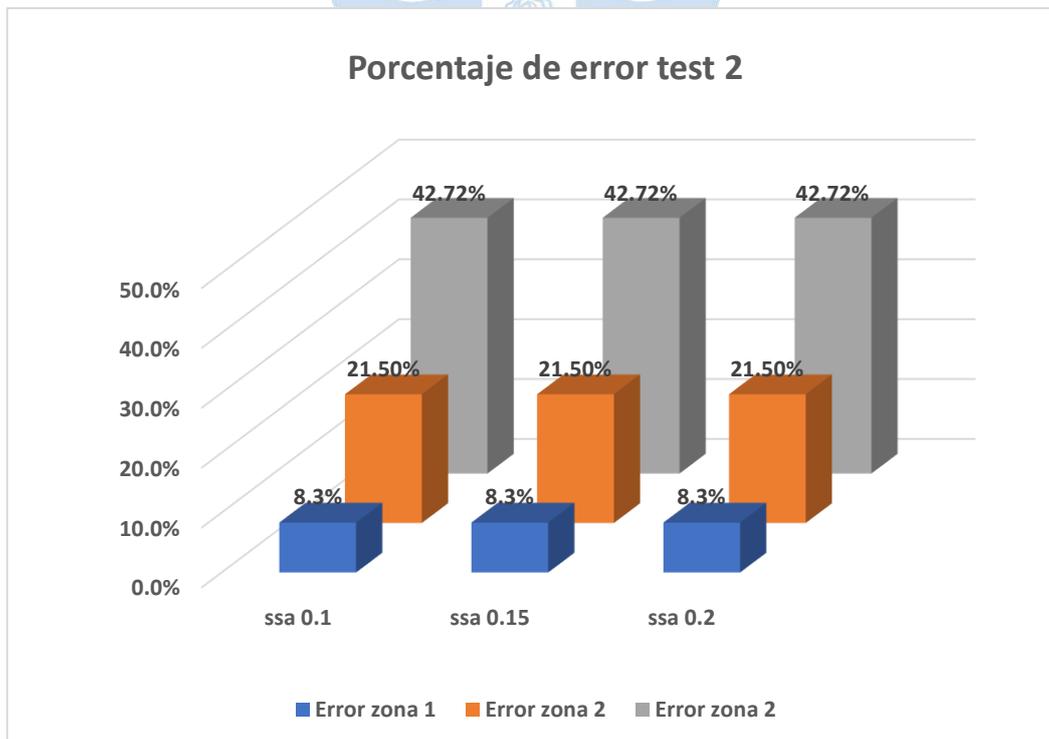


Figura 60. Porcentaje de error test 2

Los porcentajes de error respecto al desplazamiento fueron los mismos para cada valor evaluado. Además, los patrones de agrietamiento mejor definidos y con mejor calidad se obtuvieron para un *separation strain* de 0.2. Por lo tanto, se decidió asignar **0.2** como mejor valor para el *separation strain* del acero.

4.8.3 Test 3

El test 3 tuvo la finalidad de evaluar varios valores del *friction coefficient* del concreto (f.c.c) y elegir el más adecuado. En la **Figura 61** se muestra los patrones de agrietamiento obtenidos con ELS en este test.

Se pudo observar en los contornos de las deformaciones principales (columna derecha) que las grietas de corte se simularon con buena precisión. Se extendieron desde los apoyos hasta los puntos de aplicación de las cargas, además alcanzaron la zona flexión tal como fue esperado para la viga en estudio. Sin embargo, las grietas de flexión no se apreciaron con claridad. En la **Figura 61** se pudieron ver puntos que indicaron la presencia de estas últimas, aunque de manera menos evidente (ver círculos con líneas rojas).

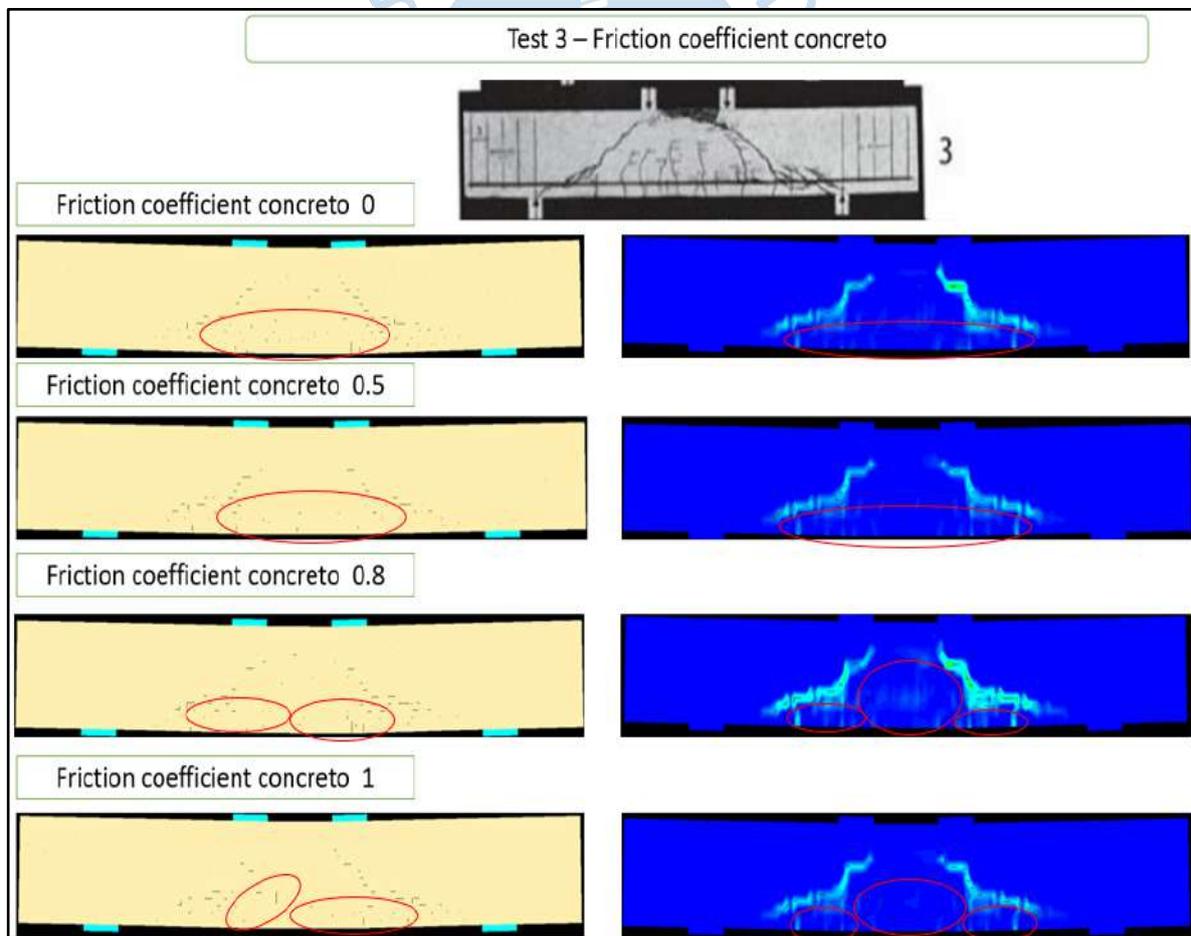


Figura 61. Patrones de agrietamiento del test 3 en ELS para viga 3(a/d=2)

Los contornos correspondientes a las deformaciones principales indicaron la ubicación de los mayores esfuerzos principales de tracción que causaron las grietas de corte. En la **Figura**

62 se muestra el rango de valores de las deformaciones principales que se obtuvieron con ELS en el test 3 para un *friction coefficient* del concreto igual a 0.8.

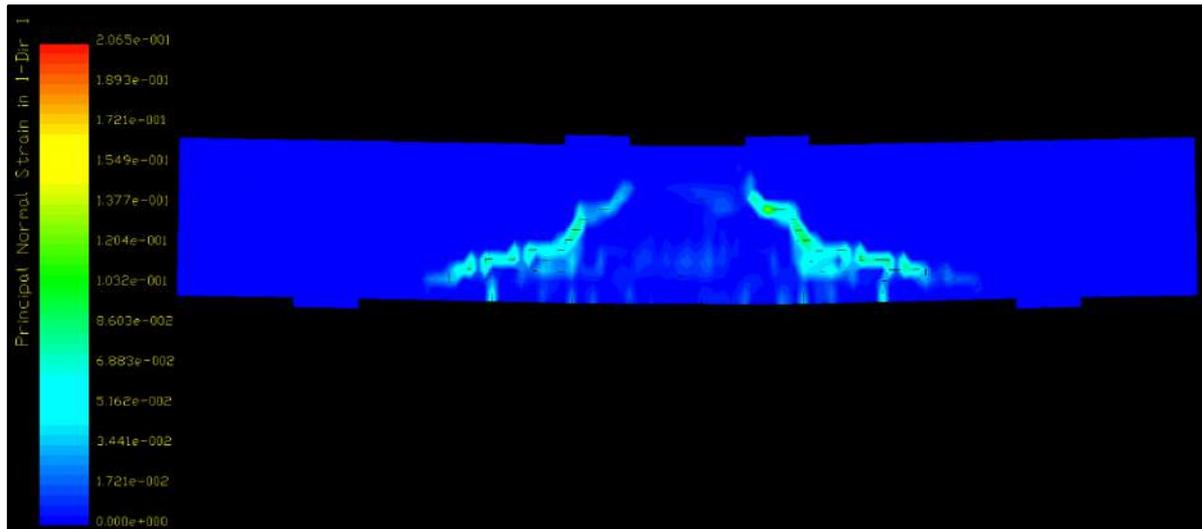


Figura 62. Deformaciones principales con un friction coefficient del concreto 0.8

Cuando el *friction coefficient* fue 0.8 se evidenciaron grietas de corte más definidas y marcadas, incluso las grietas de flexión se pudieron apreciar de manera muy ligera en la columna de los contornos de deformaciones principales. Además, se visualizó en el lado derecho de la viga una grieta más gruesa.

En la **Figura 63** se muestra con mejor resolución la grieta derecha de corte correspondiente a un *friction coefficient* del concreto igual a 0.8, ya que fue el valor que brindó mejores resultados.

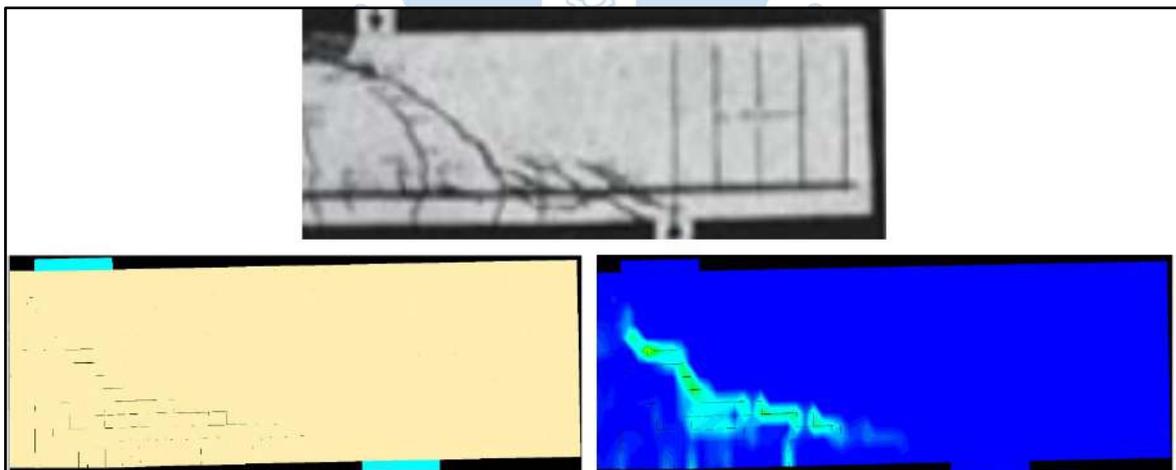


Figura 63. Patrón de agrietamiento para friction coefficient concreto 0.8

En la **Figura 64** se muestran los contornos correspondientes a los esfuerzos normales en el eje x para un *friction coefficient* del concreto igual a 0.8. Se pudo visualizar que el aplastamiento por compresión que sufrió la zona superior entre los puntos de aplicación de

carga fue simulado por una mancha verde que fue un indicador de los mayores esfuerzos negativos (compresión).

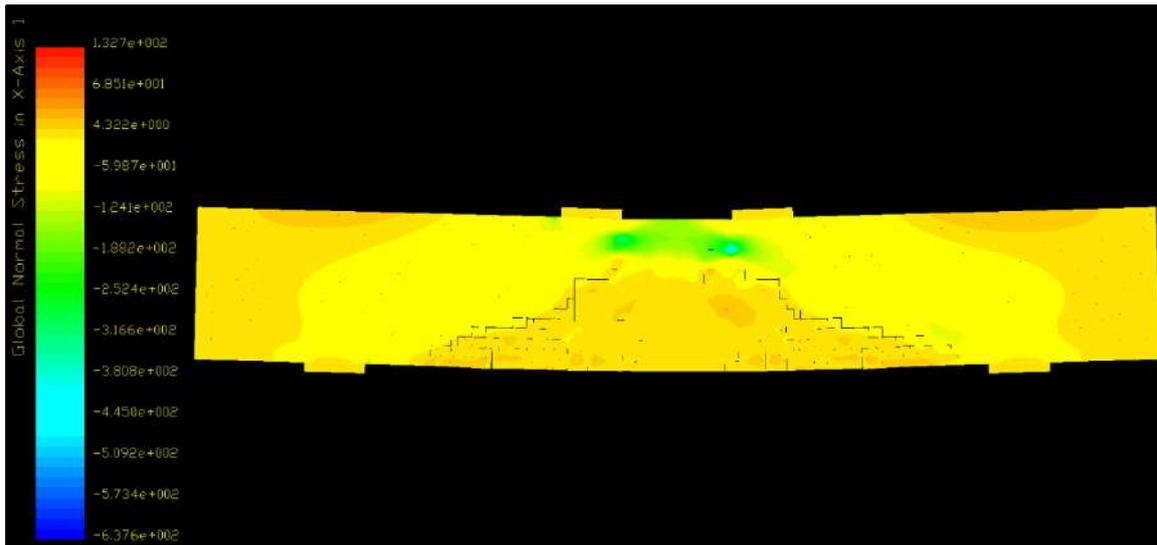


Figura 64. Contorno de esfuerzo para un friction coefficient del concreto 0.8

En la **Figura 65** se muestran las curvas fuerza - deformación obtenidas con ELS en el test 3. Las curvas se acercaron con buena precisión a la curva del experimento y no mostraron diferencias notables entre sí. Sin embargo, existieron zonas en las que los datos obtenidos con ELS se alejaron de los experimentales.

En la zona 1, las diferencias entre los resultados con ELS y los experimentales fueron muy bajas y difícil de apreciar visualmente. El mayor porcentaje fue 10.4% y correspondió a una fuerza de 5.2 tn.

En la zona 2 se pudo ver un alejamiento notable entre las curvas. El margen de error más alto esa zona fue 23.10% correspondiente a una fuerza aproximada de 15 tn.

En la zona 3, el alejamiento entre los resultados fue más evidente. El mayor margen de error respecto al desplazamiento en esta zona fue de 55.10 % correspondiente a una fuerza de 22 tn.

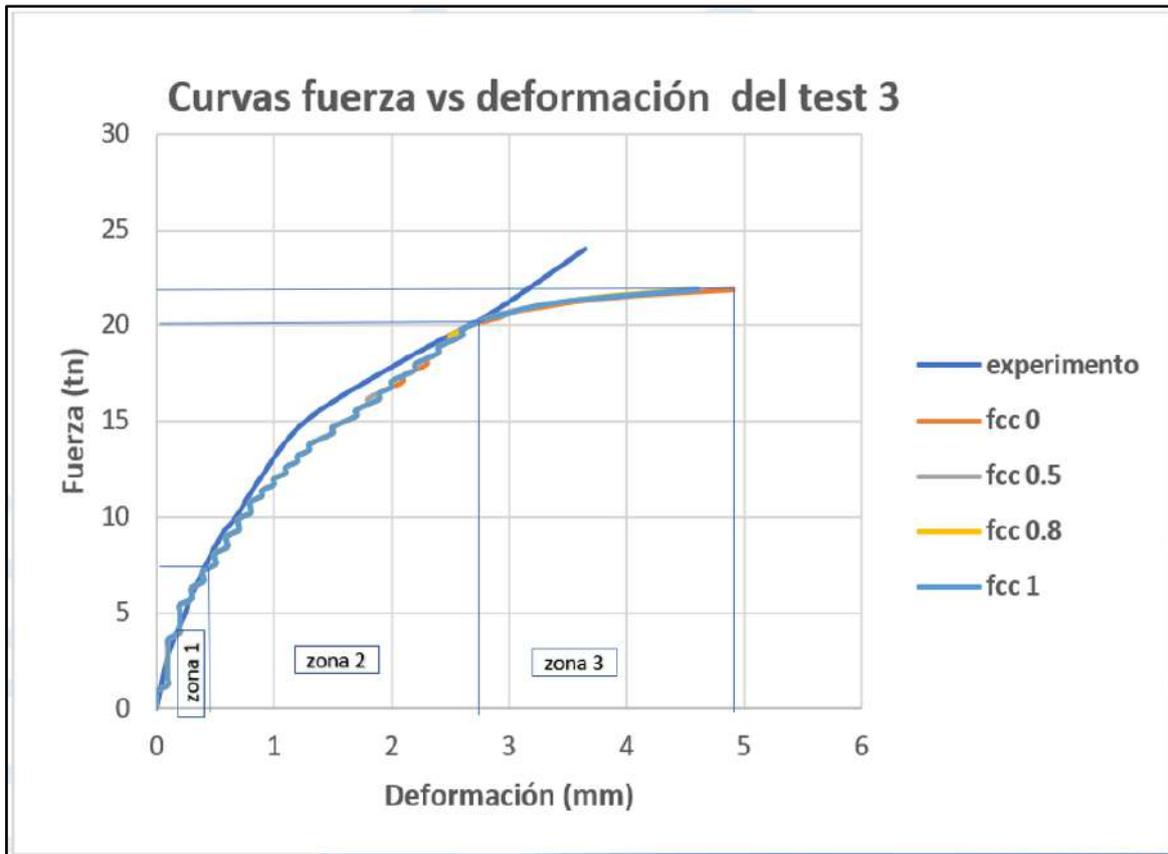


Figura 65. Curvas fuerza – deformación del test 3 (friction coefficient del concreto – fcc)

En la Figura 66 se muestran los gráficos de barras correspondientes a los mayores porcentajes de error respecto al desplazamiento obtenidos en el test 3.

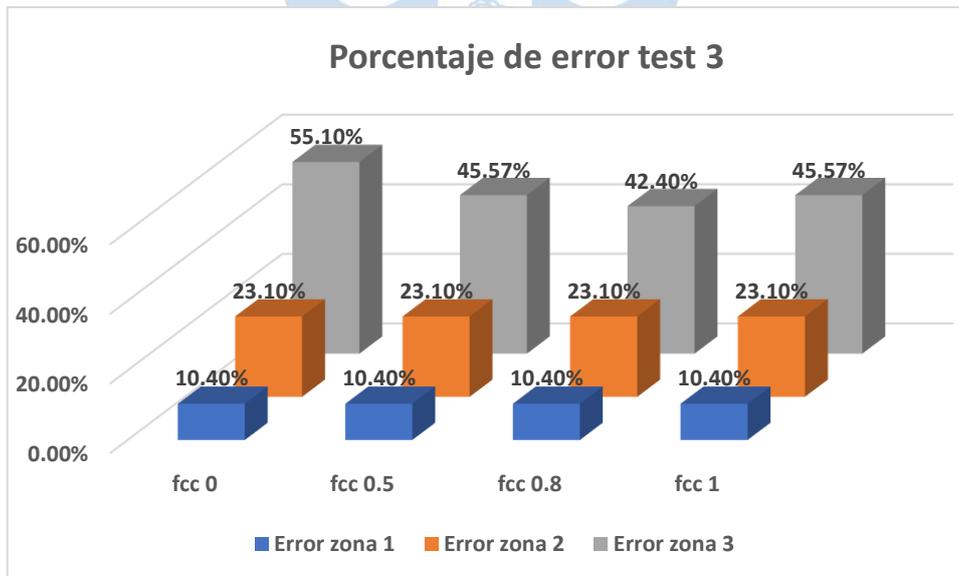


Figura 66. Porcentaje de error test 3

Las curvas fuerza deformación tuvieron los mismos márgenes de error para cada valor evaluado de *friction coefficient* del concreto. Sin embargo, se obtuvieron mejores patrones de

agrietamiento con el valor de **0.8**. Además, es el valor recomendado por el manual usuario para el concreto. Por lo tanto, este valor fue asignado como mejor valor.

4.8.4 Test 4

El test 4 se realizó con la finalidad de analizar diferentes valores del *friction coefficient* del acero (f.c.a). En la **Figura 67** se muestran los resultados obtenidos en ELS en contraste con los experimentales.

Se pudo ver que las grietas de corte alcanzaron la zona de aplastamiento por compresión y se desarrollaron a partir de una grieta de flexión. Además, se extendieron desde los apoyos hasta los puntos de aplicación de la carga de manera muy similar que en la viga real.

Las grietas de flexión no se pudieron capturar con claridad suficiente, pero en la columna de la derecha en la **Figura 67** se observó algunos puntos que fueron indicadores de la presencia de dichas grietas (ver círculos con líneas rojas).

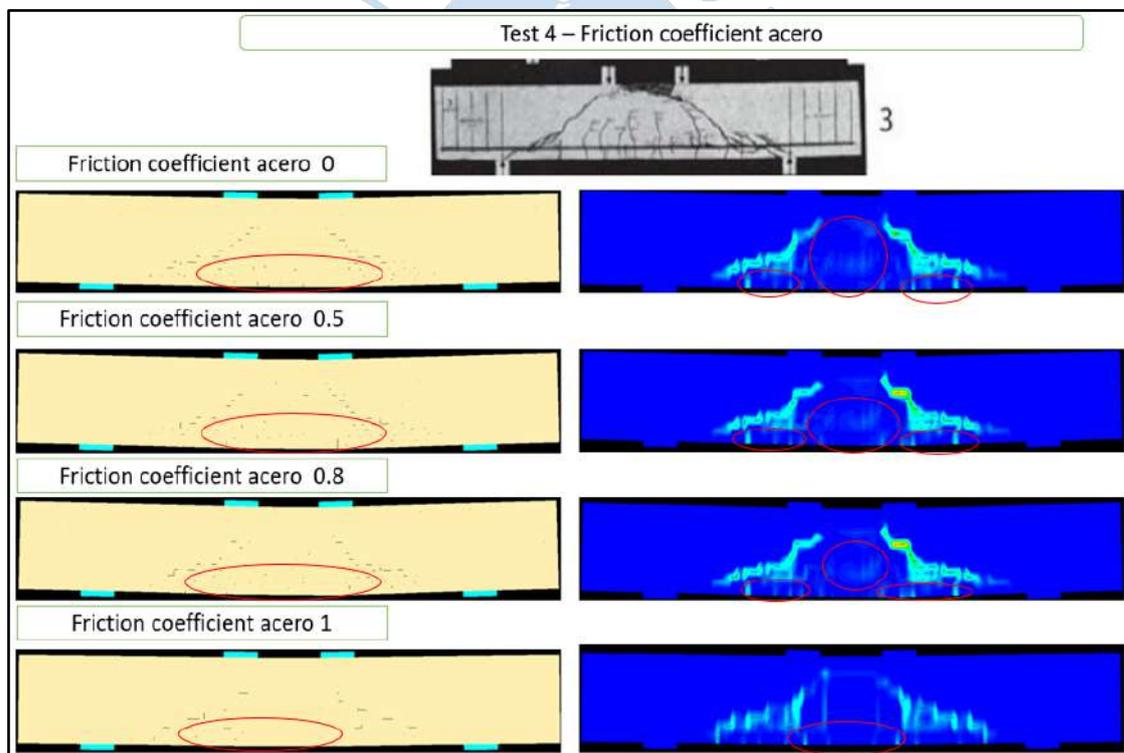


Figura 67. Patrones de agrietamiento del test 4 en ELS para viga 3 ($a/d = 2$)

Los contornos correspondientes a las deformaciones principales indicaron la ubicación de los mayores esfuerzos principales de tracción que causaron las grietas de corte. En la **Figura 68** se muestra el rango de valores de las deformaciones principales para un *friction coefficient* del acero igual a 0.8.

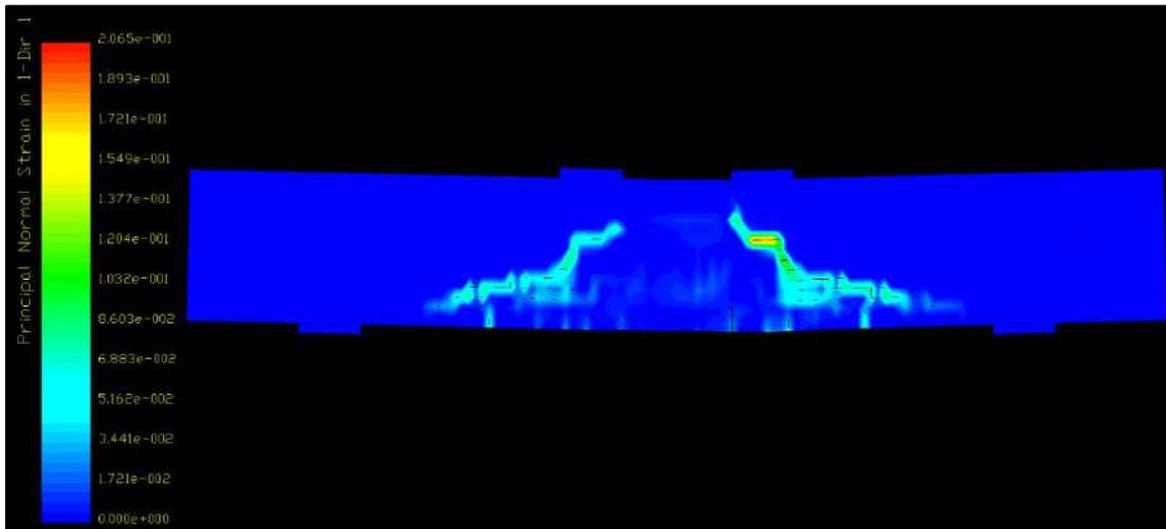


Figura 68. Rango de deformaciones principales para un friction coefficient del acero 0.8

Se evidenció que el patrón de agrietamiento fue más marcado cuando el *friction coefficient* del acero fue 0.5 y 0.8. Se observó que la grieta de corte de la derecha fue más ancha y marcada que la de la izquierda. Además, se visualizó una zona color naranja en la parte superior de la grieta derecha de corte que indica que la falla fue más pronunciada en dicho lado.

En la **Figura 69** se muestra con mejor resolución la grieta derecha de corte correspondiente a un *friction coefficient* del acero igual a 0.8, ya que fue el valor que dio mejores resultados respecto al patrón de agrietamiento.

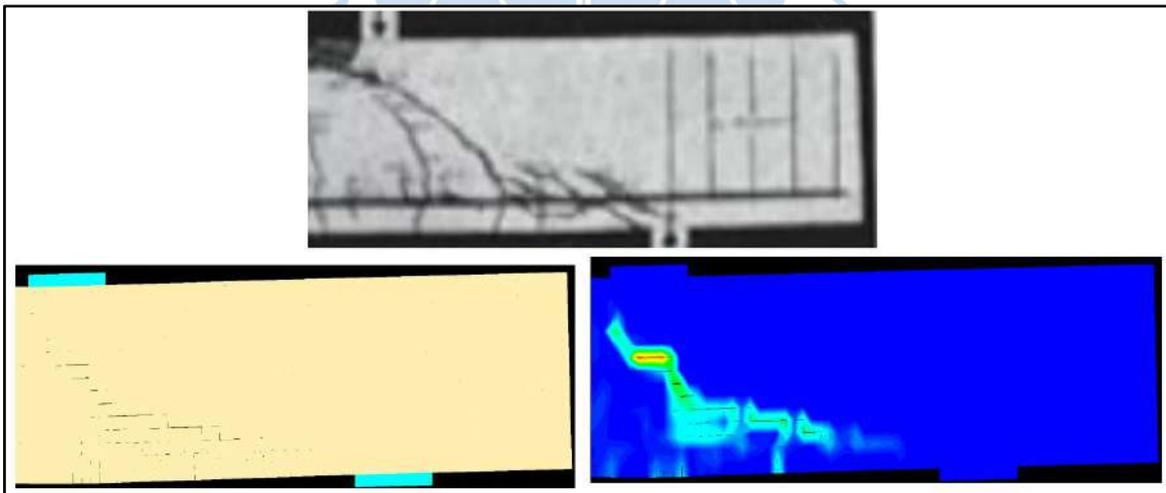


Figura 69. Patrón de agrietamiento para friction coefficient acero 0.8

En la **Figura 70** se muestran los contornos correspondientes a los esfuerzos normales en el eje x para un *friction coefficient* del acero igual a 0.8. Se pudo visualizar que el aplastamiento por compresión que sufrió la zona superior entre los puntos de aplicación de carga fue simulado por una mancha verde que fue un indicador de los mayores esfuerzos negativos (compresión).

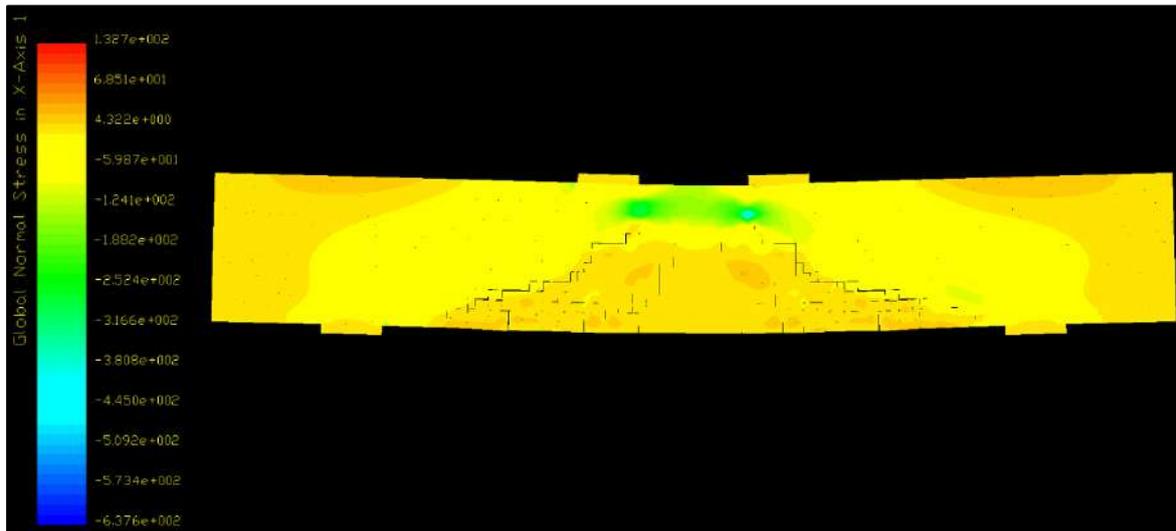


Figura 70. Contorno de esfuerzo para un friction coefficient del acero 0.8

En la **Figura 71** se muestran las curvas fuerza - deformación obtenidas con ELS en el test 4. Las curvas se acercaron con buena precisión a la curva del experimento. Sin embargo, existieron zonas en las que los datos obtenidos con ELS se alejaron de los experimentales.

En la zona 1 se obtuvo una diferencia difícil de apreciar entre los resultados experimentales y los obtenidos con ELS. El mayor margen de error en esta zona fue 4.16% y correspondió a una fuerza de 5.3 tn.

En la zona 2, las curvas se alejaron notablemente. El máximo margen de error en esta zona fue de 25.4% correspondiente a una fuerza de 15 tn.

En la zona 3, la diferencia entre resultados fue evidente. La comparación se realizó para una fuerza de 22 tn, ya que las curvas correspondientes a un *friction coefficient* del acero de 0, 0.5 y 2 al alcanzar dicho valor se volvieron paralelas al eje de las deformaciones (eje x), mientras que la curva correspondiente a un *friction coefficient* del acero igual 1, alcanzó dicha condición con una fuerza de 23 tn. Por tanto, con una fuerza de 23 tn no fue posible realizar una comparación entre todas las curvas, ya que se hubiese encontrado un margen de error mayor a 100% en 3 de las 4 curvas.

El análisis solo fue posible para una fuerza de 22 tn, ya que en este punto se pudo analizar las 4 curvas. El mayor margen de error en la zona 3 fue de 56.34%.

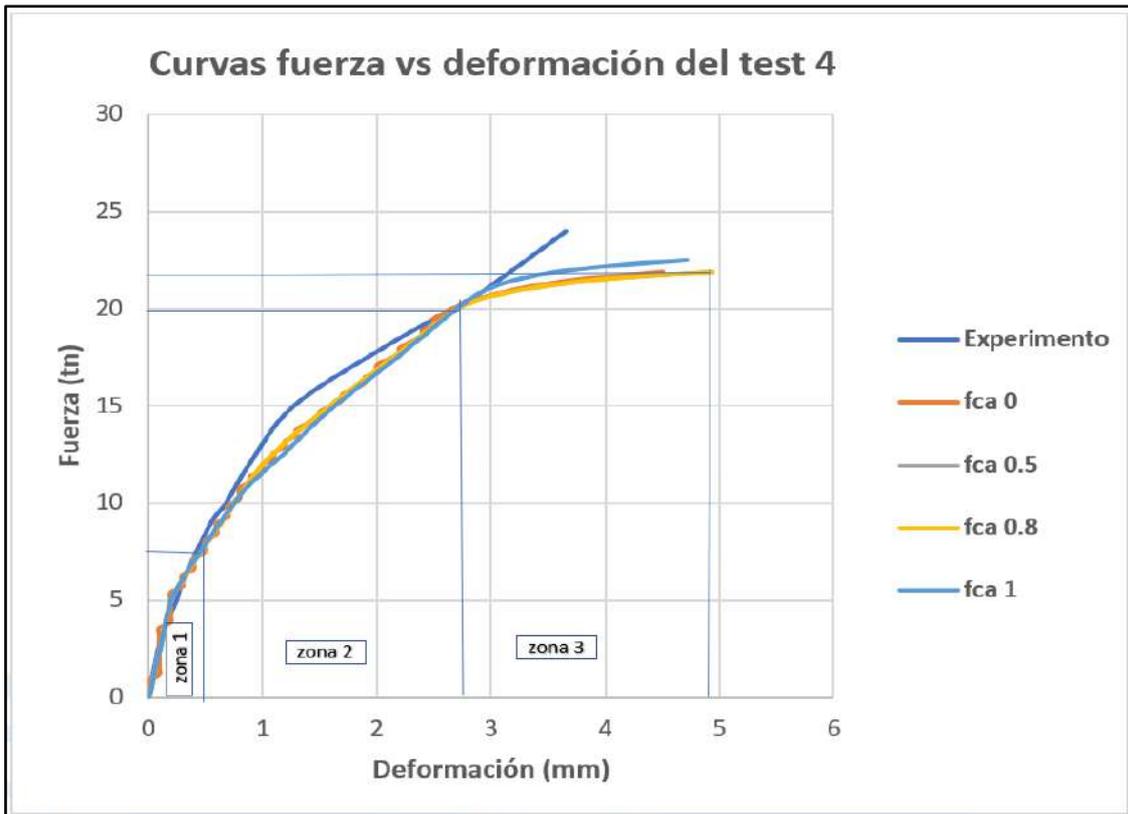


Figura 71. Curvas fuerza – deformación del test 4 (friction coefficient del acero – fca)

En la Figura 72 se presentan los diagramas de barras correspondientes a los mayores porcentajes de error obtenidos con ELS en el test 4.

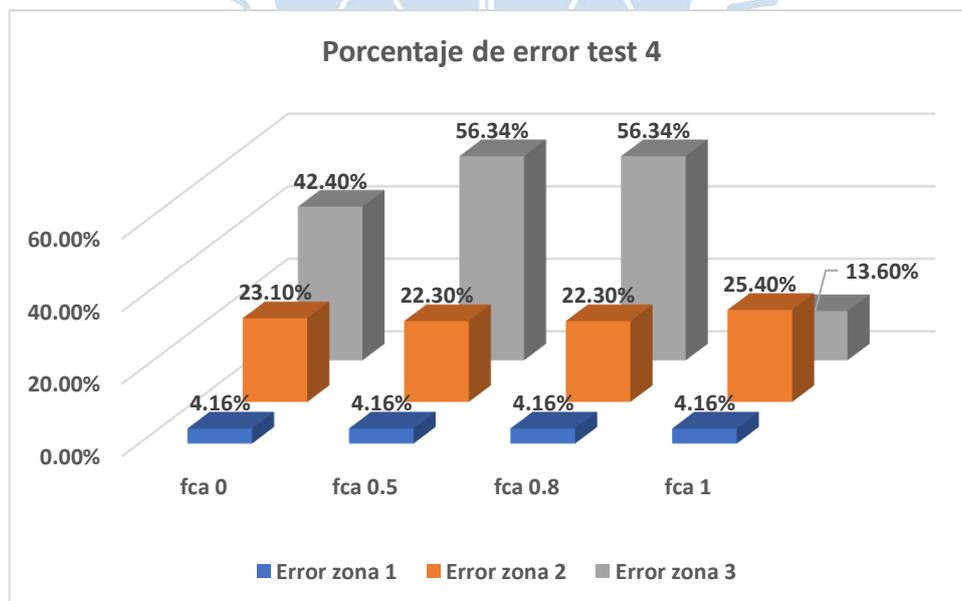


Figura 72. Porcentaje de error test 4

Los mejores resultados respecto al patrón de agrietamiento se obtuvieron con un friction coefficient del acero igual a 0.8.

Respecto a los desplazamientos, el menor margen de error en la zona 3 se dio cuando el *friction coefficient* del acero fue 1. Sin embargo, para este valor se obtuvo el margen de error más grande en la zona 2, que fue la más amplia y abarcó la mayoría de la curva fuerza – deformación. Además, los patrones de agrietamiento obtenidos con este último valor fueron los de menor calidad. Finalmente se escogió **0.8** como mejor valor para el *friction coefficient* del acero. Entre otras razones, vale la pena resaltar que el manual de usuario recomienda este valor.

4.8.5 Test 5

El test 5 tuvo como finalidad evaluar diferentes valores del *contact spring unloading stiffness factor* del concreto (c.s.u.s.f.c). En la columna izquierda de la **Figura 73** se muestran los patrones de agrietamiento obtenidos en ELS y en la columna derecha se muestran los contornos de las deformaciones principales.

Se pudo visualizar que ELS simuló con buena precisión la ubicación y extensión de las grietas de corte. Se extendieron desde los apoyos hasta los puntos de aplicación de la carga y se formaron a partir de una grieta de flexión. Las grietas de flexión se simularon con menos calidad, pero hubieron puntos que indicaron su presencia (ver círculos con líneas rojas en la **Figura 73**).

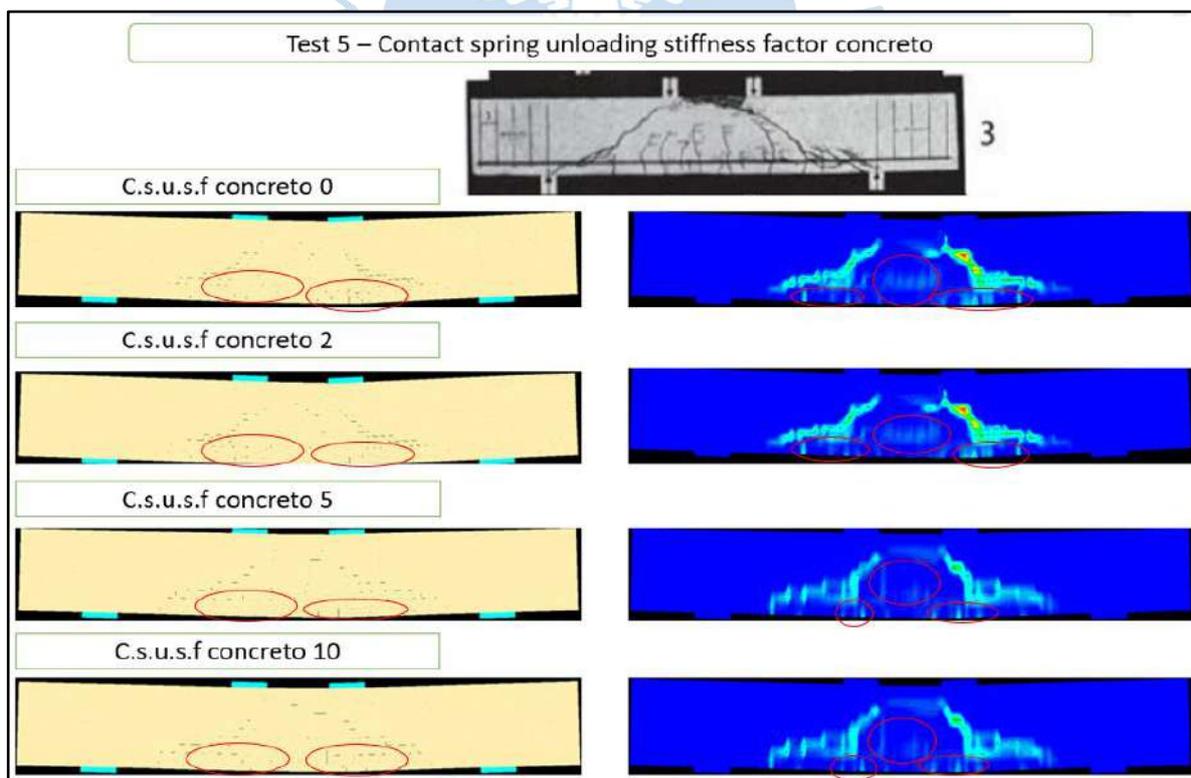


Figura 73. Patrones de agrietamiento del test 5 en ELS para viga 3 (a/d =2)

Los contornos correspondientes a las deformaciones principales indicaron la ubicación de los mayores esfuerzos principales de tracción que causaron las grietas de corte. En la **Figura**

74 se muestra el rango de valores de las deformaciones principales que se obtuvieron con ELS en el test 5 con un *contact spring unloading stiffness factor* del concreto igual a 2.

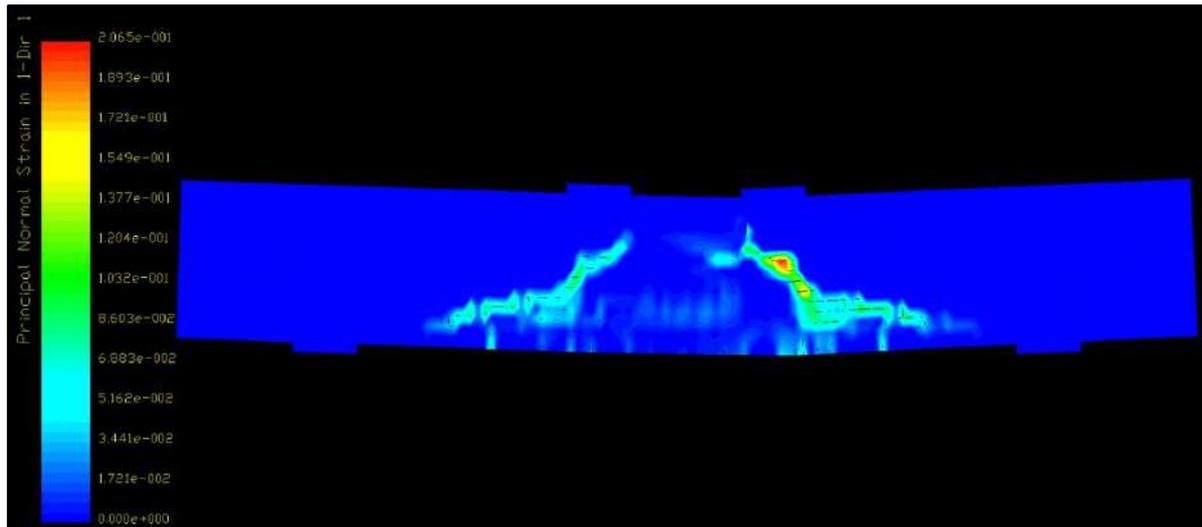


Figura 74. Rango de deformaciones principales en el test 5

Se pudo observar que el patrón de agrietamiento fue más marcado cuando el *contact spring unloading stiffness factor* del concreto fue 0 y 2. La grieta de corte de la derecha fue más ancha respecto a la de la izquierda. Además, se vio una zona color naranja en la parte superior de la grieta derecha de corte que indicó que la falla fue más pronunciada en dicho lado. Este resultado se pudo evidenciar en los resultados experimentales donde se comprobó que, en lado derecho de la viga, la falla fue más notoria.

En la Figura 75 se muestra con mejor calidad la grieta derecha de corte correspondiente a un *contact spring unloading stiffness factor* del concreto igual a 2, ya que es el valor que dio mejores resultados.

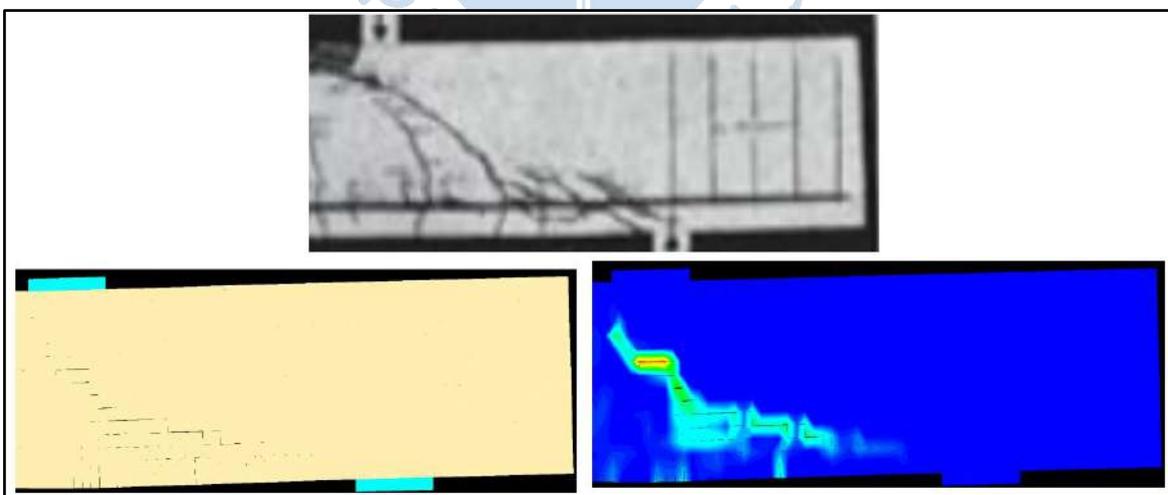


Figura 75. Patrón de agrietamiento para c.s.u.s.f concreto 2

En la Figura 76 se muestran los contornos correspondientes a los esfuerzos normales en el eje x para un *contact spring unloading stiffness factor* (c.s.u.s.f) del concreto igual a 2. Se

pudo visualizar que el aplastamiento por compresión que sufrió la zona superior entre los puntos de aplicación de carga fue simulado por una mancha verde que fue un indicador de los mayores esfuerzos negativos (compresión).

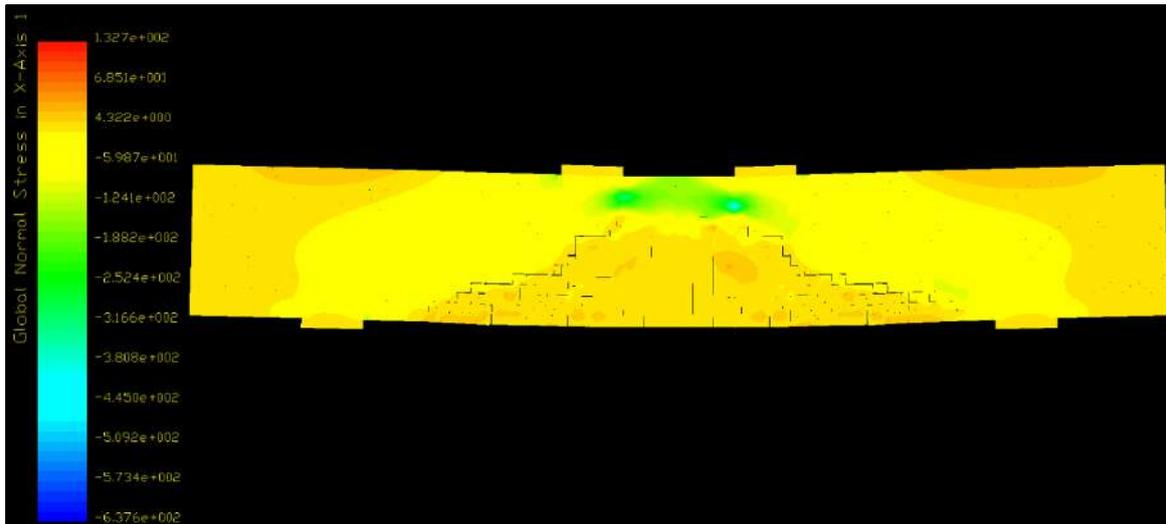


Figura 76. Contornos de esfuerzos para un c.s.u.s.f del concreto 2

En la **Figura 77** se muestran las curvas fuerza - deformación obtenidas con ELS en el test 5. Las curvas se acercaron con buena precisión a la curva del experimento. Sin embargo, existieron zonas en las que los datos obtenidos con ELS se alejaron de los experimentales.

El análisis de los desplazamientos se realizó en 3 zonas que fueron establecidas previamente. En la zona 1, las diferencias entre los resultados experimentales y los obtenidos con ELS fueron bajas, de tal forma que el mayor margen de error entre los desplazamientos fue 8.33 % y correspondió a una fuerza de 5.2 tn.

En la zona 2, existió una disparidad notoria entre los resultados. El mayor margen de error en esta zona fue de 26.20 % y correspondió a una fuerza aproximada de 15 tn.

En la zona 3, el análisis se realizó para una fuerza de 22 tn, ya que las curvas correspondientes a un *contact spring unloading stiffness factor* del concreto igual a 0, 2 y 5 fueron paralelas al eje x a partir de dicho valor. Por lo tanto, analizar para un valor superior hubiese significado encontrar un margen de error mayor al 100 %. El mayor de error en esta zona fue de 42.4 %.

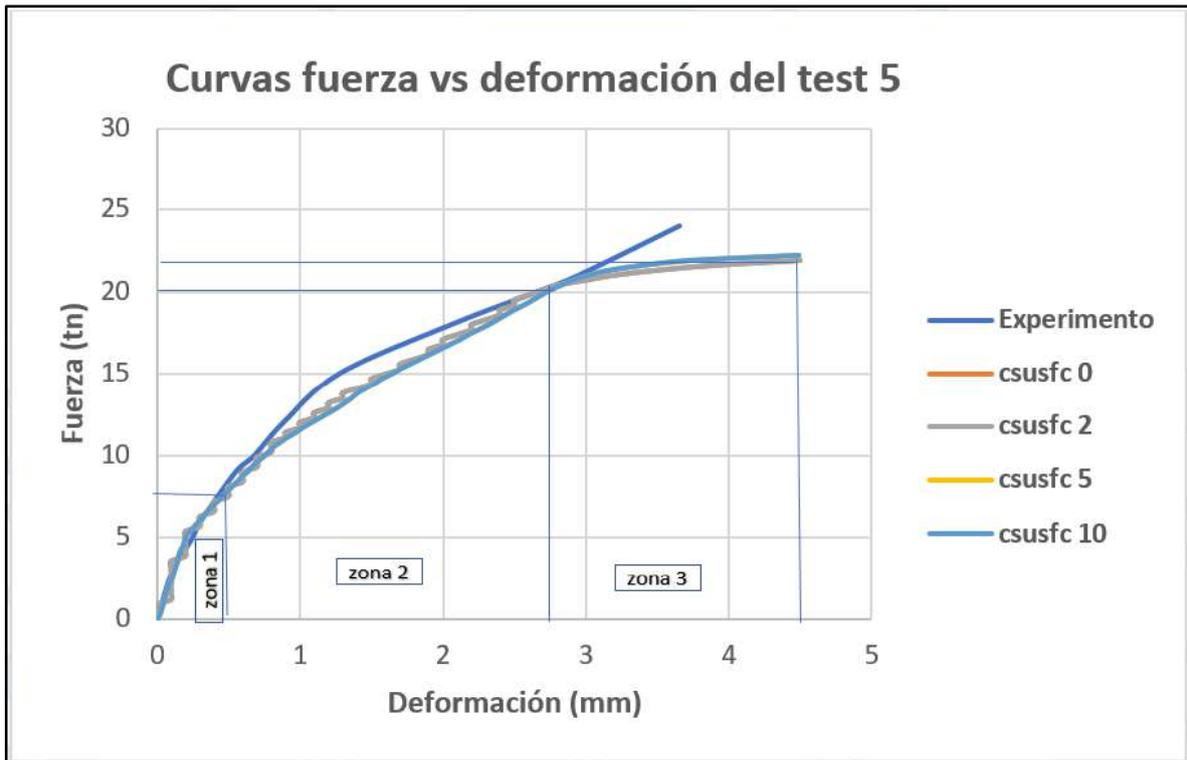


Figura 77. Curvas fuerza - deformación del test 5 (contact spring unloading stiffness factor del concreto – csusfc)

En la Figura 78 se muestran los gráficos de barras de los mayores porcentajes de error en cada zona registrados en el test 5.

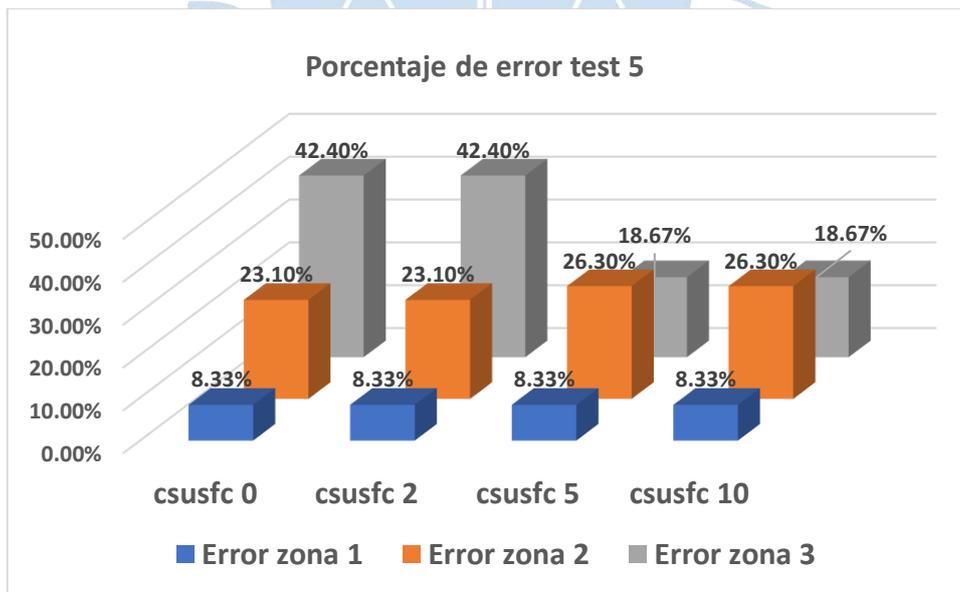


Figura 78. Porcentaje de error test 5

Se obtuvo mejores patrones de agrietamiento con un *contact spring unloading stiffness factor* del concreto igual a 2. Además, con este valor se logró un mejor acercamiento a lo largo de la zona 2, que fue la zona que abarcó la mayoría de la curva fuerza – deformación.

Adicionalmente, 2 es el valor recomendado por el manual de usuario para este parámetro en el acero.

Sin embargo, en la zona 3, el menor margen de error (18.67%) respecto a los desplazamientos se consiguió con un *contact spring unloading stiffness factor* del concreto igual a 5 y 10. A pesar de esto, los patrones de agrietamiento correspondientes a estos últimos valores fueron los de menor calidad. Adicionalmente, con estos últimos valores el margen de error en la zona 2 fue el más alto. Finalmente, el valor más adecuado para el *contact spring unloading stiffness factor* del concreto fue 2.

4.8.6 Test 6

El test 6 tuvo como objetivo evaluar diferentes valores *contact spring unloading stiffness factor* para el acero. En la **Figura 79** se muestran los resultados obtenidos en ELS y los resultados experimentales. En la columna derecha se presentan los patrones de agrietamiento y en la columna izquierda se muestran los contornos de las deformaciones principales.

Las grietas de corte fueron simuladas con buena precisión en cuanto a ubicación, extensión y forma. Se extendieron desde los apoyos hasta los puntos de carga, alcanzando la zona de aplastamiento por compresión como sucedió en el experimento. Sin embargo, las grietas de flexión no se pudieron simular como se esperaba, pero en la columna izquierda se pudo observar puntos que indicaron la presencia de estas grietas (ver círculos con líneas rojas).

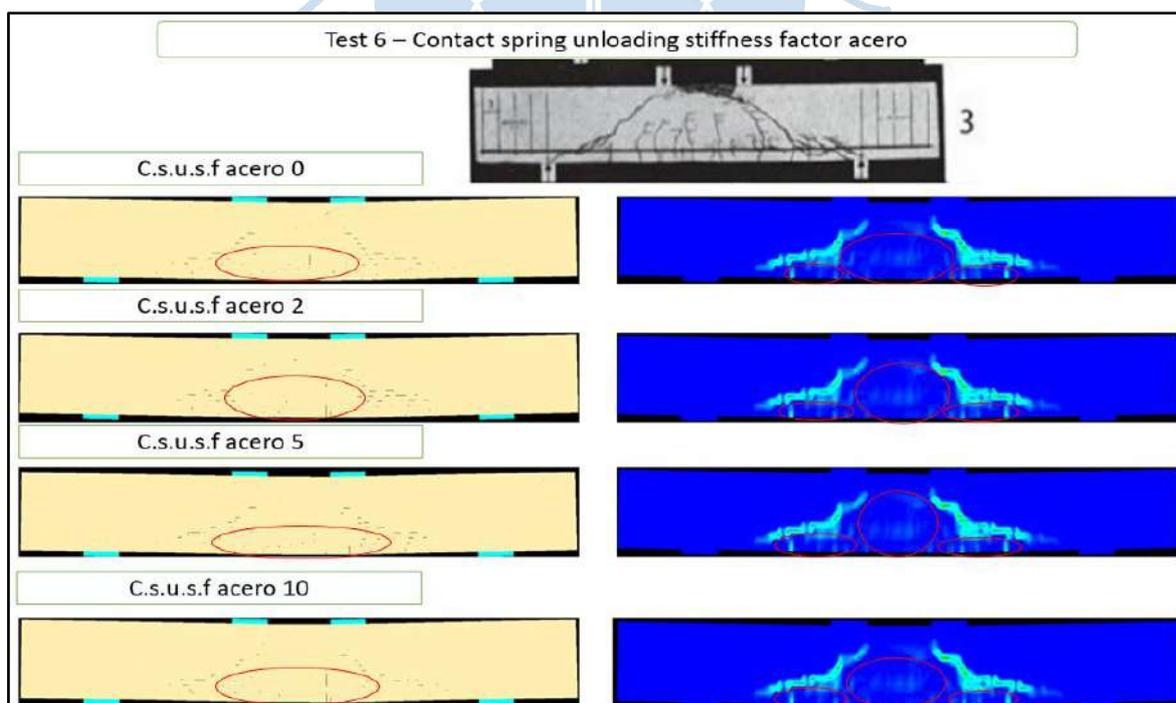


Figura 79. Patrones de agrietamiento del test 6 en ELS para viga 3 (a/d = 2)

Los contornos correspondientes a las deformaciones principales indicaron la ubicación de los mayores esfuerzos principales de tracción que causaron las grietas de corte. En la **Figura**

80 se muestra el rango de valores de las deformaciones principales que se obtuvieron con ELS en el test 6 con un *contact spring unloading stiffness factor* del acero igual a 2.

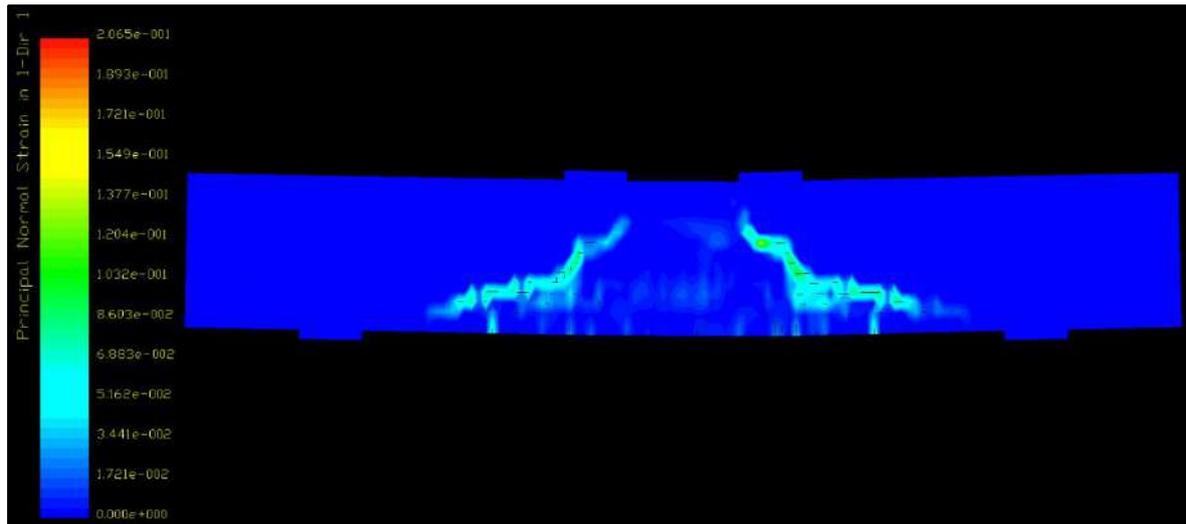


Figura 80. Rango de deformaciones principales en el test 6

Los patrones de agrietamiento obtenidos para cada valor del parámetro estudiado en este test, tuvieron gran similitud entre sí. No hubo diferencias apreciables para establecer que un valor sea mejor que otro.

En la **Figura 81** se muestra con mejor calidad la grieta derecha de corte correspondiente a un *contact spring unloading stiffness factor* del acero igual a 2, ya que se obtuvo buenos resultados con dicho valor, además de ser el valor por defecto en ELS.

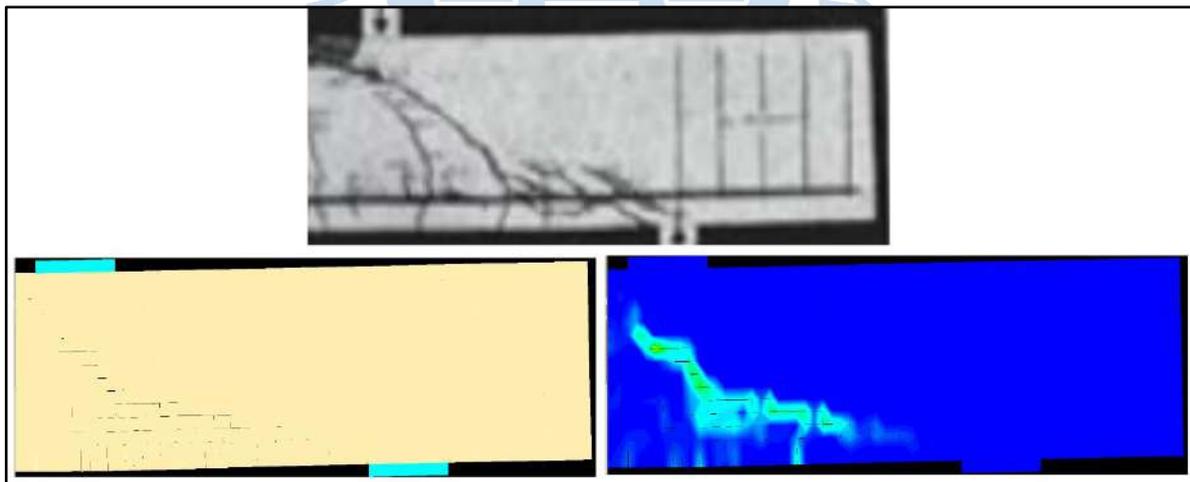


Figura 81. Patrón de agrietamiento para c.s.u.s.f acero 2

En la **Figura 82** se muestran los contornos correspondientes a los esfuerzos normales en el eje x para un *contact spring unloading stiffness factor* (c.s.u.s.f) del acero igual a 2. Se pudo visualizar que el aplastamiento por compresión que sufrió la zona superior entre los puntos de aplicación de carga fue simulado por una mancha verde que fue un indicador de los mayores esfuerzos negativos (compresión).

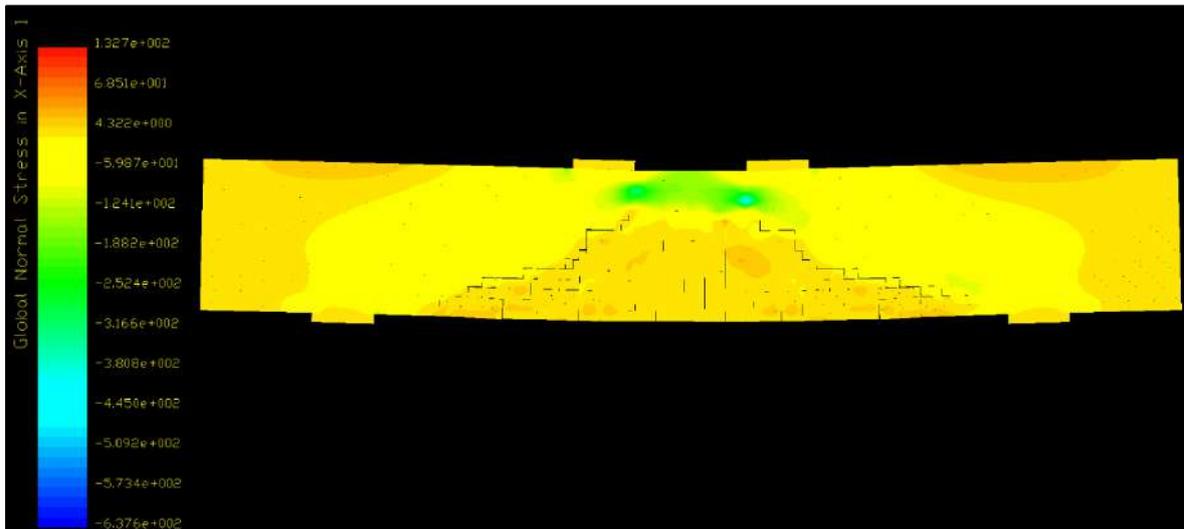


Figura 82. Contornos de esfuerzos para un c.s.u.s.f del acero 2

En la **Figura 83** se muestran las curvas fuerzas deformación obtenidas con ELS en el test 6. Las curvas se acercaron con buena precisión a la curva del experimento, además no mostraron diferencias notables entre sí. Sin embargo, existieron zonas en las que los datos obtenidos con ELS se alejaron de los experimentales.

Al igual que en los tests anteriores, el análisis de los desplazamientos se realizó en 3 zonas. En la primera zona, no existieron muchas diferencias entre los resultados obtenidos con ELS y los experimentales. El mayor margen de error esta zona fue 8.33 % y correspondió a una fuerza de 5.2 tn.

En la zona 2 hubo diferencias apreciables a simple vista. El mayor error respecto al desplazamiento en esa zona fue de 23.10 % correspondiente a una fuerza aproximada de 15tn.

En la zona 3 se apreció una gran diferencia entre los desplazamientos reales y los simulados con ELS. El mayor margen de error en esta zona fue de 42.4 %, correspondiente a una fuerza aproximada de 22 tn.

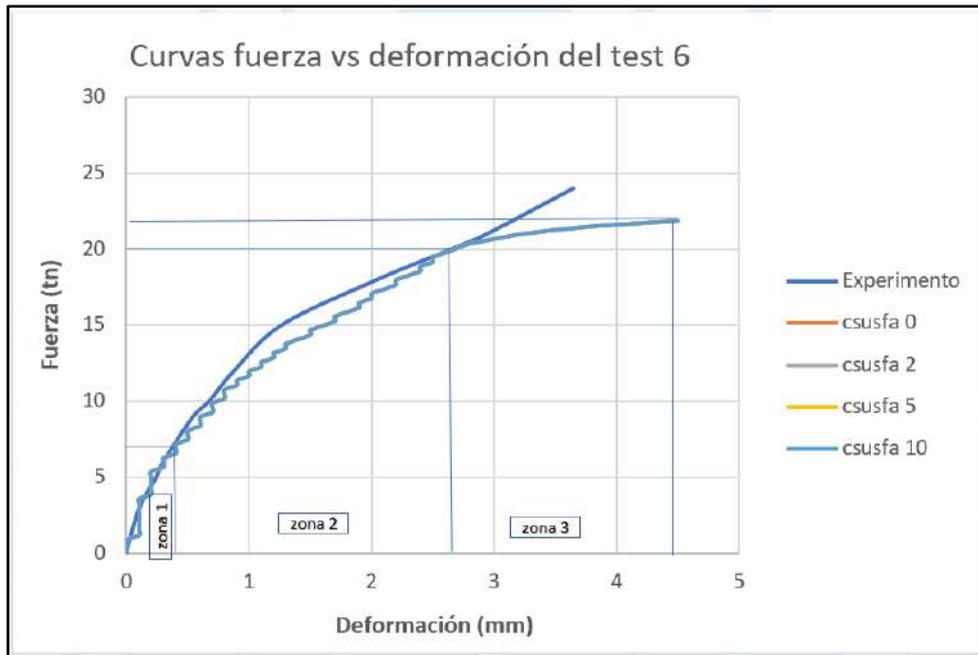


Figura 83. Curvas fuerza - deformación del test 6 (contact spring unloading stiffness factor del acero – csusfa)

En la **Figura 84** se presentan los diagramas de barras correspondientes a mayores los porcentajes de error obtenidos en el test 6.

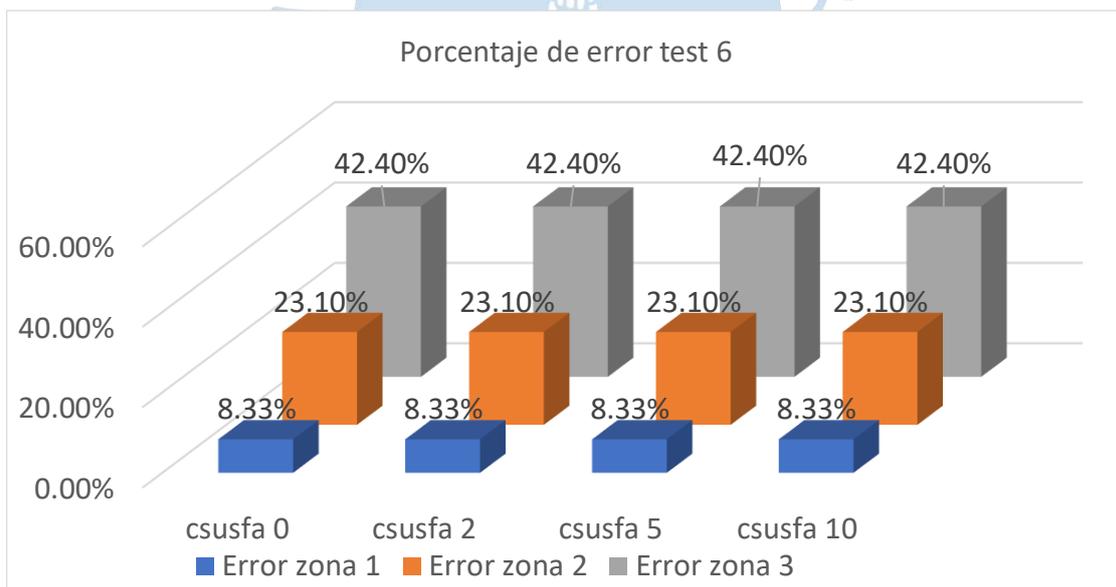


Figura 84. Porcentaje de error test 6

Los patrones de agrietamiento obtenidos con ELS no mostraron diferencias notables entre sí. Lo mismo sucedió con las curvas fuerza vs deformación. Por tanto, se decidió usar 2 como mejor valor para el contact spring unloading stiffness factor del acero, ya que es valor por defecto que el manual de usuario.

4.8.7 Test 7

El test 7 se realizó con la finalidad de probar diferentes valores del parámetro *ultimate/yield stress ratio*. En la **Figura 85** se muestran los resultados obtenidos con el software ELS y los resultados experimentales. En la columna izquierda se muestran los patrones de agrietamiento que resultaron para cada valor del parámetro antes mencionado. Se pudo observar que las grietas de corte fueron representadas con buena precisión respecto a la ubicación y extensión que se esperaba.

En la columna derecha se muestran los contornos correspondientes a las deformaciones principales. Se pudo visualizar con una mejor calidad las grietas de corte que se extendieron desde los apoyos hasta los puntos de aplicación de las cargas. Se formaron a partir de una grieta de flexión previamente formada y alcanzaron la zona de flexión, tal como ocurrió en los resultados experimentales. Las grietas de flexión no se apreciaron buena calidad pero hubieron puntos que indicaron su presencia (ver círculos con líneas rojas en la **Figura 85**).

Los patrones de agrietamiento obtenidos no mostraron diferencias notables para los diferentes valores del parámetro estudiado en el test 7.

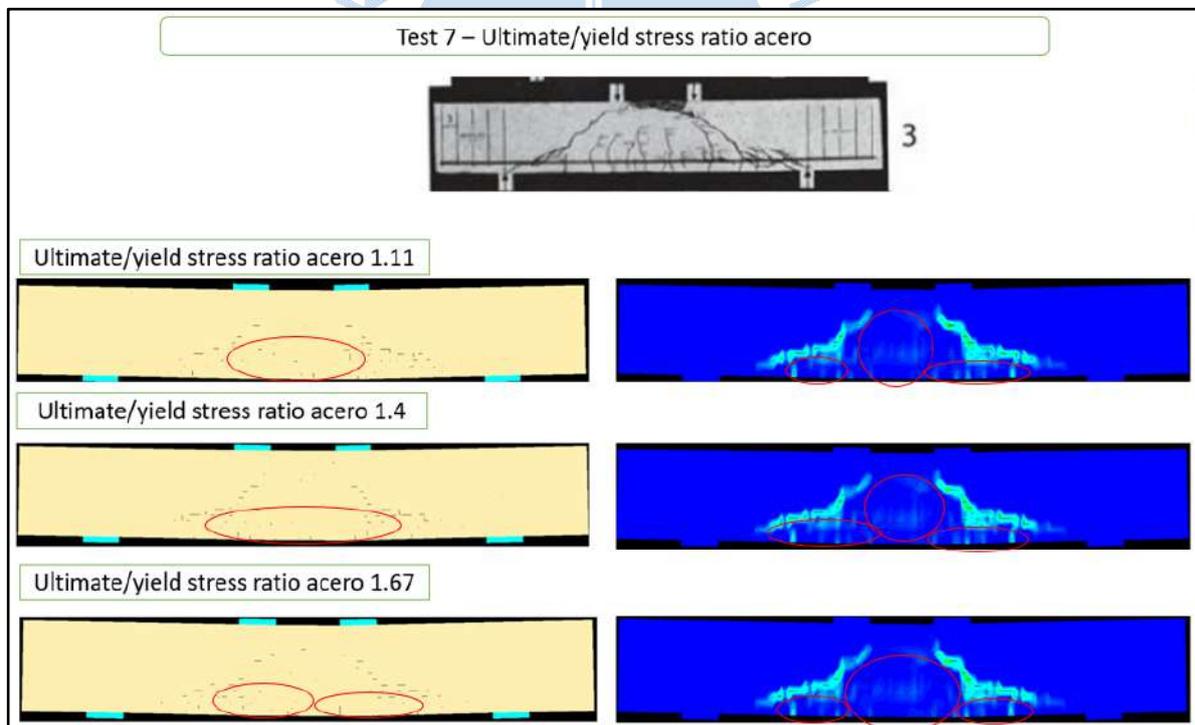


Figura 85. Patrones de agrietamiento del test 7 en ELS para viga 3 (a/d = 2)

Los contornos correspondientes a las deformaciones principales indicaron la ubicación de los mayores esfuerzos principales de tracción que causaron las grietas de corte. En la **Figura 86** se muestra el rango de valores de las deformaciones principales que se obtuvieron con ELS en el test 7 con un *ultimate/yield stress ratio* igual a 1.4.

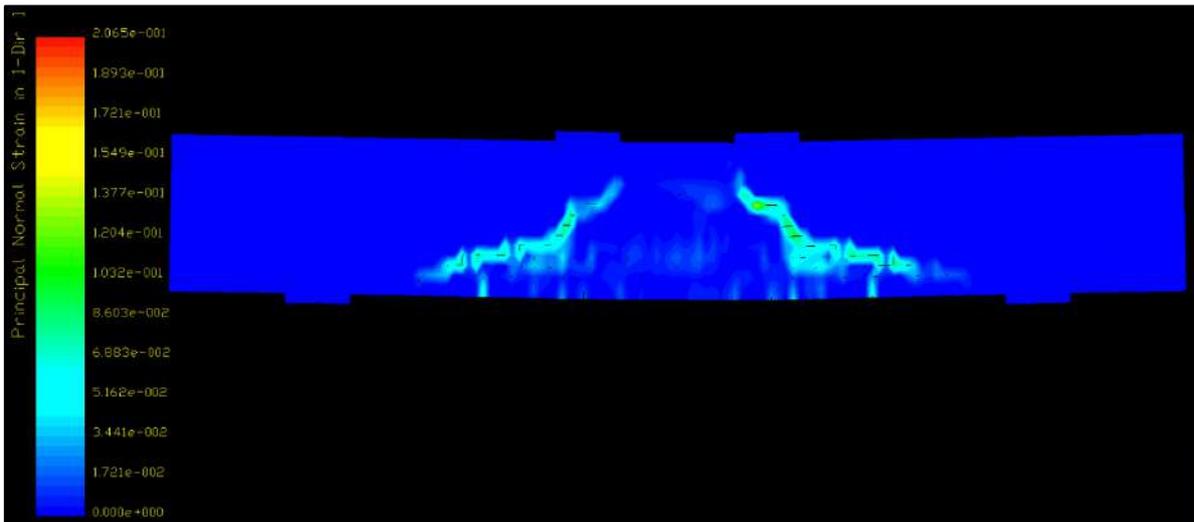


Figura 86. Rango de deformaciones principales en el test 7

En la Figura 87 se muestra con mejor calidad la grieta derecha de corte correspondiente a un *ultimate yield stress ratio* igual a 1.4, ya que los patrones de agrietamiento obtenidos no mostraron mayor diferencia entre sí y es el valor por defecto que recomienda ELS.

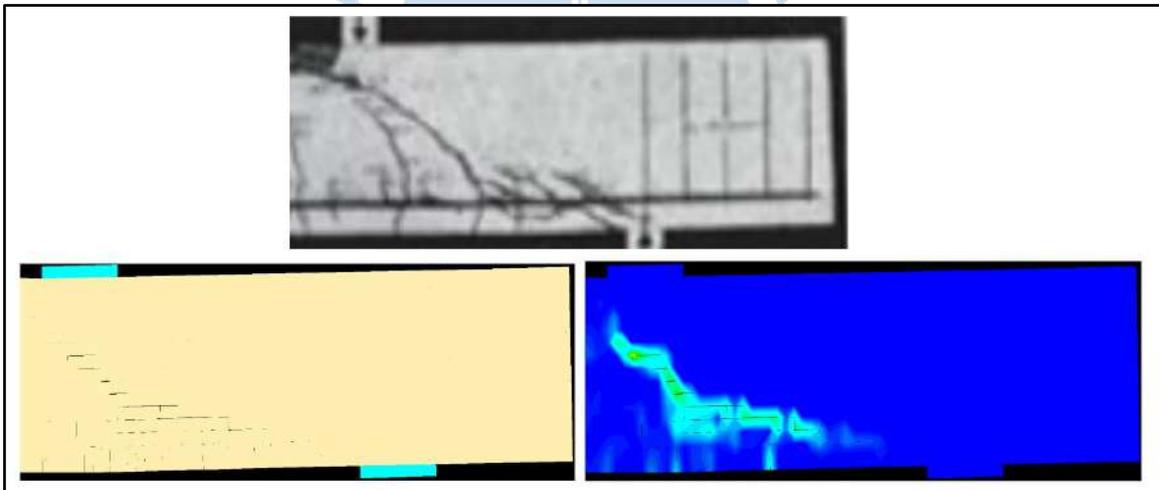


Figura 87. Patrón de agrietamiento para u.y.s.r igual a 1.4

En la Figura 88 se muestran los contornos correspondientes a los esfuerzos normales en el eje x para un *ultimate/ yield stress ratio* (u.y.s.r) igual a 1.4. Se pudo visualizar que el aplastamiento por compresión que sufrió la zona superior entre los puntos de aplicación de carga fue simulado por una mancha verde que fue un indicador de los mayores esfuerzos negativos (compresión).

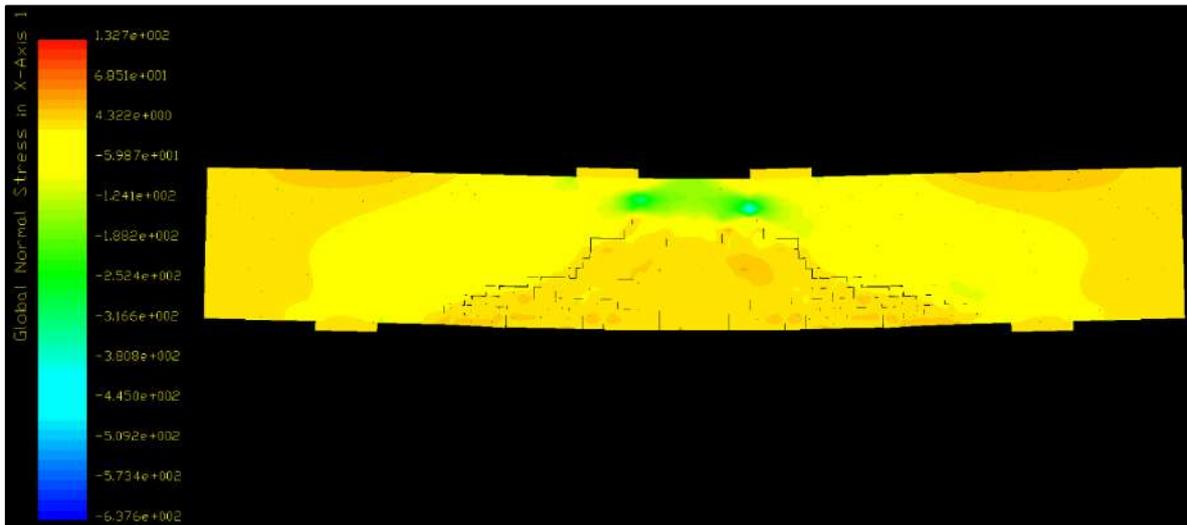


Figura 88. Contornos de esfuerzo para un u.y.s.r igual a 1.4

En la **Figura 89** se muestran las curvas fuerzas deformación obtenidas con ELS en el test 7. Las curvas se acercaron con buena precisión a la curva del experimento, además no mostraron diferencias notables entre sí. Sin embargo, existieron zonas en las que los datos obtenidos con ELS se alejaron de los experimentales.

De la misma forma que en el anterior test, la comparación entre los desplazamientos reales y simulados por ELS se realizó en 3 zonas. En la zona 1, no hubo diferencias apreciables, de tal forma que el margen de error fue bajo. El mayor porcentaje de error en esta zona fue 8.30 % y correspondió a una fuerza de 5.2 tn.

En la zona 2 el alejamiento entre los desplazamientos fue notable. El mayor margen de error en esta zona se dio cuando la fuerza fue aproximadamente de 15 tn y fue 23.10%.

En la zona 3 también hubo diferencias apreciables entre los desplazamientos reales y los simulados por ELS. El mayor margen de error en esta zona fue de 42.4% y correspondió a una fuerza aproximada de 22 tn.

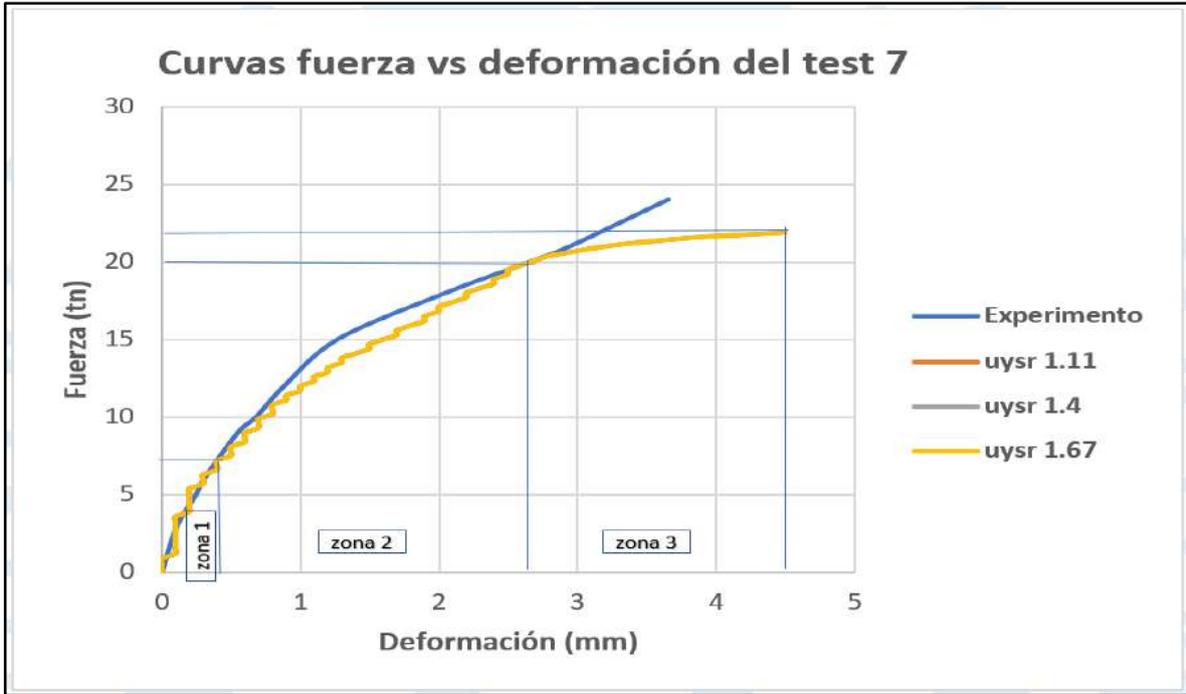


Figura 89. Curvas fuerza – deformación del test 7 (Ultimate yield stress ratio – uysr)

En la Figura 90 se muestran los gráficos de barras correspondientes a los mayores porcentajes de error registrados en el test 7.

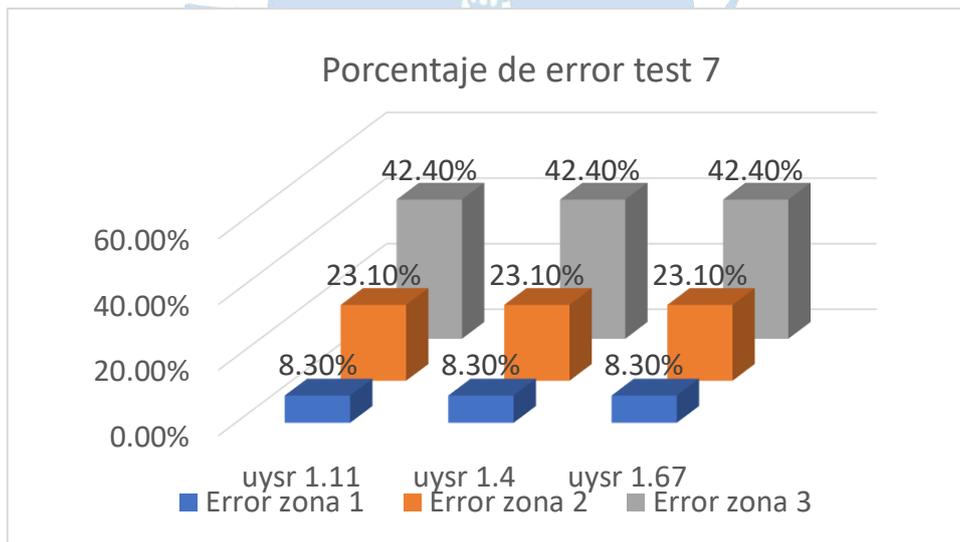


Figura 90. Porcentaje de error test 7

El porcentaje de error respecto al desplazamiento fue el mismo para cada valor evaluado en este parámetro. Los patrones de agrietamiento no mostraron diferencias apreciables entre sí. Por lo tanto, se decidió usar el valor de **1.4** como mejor valor para el Ultimate/yield stress ratio, ya que es el valor que se recomienda por el manual teórico del software.

4.8.8 Test 8

El test 8 se realizó con la intención de evaluar distintos mallados y comparar sus resultados. Para definir los valores de los parámetros de este test; se usaron los mejores valores resultantes de la sensibilidad estudiada a través de los 7 primeros tests. Los niveles de mallado estudiados fueron: 16504, 34004 y 49504 elementos.

En la **Tabla 28** se muestran los mejores valores obtenidos por el análisis de sensibilidad de los 7 tests anteriores.

Tabla 28. Valores más adecuados de parámetros estudiados hasta el test 7

Parámetro	Valor
Separation strain del concreto	0.1
Separation strain del acero	0.2
Friction coefficient del concreto	0.8
Friction coefficient del acero	0.8
Contact spring unloading stiffness factor del concreto	2
Contact spring unloading stiffness factor del acero	2
Ultimate/ yield stress del acero	1.4

En la **Figura 91** se muestran los resultados obtenidos para diferentes mallados que fueron escogidos por criterio propio. No existe en el manual de usuario un número de elementos que establezca límites para considerar a un mallado como fino o grueso. Sin embargo, el tipo de licencia con la que se contó en el momento de la simulación tuvo un tope de 50 000 elementos. Por tanto, los tipos de mallado se definieron de acuerdo con el límite de elementos establecido por las condiciones de la licencia que se adquirió.

En general se pudo observar una buena representación de los patrones de agrietamiento. Sin embargo, en el mallado fino (49612 elementos) la extensión de las grietas fue distinta a la de los 2 primeros mallados (ver círculos en la **Figura 91**). En el mallado fino las grietas de corte fueron más cortas y alejadas de los apoyos. Es decir, con el mallado fino no se simuló de manera adecuada la extensión y ubicación de las grietas.

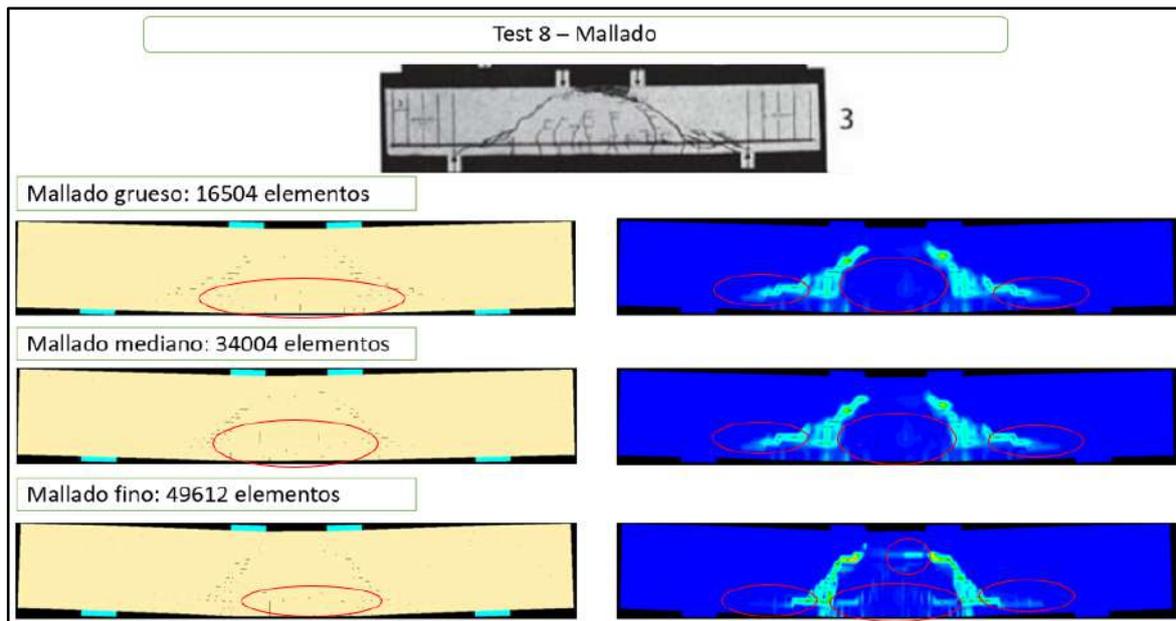


Figura 91. Patrones de agrietamiento del test 8 en ELS para la viga 3 ($a/d = 2$)

Los contornos correspondientes a las deformaciones principales indicaron la ubicación de los mayores esfuerzos principales de tracción que causaron las grietas de corte. En la Figura 92 se muestra el rango de valores de las deformaciones principales que se obtuvieron con ELS en el test 8 para un mallado mediano (34004 elementos).

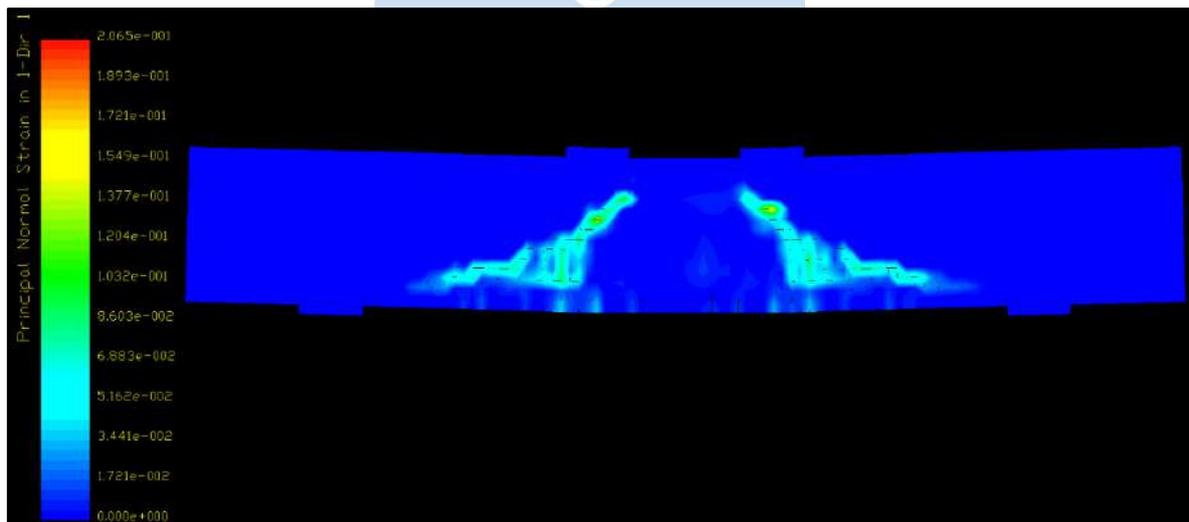


Figura 92. Rango de deformaciones principales en el test 8

En la **Figura 93** se muestra con mejor resolución la grieta derecha de corte correspondiente a un mallado intermedio, ya que se obtuvo buenos resultados respecto a patrón de agrietamiento.

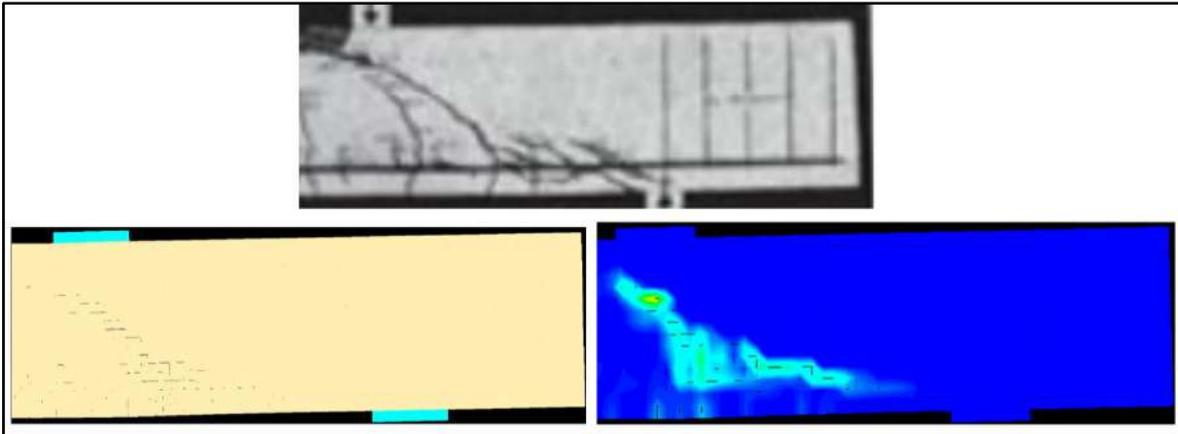


Figura 93. Patrón de agrietamiento para el mallado mediano

En la **Figura 94** se muestran los contornos correspondientes a los esfuerzos normales en el eje x para un mallado mediano. Se pudo visualizar que el aplastamiento por compresión que sufrió la zona superior entre los puntos de aplicación de carga fue simulado por una mancha verde que fue un indicador de los mayores esfuerzos negativos (compresión).

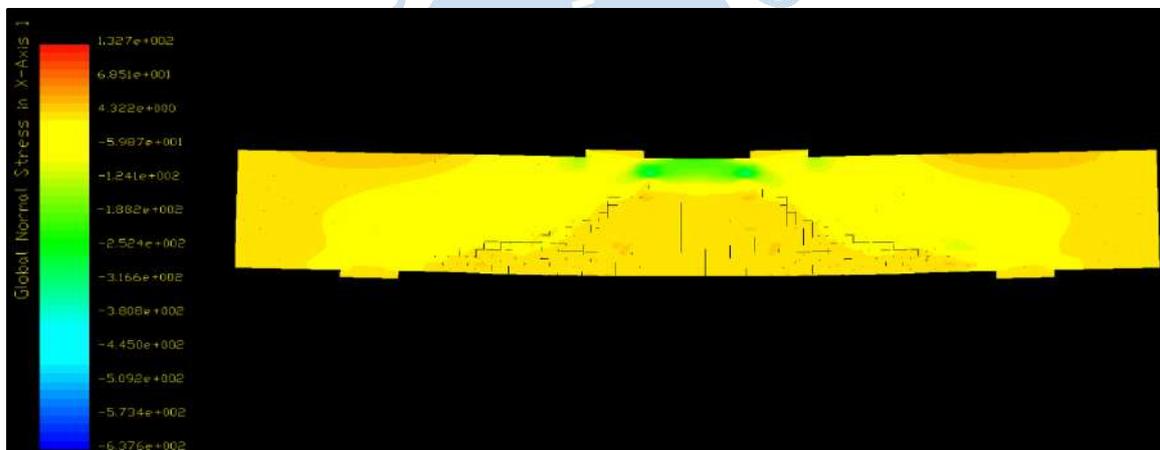


Figura 94. Contornos de esfuerzos para un mallado mediano

En la **Figura 95** se muestran las curvas fuerza-deformación obtenidas con ELS en el test 8. De la misma forma que en los tests anteriores, las fuerzas fueron datos de entrada y ELS simuló los desplazamientos. Por tanto, el margen de error se calculó respecto a la diferencia de desplazamiento entre los resultados experimentales y los obtenidos con ELS.

En la zona 1, los 3 mallados evaluados dieron resultados similares entre sí. Las 3 curvas obtenidas con ELS se acercaron con buena calidad a la experimental, de tal forma que el margen de error en la primera zona fue muy bajo.

En la zona 2, la diferencia entre las 3 curvas fue notable. Además, todas se alejaron de la curva experimental de manera significativa. En esta zona, la curva que más se acercó a la curva real fue la correspondiente al mallado 2, mientras que la curva más alejada fue la del mallado 3. El mayor porcentaje de error en esta zona fue 30.77% correspondiente a una fuerza de 15 tn aproximadamente.

En la zona 3, las curvas del mallado 1 y 2 presentaron resultados similares entre sí. Sin embargo, la curva correspondiente al mallado 3 estuvo lejos de estas. En esta zona el análisis se realizó para una fuerza de 22 tn, ya que es donde las curvas correspondientes al mallado se volvieron paralelas al eje de las deformaciones. La curva fuerza-deformación que se generó utilizando el mallado 3 reportó una deformación muy alta si se compara a la observada en las curvas de las otras propuestas de mallado. El margen de error para el mallado 3 fue mayor a 100 %.

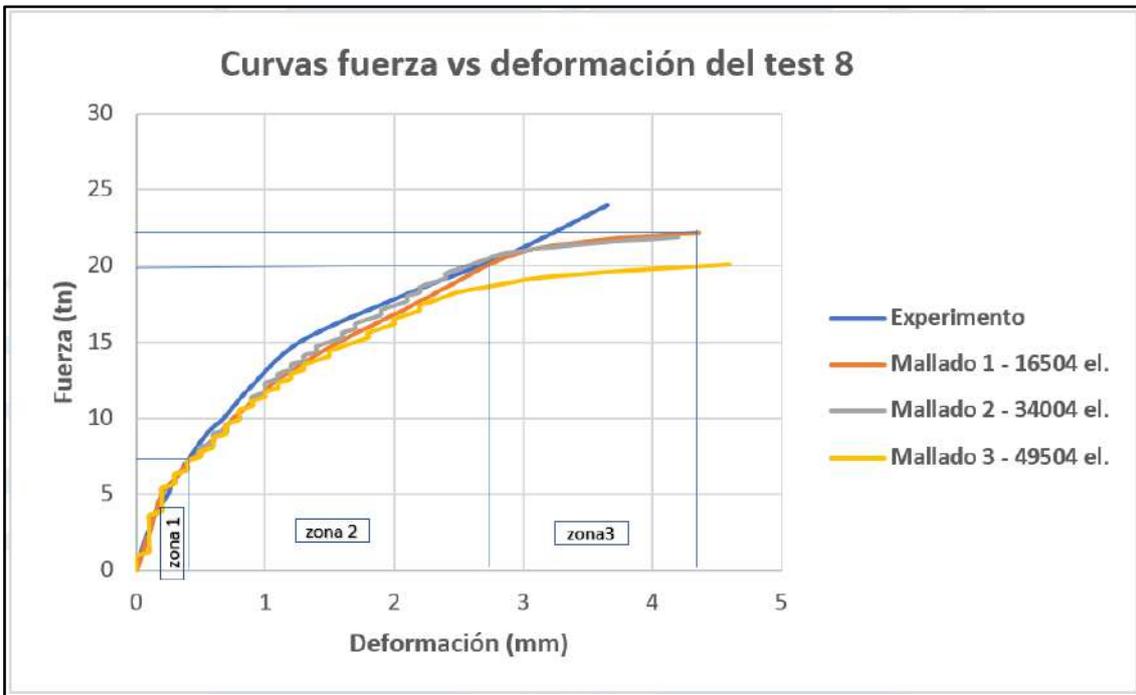


Figura 95. Curvas fuerza – deformación del test 8 y experimentales.

En la Figura 96 se presentan los diagramas de barras correspondientes a los mayores porcentajes de error del test 8.

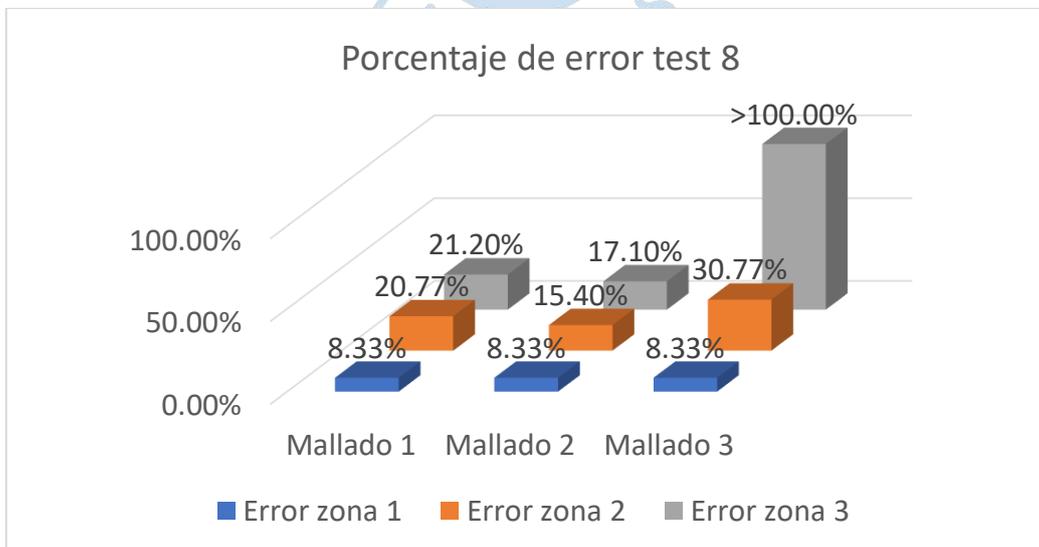


Figura 96. Porcentaje de error test 8

Al observar los patrones de agrietamiento y porcentajes de error correspondientes a los diferentes mallados que se evaluaron, se pudo ver que un mallado refinado no garantizó mejores resultados. Se obtuvieron mejoras cuando se pasó del mallado 1 al mallado 2. Sin embargo, con el mallado 3 la caída en la calidad y precisión de los resultados fue significativa.

En la **Figura 96** se pudo ver que los menores porcentajes de error fueron para el mallado mediano (34004 elementos). Por tanto, este fue seleccionado como el más adecuado.

4.8.9 Test 9

El test 9 se realizó con la finalidad de evaluar la capacidad del software para capturar fenómenos aleatorios que pueden ocurrir en un ensayo real. En este test también se usaron los valores mostrados en la **Tabla 28**. En este test, al igual que en el anterior, se usaron los valores más adecuados obtenidos en los 7 primeros test. Adicionalmente, después de evaluar diferentes mallados en el test 8, se optó por usar un mallado mediano en todas las 8 simulaciones, ya que se comprobó que exigir un mallado refinado no es una garantía de mejores resultados.

En la **Tabla 29** se muestran los valores más adecuados para los parámetros que se estudiaron en los test previos.

Tabla 29. Valores más adecuados de parámetros estudiados hasta el test 8

Parámetro	Valor
Separation strain del concreto	0.1
Separation strain del acero	0.2
Friction coefficient del concreto	0.8
Friction coefficient del acero	0.8
Contact spring unloading stiffness factor del concreto	2
Contact spring unloading stiffness factor del acero	2
Ultimate/ yield stress del acero	1.4
Mallado (nro de elementos)	34004

La viga 3 se simuló 8 veces con las mismas características y condiciones, obteniéndose resultados con gran similitud entre sí. Los patrones de agrietamiento se muestran la **Figura 97**. Se pudo ver que las grietas de corte fueron representadas con buena calidad y precisión, mientras que las grietas de flexión no se apreciaron de manera evidente. Sin embargo, se observó puntos que confirmaron la existencia de las grietas de flexión (ver círculos con líneas rojas).

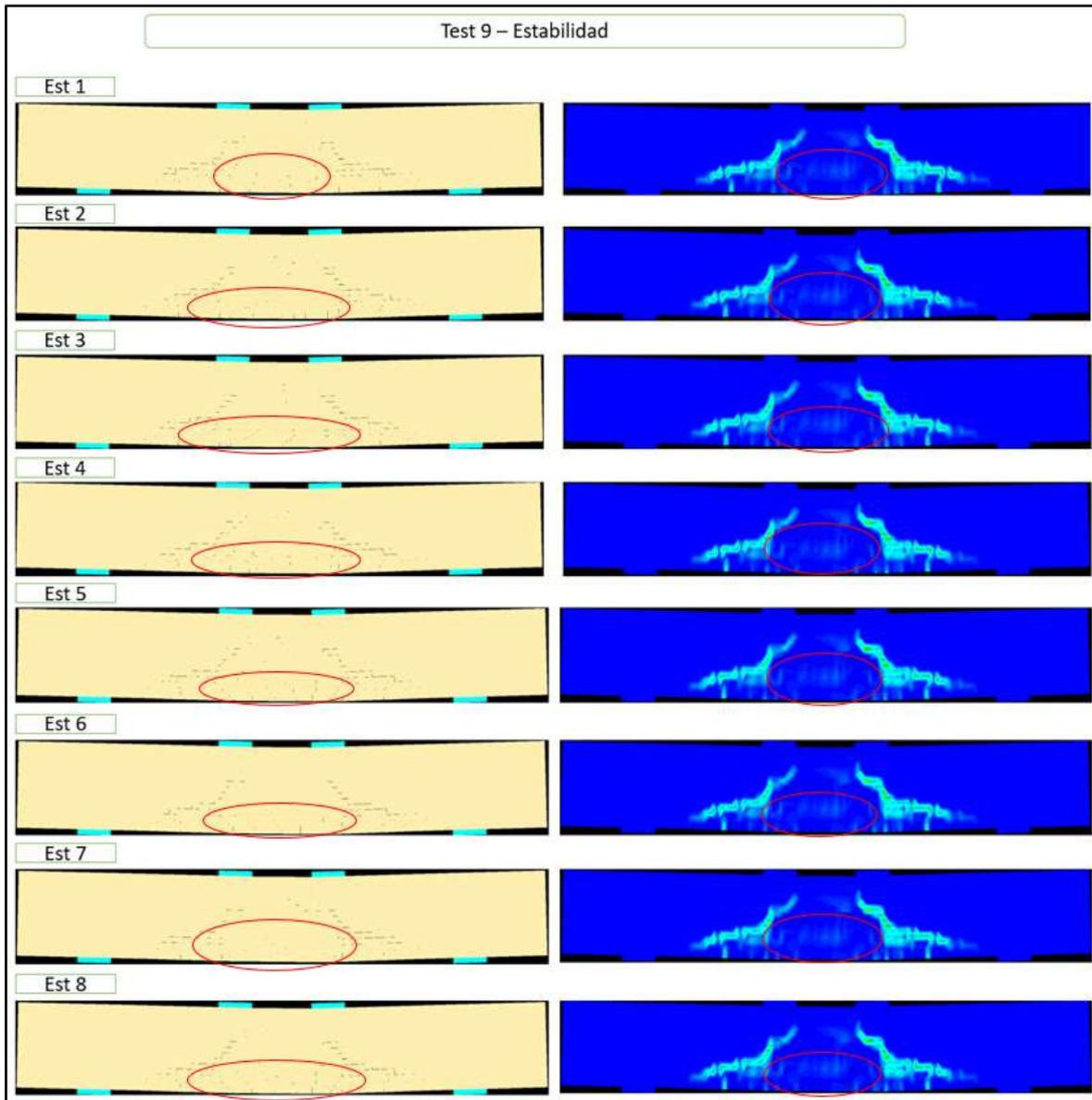


Figura 97. Patrones de agrietamiento del test 9 en ELS para la viga 3 ($a/d = 2$)

En la **Figura 98** se presentan los resultados de las curvas fuerza- deformación obtenidas con ELS en el test 9. Las curvas de las 8 simulaciones no tuvieron diferencias apreciables que indiquen que el software haya capturado algún fenómeno aleatorio. Las curvas se acercaron con buena precisión a la curva del experimento, además fueron muy similares entre sí. Sin embargo, existieron zonas en las que los datos obtenidos con ELS se alejaron de los experimentales.

En la zona 1, al igual que en los tests anteriores la predicción de los desplazamientos con ELS fue de buena calidad y el margen de error fue muy bajo. Las curvas fuerza deformación obtenidas con ELS no mostraron diferencias entre sí, y se acercaron mucho a la curva real. El mayor margen de error en esta zona fue 8.33 % y correspondió a una fuerza de 5.2 tn.

En la zona 2, la diferencia entre los desplazamientos obtenidos con ELS y experimentales fue significativa. El mayor margen de error en esta zona fue 23.10% y correspondió a una fuerza de 22tn.

En la zona 3, la diferencia entre los desplazamientos fue apreciable. El mayor margen de error fue de 23.42 % y correspondió a una fuerza de 22 tn. AL igual que en los tests anteriores el análisis no se pudo hacer más arriba de esa fuerza, debido a que las curvas obtenidas con ELS se volvieron paralelas al eje de las deformaciones. Por lo que el error, hubiese sido mayor que 100% al analizar para una fuerza mayor.

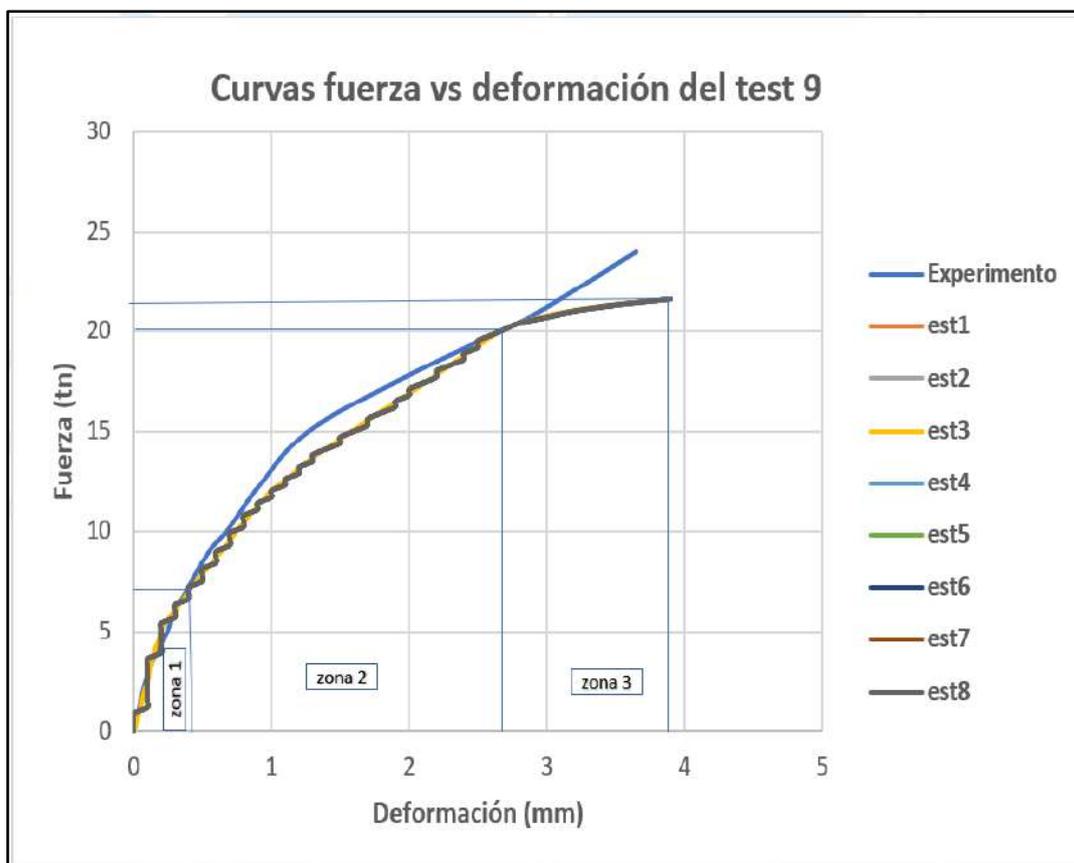


Figura 98. Curvas fuerzas – deformación del test 9 y experimentales.

En la Figura 99 se muestran los porcentajes de error correspondientes al test de sensibilidad 9. Se pudo observar que los márgenes de error fueron los mismos en las 8 simulaciones que se realizaron.

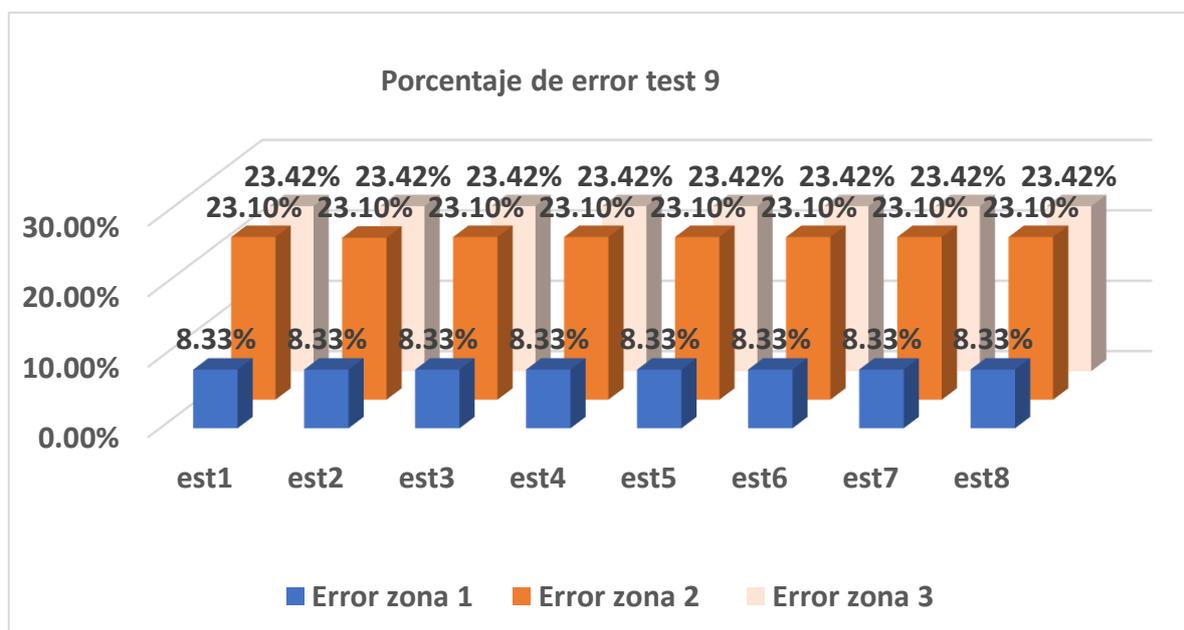


Figura 99. Porcentaje de error test 9

Los resultados fueron los mismos en todas las simulaciones. Los patrones de agrietamiento, curvas fuerza – deformación y porcentaje de error en los desplazamientos no tuvieron diferencias. Por lo tanto, a diferencia de otras investigaciones (Cordova, 2021), donde se obtuvieron patrones de fisuración que se alternaron en estructuras con las mismas condiciones de simulación; en este test no se obtuvieron resultados de esa naturaleza.

4.8.10 Vigas de Leonhardt y Walther

En este apartado se presentan los resultados de la simulación correspondiente a las 10 vigas del experimento de Leonhardt y Walther que fueron seleccionadas para esta tesis. Las vigas se simularon con los mismos valores de los parámetros mencionados en el test 9, ya que fueron los resultados más adecuados obtenidos en el estudio de sensibilidad.

En la **Figura 100** y **Figura 101** se presentan los resultados de la simulación de las vigas mencionadas anteriormente. Se pudo observar una buena representación de los patrones de agrietamiento respecto a ubicación, forma, extensión y altura.

En general, las grietas de corte se capturaron con mejor calidad que las grietas de flexión, por lo que resultaron más fáciles de apreciar. La falla por adherencia no se logró simular de la manera que se esperaba. Sin embargo, se observó una clara tendencia de las grietas a desarrollarse lo largo del acero de refuerzo.

En las vigas con mayor $a/d > 6$ (viga 10 y viga 9) se obtuvieron fisuras principalmente perpendiculares al eje longitudinal de la viga, con ligera inclinación debido al cortante. Sin embargo, en la zona central las grietas de flexión no se apreciaron con claridad.

En las vigas con $2.5 \leq a/d \leq 6$ (vigas 8, 7, 6, 5 y 4) se tuvieron grietas muy inclinadas cuya tendencia fue extenderse a lo largo de las barras longitudinales inferiores.

Representando de esta forma la falla por adherencia que ocurrió en estas vigas. En las vigas 7 y 8 se pudo ver que en el lado derecho hubo una grieta bien marcada. Sin embargo, con ELS no se logró capturar este suceso, pero la ubicación, forma, inclinación y extensión de las grietas obtenidas indicaron los posibles lugares por donde podría originarse la grieta mencionada previamente.

En las vigas con $a/d < 2.5$ (vigas 1,2 y 3) se obtuvieron grietas bien pronunciadas en ambos lados de las vigas, que se extendieron desde los apoyos hasta los puntos de carga. Al igual que en las demás vigas, la ubicación, extensión y forma de las grietas se logró representar con buena precisión.

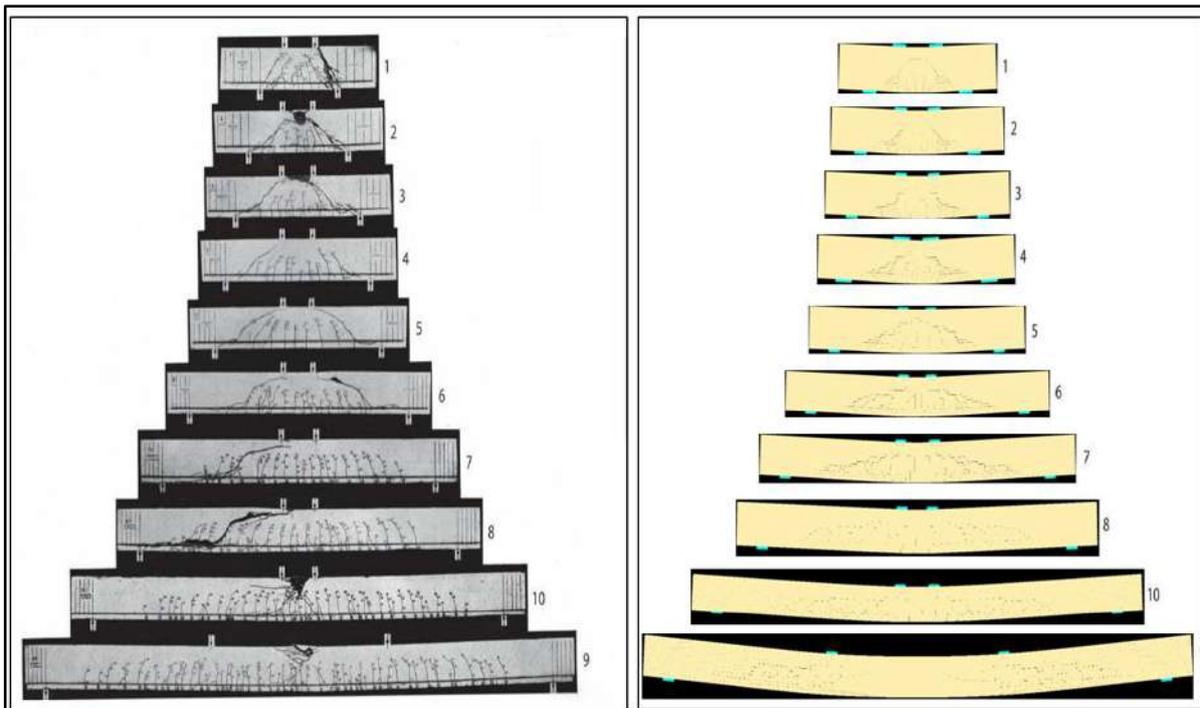


Figura 100. Patrones de agrietamiento – c.s.u.s.f concreto 2 – c.s.u.s.f acero 2

En la **Figura 101**, se presentan los contornos de las deformaciones principales en las vigas de Leonhardt y Walther. Los patrones de agrietamiento obtenidos en la simulación aparentemente fueron simétricos respecto al eje central de cada viga. Sin embargo, al observar con detenimiento se encontró que en algunas vigas hubieron diferencias apreciables entre las grietas del lado derecho e izquierdo del eje de simetría.

En la viga 3 ($a/d=2$) se observó que la grieta de corte del lado derecho tuvo una mayor extensión que la grieta del lado izquierdo. Estuvo más cerca del punto de apoyo y alcanzó una mayor altura que la otra grieta.

En las vigas 4 y 5 ($a/d = 2.5$) se observó que las grietas del lado izquierdo alcanzaron mayor altura que las de la derecha. Además, en el lado izquierdo hubieron más grietas.

En la viga 6 ($a/d = 4$) se observó que las grietas del lado derecho fueron menos inclinadas que las grietas de la izquierda. Además, tuvieron una mayor extensión, ya que

alcanzaron la misma altura que las grietas de la izquierda, pero se acercaron más al punto de apoyo.

En las demás vigas (1,2,7,8, 9 y 10) no existieron diferencias apreciables entre las grietas del lado derecho e izquierda. Por lo tanto, los patrones de agrietamiento en estas vigas tuvieron simetría respecto al centro.

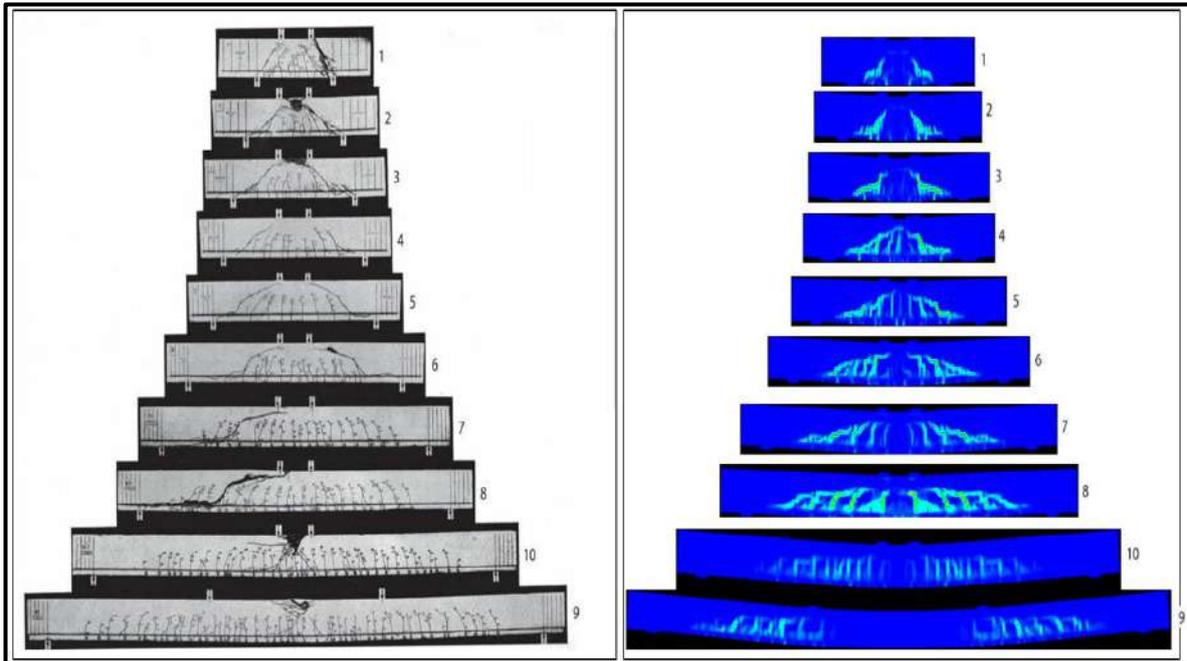


Figura 101. Contornos de deformación principal – c.s.u.s.f concreto 2 – c.s.u.s.f acero 2

En la **Figura 102** se muestran los contornos de esfuerzos normales en la dirección x. Se pudo observar que ELS no capturó los desprendimientos generados por el aplastamiento por compresión, pero marcó las zonas donde hubo concentración de esfuerzo negativos (compresión). En las vigas 2, 3, 9 y 10 se pudieron observar manchas que indicaron la zona de aplastamiento por compresión.

En las vigas 5 y 6, se pudieron observar manchas en la zona de aplastamiento por compresión. Sin embargo, estas se ubicaron más cerca al límite superior de la viga. Al comparar con los resultados experimentales se pudo ver que efectivamente las grietas de corte alcanzaron la zona de aplastamiento por compresión, pero dichas grietas se extendieron hasta el límite superior de la viga. Por lo tanto, los resultados obtenidos con ELS fueron coherentes.

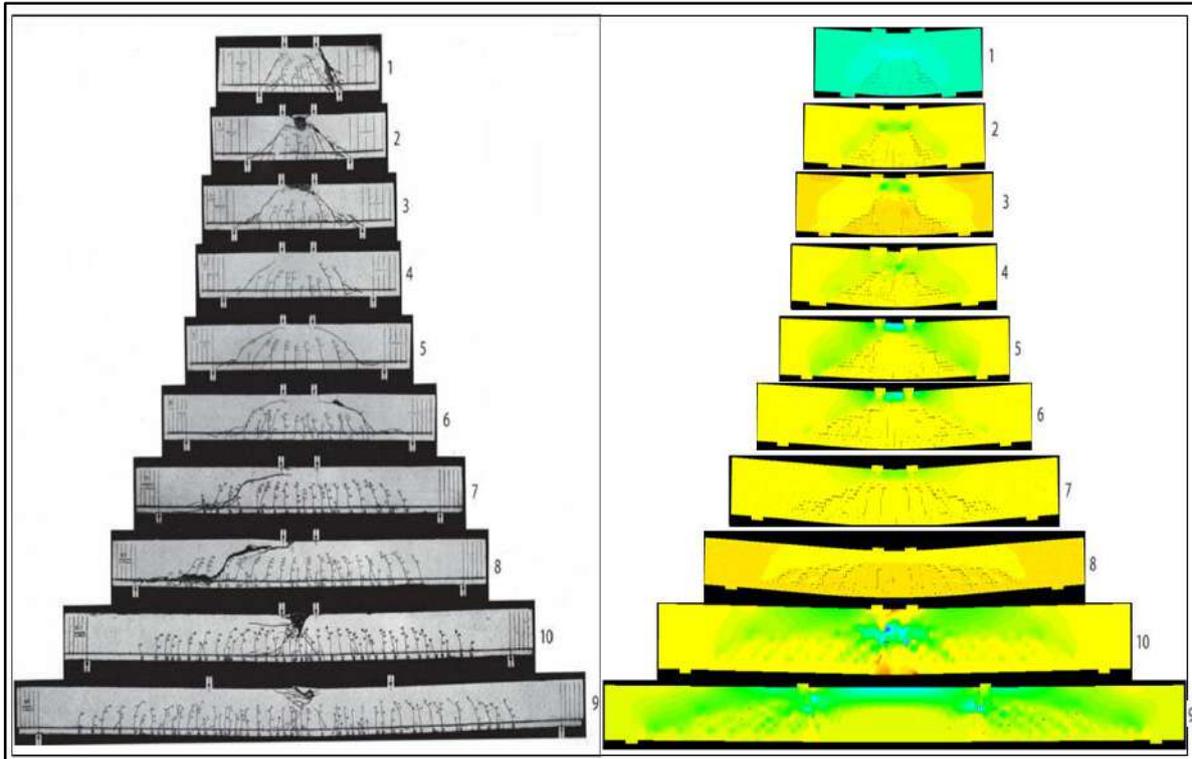


Figura 102. Contornos de esfuerzos normales – Vigas de Leonhardt y Walther

En la **Figura 103** se muestran las curvas fuerza – deformación de las vigas 3,5,7 y 9, que fueron las vigas de las que se tuvo más información experimental. Estas vigas tuvieron diferentes valores de esbeltez y ayudaron a evidenciar la manera adecuada con la que ELS logró simular dichas curvas en toda su extensión.

Como se mencionó en el estudio de sensibilidad, el experimento estuvo controlado por fuerza, por lo que ELS simuló los desplazamientos. En la **Figura 103**, se pudo observar que los desplazamientos obtenidos con ELS, fueron mayores para los diferentes valores de esbeltez. Por lo tanto, las curvas estuvieron ligeramente desplazadas a la derecha y por debajo de la curva real.

Para las vigas 5, 7 y 9 ($a/d = 3,5$ y 7) la curva fuerza vs deformación obtenida con ELS se aproximó con mejor calidad a la curva experimental. Por otro lado, en la viga 3 ($a/d = 2$) que fue la viga menos esbelta de la que se tuvo más información experimental, la curva obtenida con ELS se acercó de mejor manera a la real hasta una fuerza de 12 tn aproximadamente. A partir de este valor hasta una fuerza de 20tn se pudo ver que los desplazamientos obtenidos con ELS fueron mayores que los experimentales. Finalmente, a partir de 20 tn el margen de error se incrementó en mayor medida.

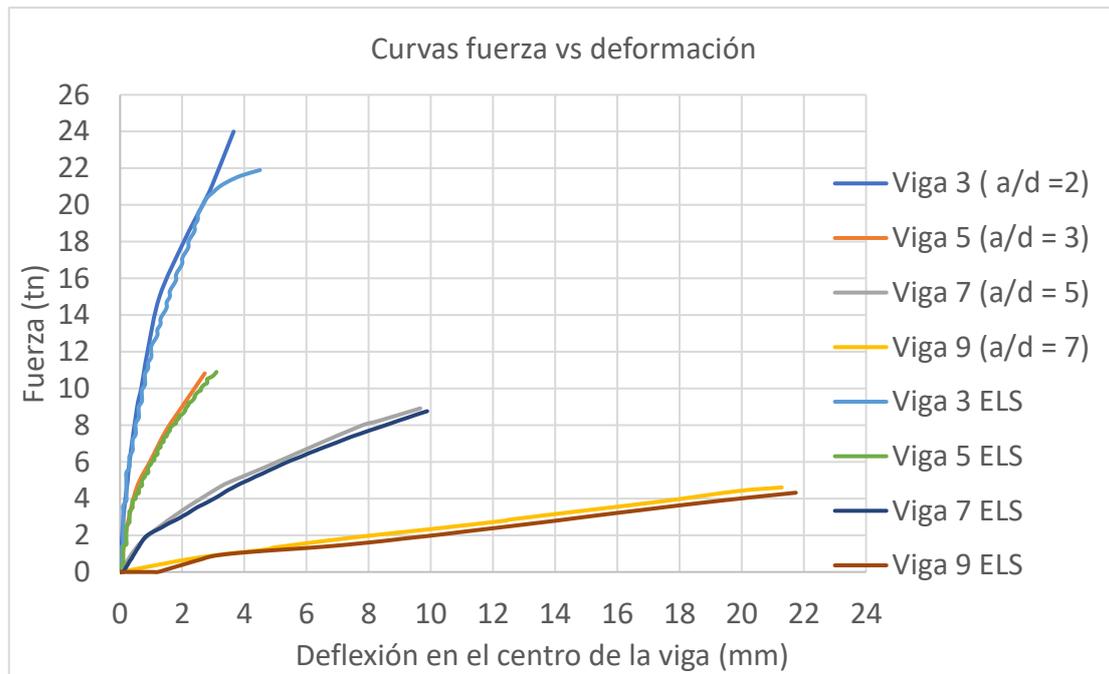


Figura 103. Curvas fuerza – deformación de vigas 3,5, 7 y 9

En la **Figura 104** se presentan los diagramas de barras correspondientes al máximo margen de error en los desplazamientos registrado en las curvas fuerza vs deformación mostradas en la **Figura 103**. El margen de error que se presentó en la **Figura 104** fue medido en el pico de cada curva, ya que fue donde las curvas simuladas con ELS se alejaron más.

Se pudo observar que la viga 3 tuvo el margen de error más alto. Además, se observó que el porcentaje de error en los desplazamientos fue disminuyendo a medida que la esbeltez se incrementó. Es decir, ELS simuló mejor el comportamiento de las vigas en las que el comportamiento a cortante no es dominante.

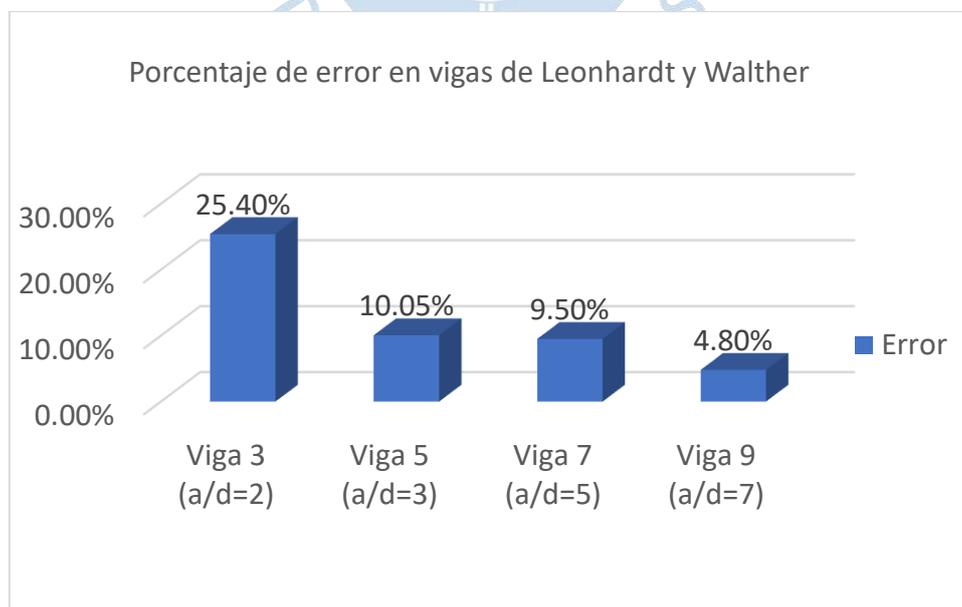


Figura 104. Porcentajes de error máximo en las vigas con mayor información experimental disponible

4.8.11 Exploración adicional del *contact spring unloading stiffness factor*

Se realizaron 2 simulaciones adicionales para el *contact spring unloading stiffness factor* (c.s.u.s.f) con la finalidad de analizar otros valores de este parámetro en vigas con diferente esbeltez.

Algunos modelos de vigas con condiciones similares a las de este estudio, que vinieron como ejemplo en el software asignaron el valor de 10 para c.s.u.s.f del concreto y del acero. Sin embargo, dichos valores no contaron con justificación documentada. Además, en esta tesis se encontró mediante el estudio de sensibilidad que el valor más adecuado de este parámetro en concreto y acero fue 2.

En la primera simulación adicional, Se fijó el c.s.u.s.f del acero en 2, ya que en el test 6 los resultados obtenidos para diferentes valores de este parámetro en el acero no tuvieron diferencias entre sí. Además, dicho valor fue el recomendado por el manual técnico del software. Por otro lado, en el concreto se usó el valor de 0, ya que en el estudio de sensibilidad fue uno de los valores junto con 2, que dio mejores resultados.

En la simulación adicional 2, se usó el valor de 10 para el concreto y acero, ya que fue una combinación recurrente en los modelos preestablecidos del software. En **Tabla 30** se muestra un resumen de la justificación de esta exploración adicional

Tabla 30. Exploración adicional del *contact spring unloading stiffness factor*

	Parámetro	Valor	Justificación de su uso
Simulación adicional 1	c.s.u.s.f acero	2	Fue el valor más adecuado obtenido en el programa de simulación. Por lo tanto, en esta simulación se mantuvo fijo.
	c.s.u.s.f concreto	0	Con este valor se obtuvo buenos resultados en el programa de simulación que estuvo basado en la viga 3 (un solo valor de esbeltez, $a/d = 2$). Por lo tanto, se exploró dicho valor para diferentes esbelteces ($1 \leq a/d \leq 8$)
Simulación adicional 2	c.s.u.s.f acero	10	En los ejemplos del software, es un valor usado con recurrencia en modelos de vigas con similares condiciones a las de esta simulación. Por lo tanto, se evaluó este valor para distintas esbelteces.
	c.s.u.s.f concreto	10	En los ejemplos del software, es un valor usado con recurrencia en modelos de vigas con similares condiciones a las de esta simulación. Por lo tanto, se evaluó este valor para distintas esbelteces.

En la **Figura 105** y **Figura 106** se presentan los resultados de la simulación adicional 1. Se pudo observar una buena representación de los patrones de agrietamiento. Sin embargo, las grietas de corte en las vigas más esbeltas no fueron tan marcadas como cuando dicho parámetro (c.s.u.s.f del concreto) es 2. En la viga 8, se observó grietas tenues en comparación

con las que se obtuvieron en la anterior simulación (**Acápite 4.8.10**), donde se pudo ver que las grietas tuvieron una marcada tendencia a desarrollarse a lo largo del acero de refuerzo. Esto no se apreció en la simulación.

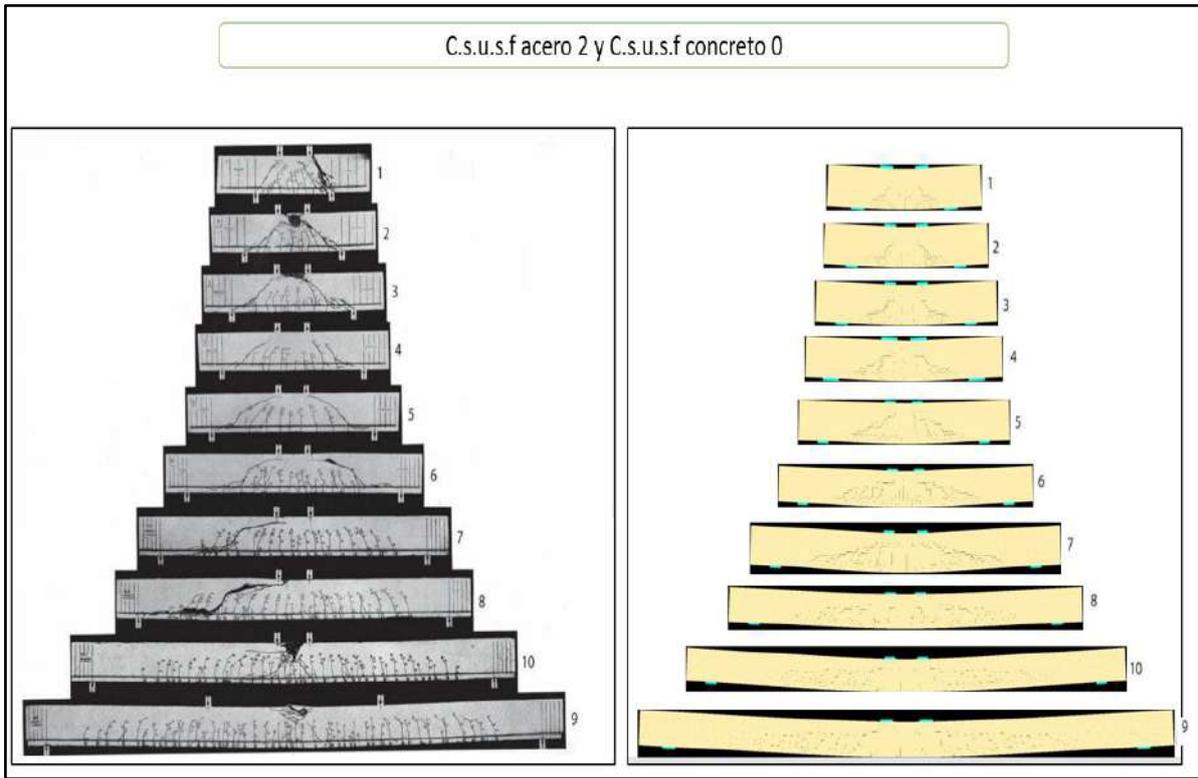


Figura 105. Patrones de agrietamiento – c.s.u.s.f concreto 0 – c.s.u.s.f acero 2

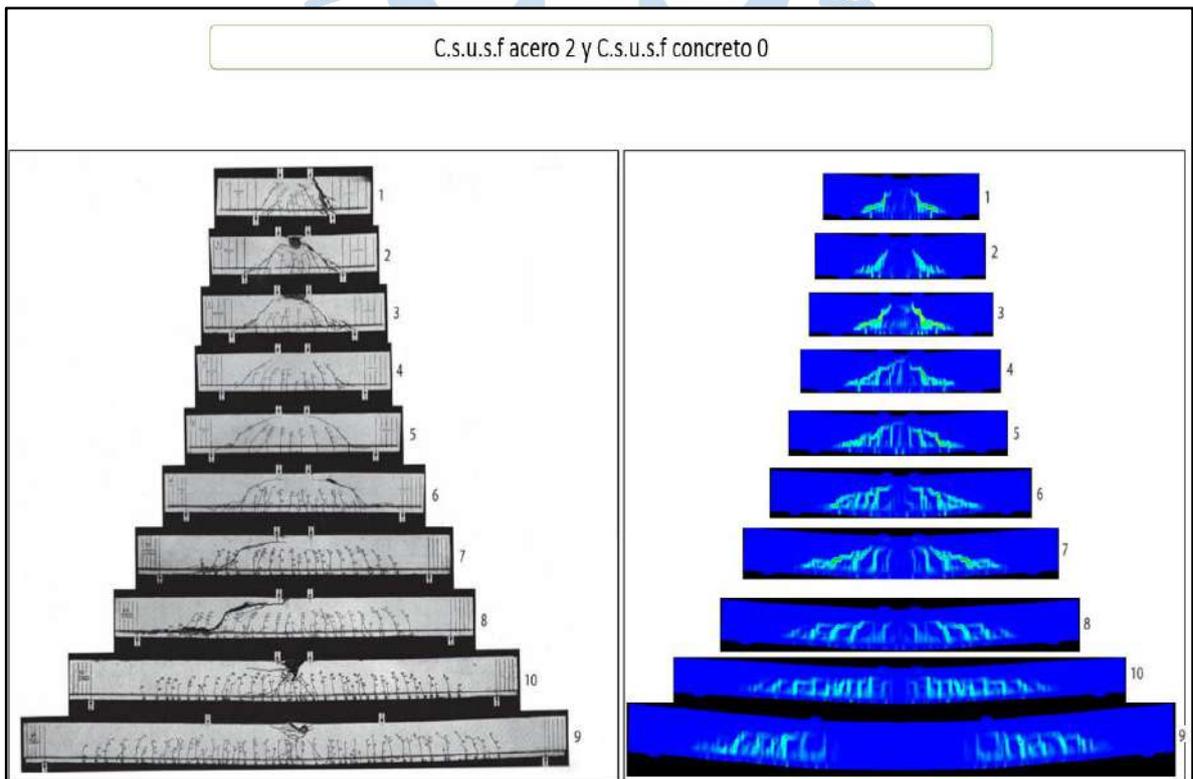


Figura 106. Contornos de deformación principal - c.s.u.s.f concreto 0 – c.s.u.s.f acero 2

En la **Figura 107** se muestran las curvas fuerza deformación de las vigas con más información experimental disponible. Se observó que ELS simuló de mejor manera las vigas 5, 7 y 9 ($a/d = 3, 5$ y 7), ya que las curvas obtenidas con el software se acercaron más a las curvas reales. En la viga 3 ($a/d = 2$), que fue una viga donde predominó el comportamiento a cortante, el acercamiento fue adecuado en la primera mitad de la curva, aproximadamente hasta una fuerza de 12 tn. A partir de este valor los desplazamientos simulados con ELS fueron mayores que los experimentales. Sin embargo, alrededor de una fuerza de 20 tn los desplazamientos se aproximaron nuevamente y luego el margen de error se incrementó notablemente hasta el final de la curva.

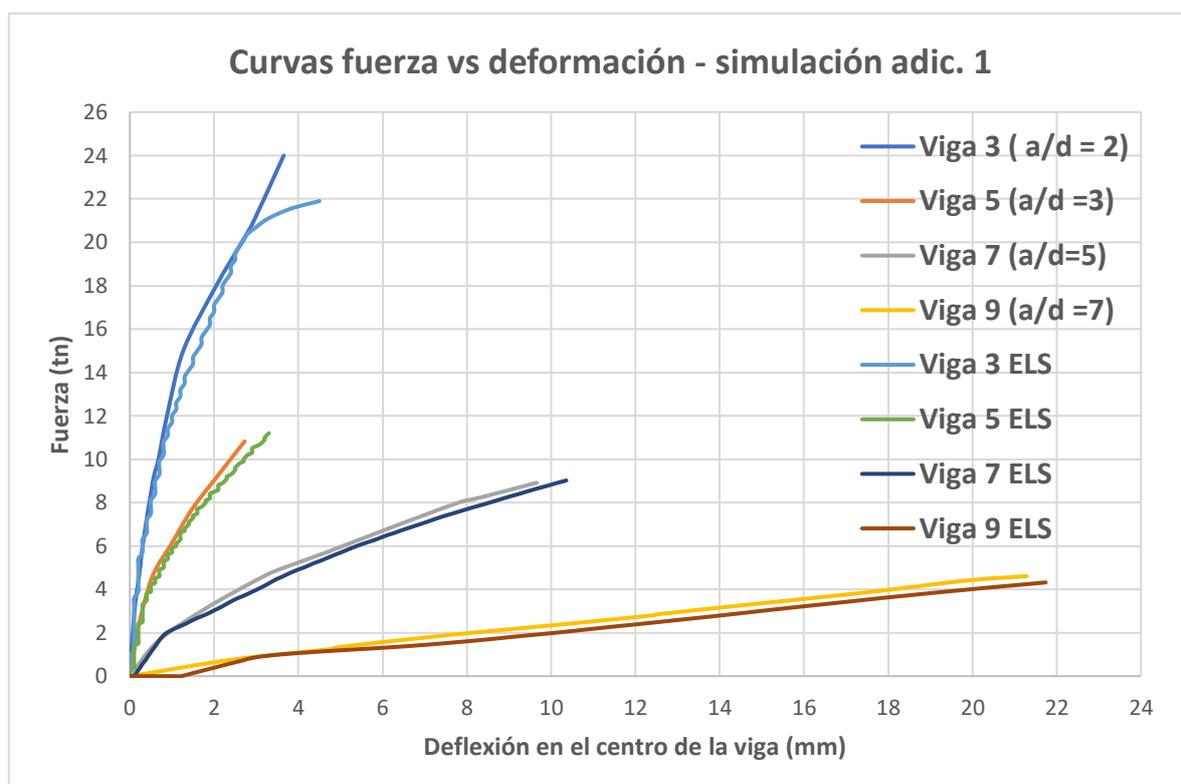


Figura 107. Curvas fuerza vs deformación de la simulación adicional 1

En la **Figura 108** y **Figura 109** se muestran los resultados de la simulación adicional 2. Se pudo ver que los patrones de agrietamiento fueron más tenues en comparación con las 2 simulaciones anteriores (simulación del acápite **4.8.10** y simulación adicional 1 de la **Tabla 30**). La ubicación, extensión y forma de las grietas fue similar con las otras simulaciones. Sin embargo, se obtuvo grietas menos definidas y con menor calidad.

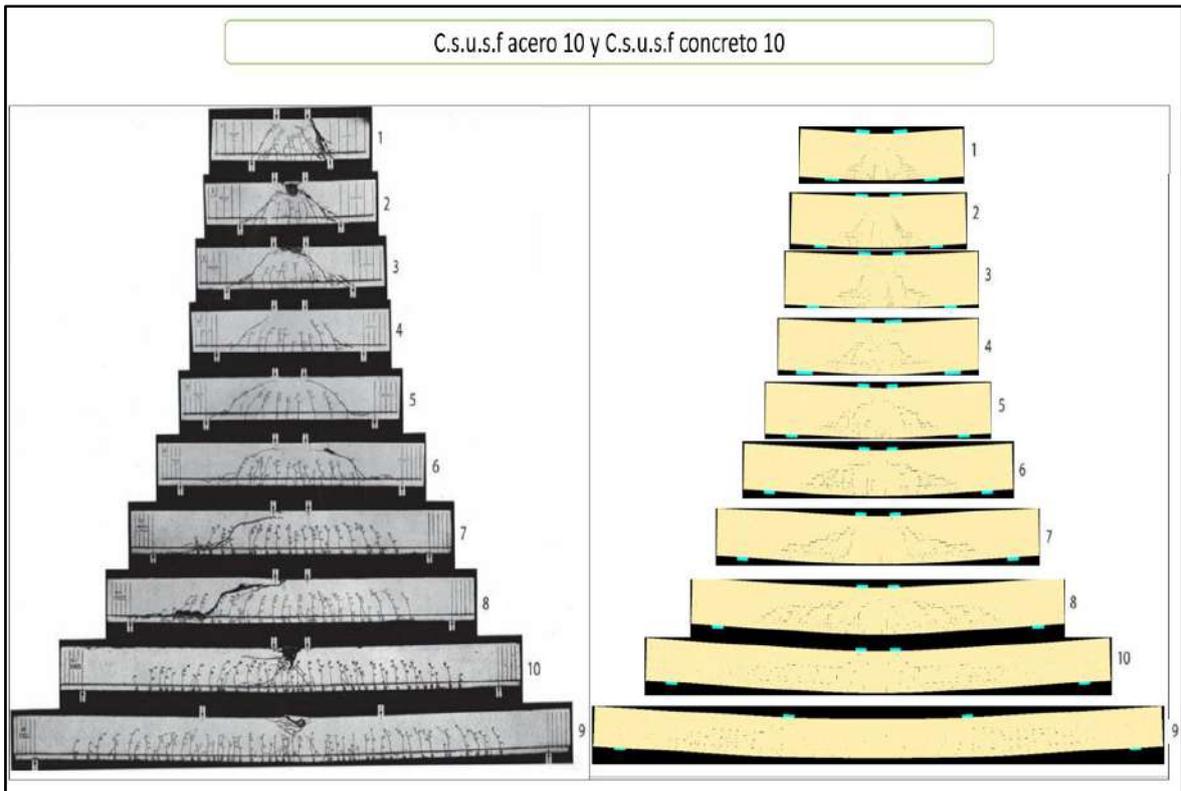


Figura 108. Patrones de agrietamiento – c.s.u.s.f concreto 10 – c.s.u.s.f acero 10

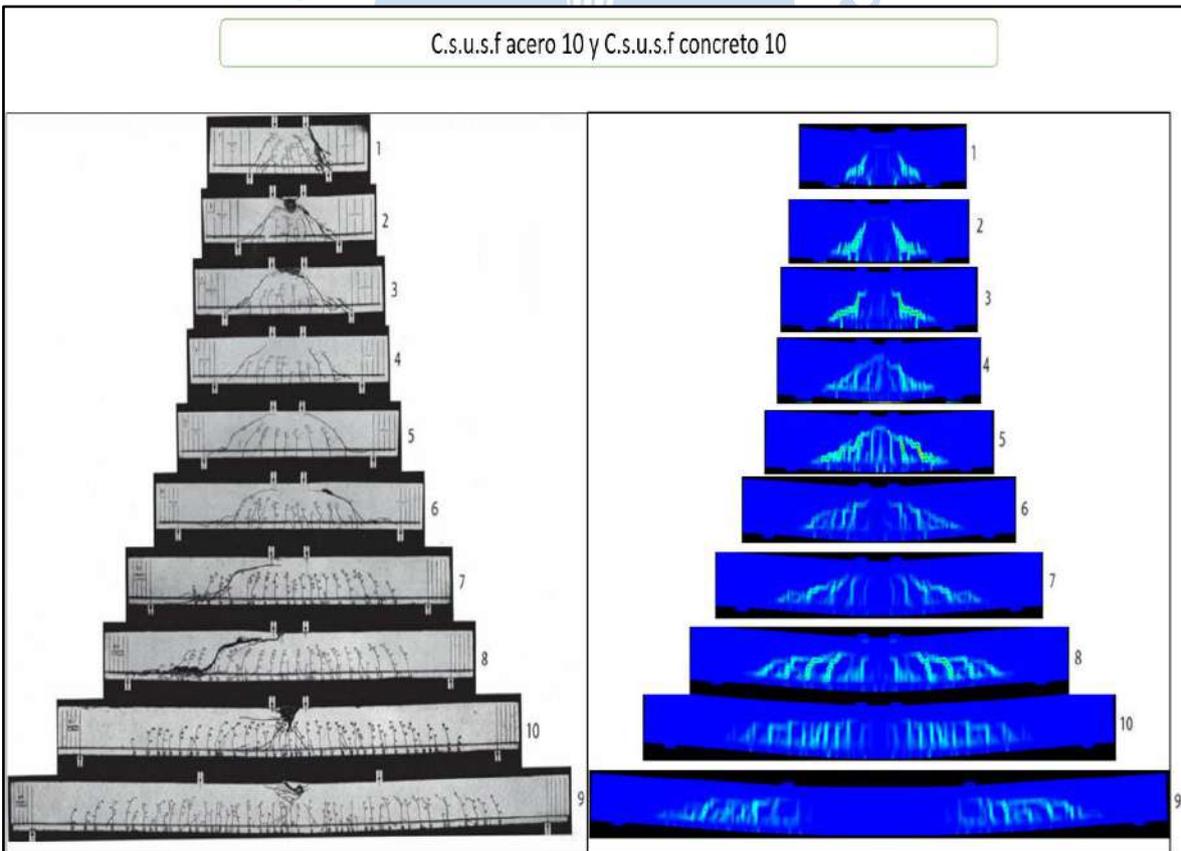


Figura 109. Contornos de deformación – c.s.u.s.f concreto 10 – c.s.u.s.f acero 10

En la **Figura 110** se muestran las curvas fuerza deformación de las vigas con más información experimental disponible. Se observó que ELS simuló de mejor manera las vigas 5, 7 y 9 ($a/d=3, 5$ y 7), ya que las curvas obtenidas con el software se acercaron más a las curvas reales.

En la viga 3 ($a/d=2$), que fue una viga donde predominó el comportamiento a cortante, el acercamiento fue adecuado en la primera mitad de la curva, aproximadamente hasta una fuerza de 12 tn. A partir de este valor los desplazamientos simulados con ELS fueron mayores que los experimentales. Sin embargo, alrededor de una fuerza de 20 tn los desplazamientos se aproximaron nuevamente y luego el margen de error se incrementó notablemente hasta el final de la curva.

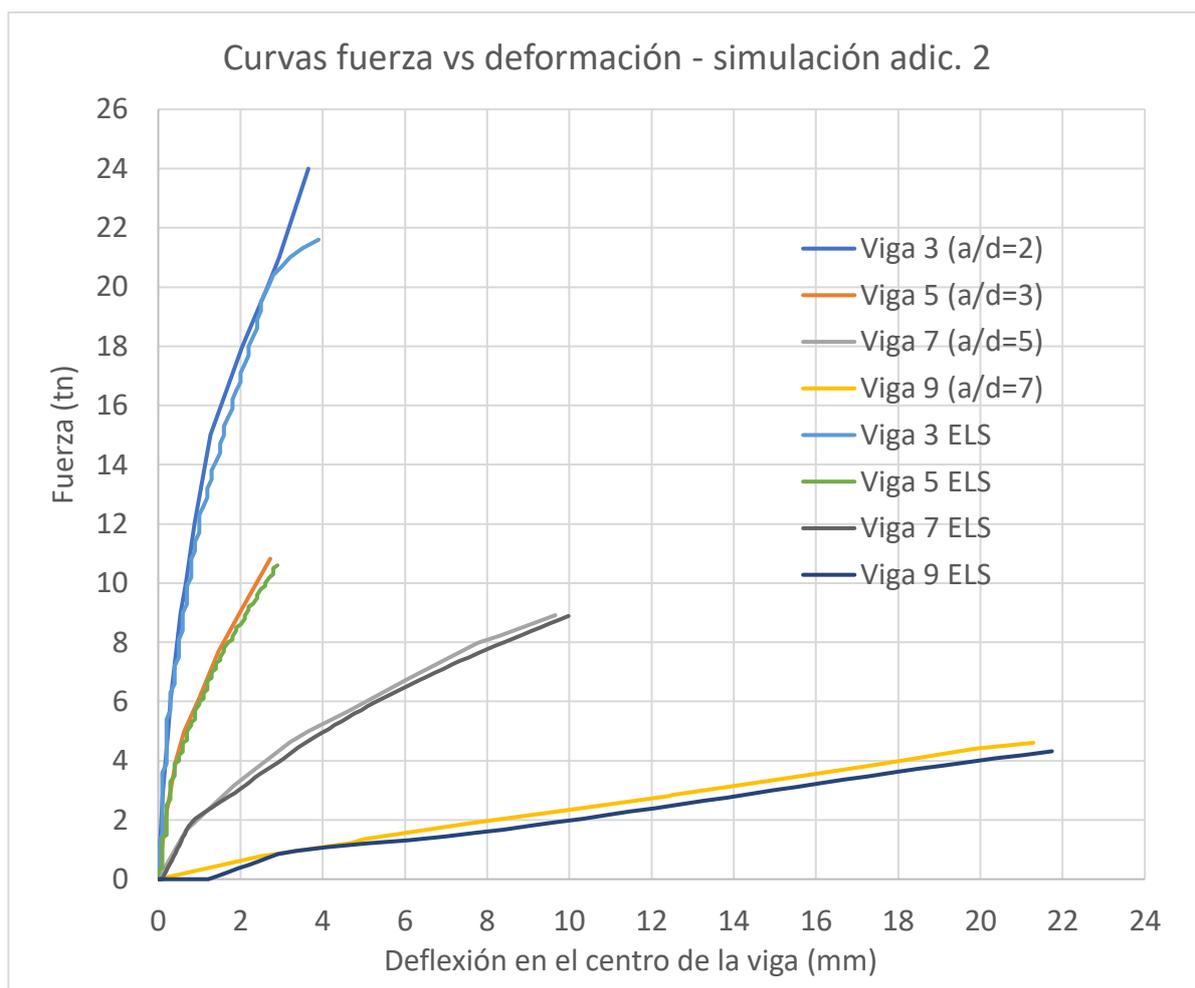


Figura 110. Curvas fuerza vs deformación – simulación adicional 2

En la **Figura 111** se muestran los mayores porcentajes de error en las 2 simulaciones adicionales y la simulación inicial (**Acápito 4.8.10**) de las vigas de las que se tuvo mayor información experimental.

Los márgenes de error fueron cercanos en las 3 simulaciones que se presentan en la **Figura 111**. Sin embargo, los de la simulación inicial fueron ligeramente menores que los de las

simulaciones 1 y 2. Se pudo apreciar que al margen de error tuvo una marcada tendencia a disminuir con el incremento de la esbeltez (a/d) de las vigas.

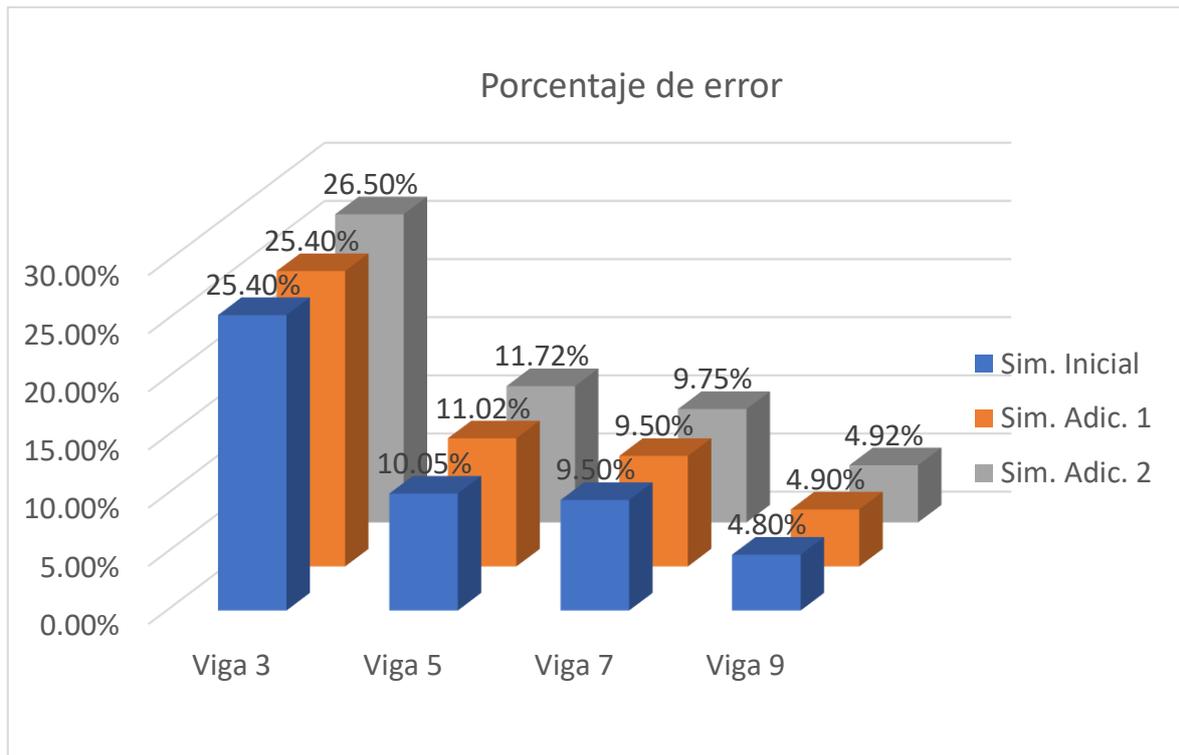
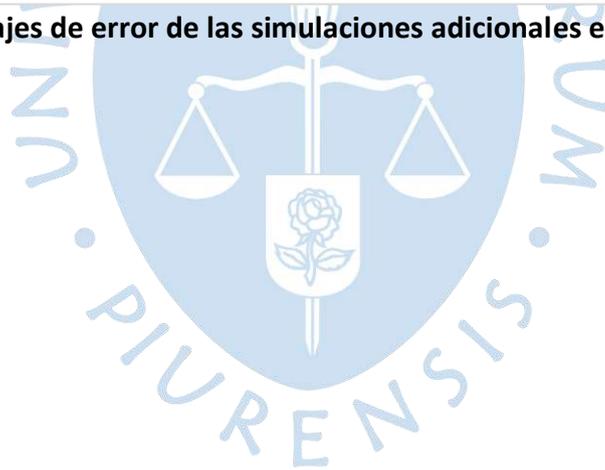


Figura 111. Porcentajes de error de las simulaciones adicionales e inicial





Conclusiones

Las grietas de corte se pudieron simular exitosamente con ELS en cuanto a ubicación, extensión, altura y distribución sin recurrir a técnicas complejas como sucede con softwares basados en el método de los elementos finitos. ELS permitió capturar con gran precisión el agrietamiento de las vigas, en especial las grietas de corte, sin necesidad del conocimiento previo de la forma de falla y ubicación de las grietas. Se consiguió representar adecuadamente el comportamiento de la estructura a partir de la geometría, restricciones de los apoyos, cargas aplicadas y propiedades de los materiales.

Las grietas de flexión no fueron apreciables con la misma calidad que las grietas de corte. Las grietas de flexión no se simularon de la manera que se esperaba con ELS en cuanto a extensión, distribución y altura. Sin embargo, fueron capturadas en la ubicación correcta. Se observaron evidencias de la capacidad del software para capturar dichas grietas, aunque de manera menos evidente.

ELS logró predecir de manera adecuada la mayor parte de las curvas fuerza – deformación en las vigas que tuvieron suficiente información experimental (vigas 3, 5, 7 y 9). En la viga 3, que fue la menos esbelta de las 4 vigas mencionadas anteriormente, predominó el comportamiento a cortante y tuvo la curva fuerza – deformación con el mayor porcentaje de error en los desplazamientos. Dicho porcentaje se registró en el pico de la curva obtenida con ELS y fue de 25.4 %. Por otro lado, en las vigas 5, 7 y 9 los mayores márgenes de error registrados en los picos de las curvas dadas por ELS fueron 10.05%, 9.50% y 4.80% respectivamente.

Se comprobó con ELS que al igual que en el experimento, el incremento de la esbeltez (a/d) influyó en el comportamiento de las vigas. En las simulaciones se comprobó que en las vigas con menor esbeltez ($a/d < 6$), las grietas de corte fueron las que predominaron en comparación con las grietas por flexión. En las vigas con mayor esbeltez ($a/d > 6$) las grietas predominantes fueron las de flexión. Sin embargo, en la zona central de la viga, estas no fueron capturadas con buena calidad. En las curvas fuerza – deformación de las vigas con mayor información experimental disponible, se observó que ELS simuló adecuadamente su comportamiento. Se observó que cuando la esbeltez creció, se obtuvieron deflexiones más

altas correspondientes a cargas más bajas. Mientras que en las vigas con esbeltez menor se obtuvieron deflexiones bajas para cargas altas.

Se concluyó que los patrones de agrietamiento simulados por ELS no fueron simétricos en todas las vigas. Los patrones de agrietamiento fueron aparentemente simétricos respecto al centro de cada viga. Sin embargo, se observó que en las vigas 3, 4, 5 y 6 ($2 \leq a/d \leq 4$) las grietas tuvieron ciertas diferencias entre sí, por ejemplo: extensión, ubicación, altura e inclinación. En las vigas 1, 2, 7, 8, 9 y 10 los patrones de agrietamiento tuvieron una simetría notable respecto al eje central de la viga. En ambos lados las grietas fueron idénticas respecto a ubicación, extensión, distribución, altura e inclinación.

El mejor valor del *separation strain* del concreto fue 0.1. Con todos los valores estudiados de este parámetro (0.1, 0.15 y 0.2) se obtuvieron como máximos porcentajes de error en el desplazamiento: 8%, 23.10% y 43.86% en las zonas 1, 2 y 3 respectivamente. Sin embargo, los patrones de agrietamiento más definidos y de mejor calidad ocurrieron cuando el *separation strain* del concreto fue 0.1.

El *friction coefficient* del concreto que brindó mejores resultados fue 0.8. Las curvas fuerza vs deformación obtenidas para los valores estudiados de este parámetro (0, 0.5, 0.8 y 1) no tuvieron diferencias apreciables entre sí. Los mayores porcentajes de error obtenidos en las zonas 1, 2 y 3 fueron 8%, 23.2% y 43.86% respectivamente. Los patrones de agrietamiento con mejor calidad y grietas más marcadas se obtuvieron cuando el *friction coefficient* del concreto fue 0.8. Por lo tanto, se concluyó que el valor recomendado por el software (0.8) fue adecuado para el concreto.

El *friction coefficient* del acero que brindó mejores resultados fue 0.8. Las curvas fuerza - deformación obtenidas para los valores estudiados de este parámetro (0, 0.5, 0.8 y 1) no tuvieron diferencias apreciables entre sí. Los mayores porcentajes de error obtenidos en las zonas 1, 2 y 3 fueron 4.16%, 25.4% y 56.4% respectivamente. La curva obtenida con el valor de 1 se acercó ligeramente mejor a la curva real en la zona 3. Sin embargo, los patrones de agrietamiento correspondiente a dicho valor fueron los de calidad más baja. Los patrones de agrietamiento con mejor calidad y grietas más marcadas se obtuvieron cuando el *friction coefficient* del acero fue 0.8. Por lo tanto, se concluyó que el valor recomendado por el software (0.8) fue adecuado para el acero.

El valor adecuado para el *contact spring unloading stiffness factor* del concreto fue 2. Las curvas fuerza deformación obtenidas con los diferentes valores estudiados para este parámetro (0, 2, 5 y 10) no tuvieron diferencias apreciables entre sí. Los mayores porcentajes de error respecto a los desplazamientos obtenidos en las zonas 1, 2 y 3 fueron 8.33%, 26.2% y 42.4% respectivamente. Los patrones de agrietamiento tuvieron mejor calidad y mostraron grietas más definidas cuando el valor del parámetro en estudio fue 0 ó 2. Sin embargo, el manual teórico del software recomienda 2, por lo que se escogió dicho valor como más adecuado.

El valor adecuado para el *contact spring unloading stiffness factor* del acero fue 2.

Las curvas fuerza deformación obtenidas con los diferentes valores estudiados para este parámetro (0, 2, 5 y 10) no tuvieron diferencias apreciables entre sí. Los mayores porcentajes de error respecto a los desplazamientos obtenidos en las zonas 1, 2 y 3 fueron 8.33%, 23.10% y 42.4% respectivamente. La curva fuerza – deformación obtenida con 10 se acercó ligeramente mejor en la zona 3 respecto a las demás curvas simuladas. Sin embargo, los patrones de agrietamiento correspondientes a este valor fueron los de menor calidad. Los patrones de agrietamiento tuvieron mejor calidad y mostraron grietas más definidas cuando el parámetro en estudio fue 0 ó 2. Sin embargo, el manual teórico del software recomienda 2, por lo que se escogió dicho como más adecuado.

Se concluyó que el valor más adecuado del *ultimate/ yield stress ratio* fue 1.4. Las curvas fuerza - deformación obtenidas para los diferentes valores estudiados en este parámetro (1.11, 1.4 y 1.67) no tuvieron diferencias notables entre sí. Los mayores porcentajes de error respecto al desplazamiento que se obtuvieron en las zonas 1, 2 y 3 fueron 8.30%, 23.10%, y 42.4% respectivamente. Los patrones de agrietamiento obtenidos con los 3 valores evaluados de este parámetro no tuvieron diferencias apreciables entre sí. Por lo tanto, se escogió como mejor valor 1.4, que es el valor recomendado por el manual de teórico del ELS.

La refinación del mallado no generó mejores resultados. A diferencia de softwares basados en el *Finite Element Method*, ELS que está basado en el *Applied Element Method* no presentó mejores resultados con un mallado más fino. Los patrones de agrietamiento tuvieron mejor calidad cuando se usó un mallado grueso o mediano, ya que con el mallado fino las grietas fueron imprecisas respecto a extensión, altura y distribución.

La exploración adicional para el *contact spring unloading stiffnes factor* confirmó que el mejor valor de este parámetro para el concreto y acero es 2. Las curvas fuerza – deformación de las simulaciones adicionales e iniciales presentaron porcentajes de error muy cercanos, con una diferencia alrededor de 2% entre sí. Sin embargo, la que presentó los menores márgenes de error fue la simulación inicial. Por otro lado, los patrones de agrietamiento obtenidos en las simulaciones adicionales fueron más tenues que los obtenidos en la simulación inicial. Las grietas fueron menos marcadas y de menor calidad.

En las simulaciones del test 9 no se reportó aleatoriedad en la ubicación del agrietamiento. En el test 9, se simularon 8 vigas con las mismas condiciones de simulación (geometría, mallado, propiedades de los materiales, condiciones de borde y cargas) y los resultados que se obtuvieron fueron los mismos en las 8 simulaciones. No se observó ninguna alternancia en la posición de las grietas como reportó (Cordova, 2021) en su trabajo de investigación llamado “Simulación de remoción de columna a un pórtico de concreto armado con Extreme Loading for Structures”.

En cuanto al desempeño operativo del software, se concluye que el tiempo de simulación varió entre 30 y 60 min y el peso de cada archivo fue entre 2 y 5 GB. Aunque este tema puede ser irrelevante para los softwares comerciales comunes, se reporta esta conclusión porque para ELS el tiempo de simulación tiene un costo importante. El mallado fue el factor principal que influyó en el tiempo de simulación y peso de cada archivo. Es decir, un mallado grueso implicó que el tiempo de simulación y peso del archivo sean menores. Esto es importante a tener en cuenta, ya que el proceso de simulación se hizo en la nube, donde se tuvo espacio de almacenamiento limitado (256 GB). Además, el proceso de simulación incluyó 3 etapas: Simulación, compresión y descarga. Cada etapa tuvo aproximadamente la misma duración, por lo cual, disminuir el peso del archivo implica un menor proceso de simulación.



Recomendaciones

Realizar un estudio de sensibilidad individual y más completo para cada viga, en especial para las vigas 5, 7 y 9 ($a/d = 3, 5, 7$) que son de las que más información experimental se tiene. El programa de simulación expuesto en esta tesis fue únicamente para la viga 3 por tener una esbeltez baja y donde predomina el comportamiento a cortante. Sin embargo, es de gran interés conocer si los buenos resultados obtenidos estudiando esta viga se extienden hacia vigas con diferente esbeltez.

Realizar un estudio de sensibilidad para las variables usadas en esta tesis, pero analizando distintas estructuras. En esta tesis el estudio de sensibilidad se realizó en una viga de concreto armado, simplemente apoyada, sección constante, sin refuerzo de corte y bajo 2 cargas estáticas puntuales. Por tanto, los valores más adecuados de los parámetros estudiados se escogieron bajo criterios condicionados por el caso de estudio. Haría falta establecer otros criterios sobre el valor óptimo de cada parámetro en diferentes condiciones.

Se recomienda no ser exigente en la refinación del mallado y evaluar otros factores que sean realmente influyentes en la simulación. Según Gohel, Patel V, & Joshi, 2012 quienes analizaron un portico de concreto armado usando AEM, concluyeron que el mallado no influye en la calidad de los resultados. Por otro lado, Christy D, T M Madhavan, & Nagarajan, 2018 estudiaron con AEM una viga doblemente empotrada bajo una carga puntual estática en el centro, concluyeron que la refinación del mallado no implica mejores resultados. No obstante, sería muy interesante profundizar en este tema y determinar reglas de decisión sobre el mallado.

Se recomienda continuar la investigación simulando el acero como elemento sólido (8-node region) y comparar los resultados con el acero simulado con resortes. ELS permite simular el acero mediante el uso de resortes y como elemento sólido. En esta tesis se modeló el acero con resortes (recomendado por el manual de usuario) y se obtuvieron resultados satisfactorios, coherentes y razonablemente precisos. Sin embargo, existe otra forma de modelar el acero, que es mediante el uso de una región de 8 nodos. Se modela la varilla de acero como una columna de acero a la que se especifica su extensión y área transversal. Adicionalmente, la interacción acero – concreto se simula mediante el uso de la herramienta “interface”.



Referencias bibliográficas

- American Concrete Institute . (2019). *Building Code Requirement for Structural Concrete*. Farmington Hills.
- American Concrete Institute. (1978). Suggested Revisions to Shear Provisions for Building Codes. *ACI journal*.
- Applied Science International. (1 de Enero de 2018). *Extreme Loading for Structures (ELS) Software – Version 6.0 Released!* Obtenido de <https://www.extremeloading.com>
- Applied Science International . (2003). *Extreme Loading for Structures Viewer Manual* .
- Applied Science International. (2006). *Extreme Loading for Structures Technical Manual*. Wellington.
- Applied Science International. (2018). *Extreme Loading for Structures Theoretical Manual Version 6.0*.
- Baetu, S., & Ciongradi, I. (2011). Nonlinear Analytical Models of the Reinforced Concrete Structural Walls. *ResearchGate*.
- Bosco, N., Ferrara, E., Gherzi, A., Marino, M., & Rossi, P. (2016). Improvement of the model proposed by Menegotto and Pinto for steel. *ENGINEERING STRUCTURES*, 442-456.
- Christy D, L., T M Madhavan, P., & Nagarajan, P. (2018). *Analysis of concrete beams using applied element method* . India .
- Christy D., L., Madhavan Pillai, T. M., & Nagarajan, P. (2017). Crack Pattern of Plain Concrete Beams Using Applied Element Method . *Advance in Technology, Engineering and Computing* .
- Christy, D. L., Madhavan Pillai, T. M., & Nagarajan, P. (2020). A comparison of Applied Element Method and Finite Element Method for elastostatic problems. *Structural Integrity Assessment*, 309-320.
- Cordova, R. (2021). *Simulacion de remocion de columna a un portico de concreto armado con Extreme Loading for Structures*. Piura.
- Gohel, V., V. Patel, P., & Joshi, D. (2012). *Analysis of frame using Applied Element Method* . India.
- Gonzales Cuevas, O. M., & Robles Fernández-Villegas, F. (2005). *Aspectos fundamentales del concreto reforzado*. Mexico: Limusa.
- Herbrand, M. (2017). *Shear Strength Models for Reinforced and Prestressed Concrete Members*.
- Kong, F. K., & Evans, R. H. (1975). *Reinforced and Prestressed Concrete*.
- Latte, S. (2010). Zur Tragfähigkeit von StahlbetonFahrbahnplatten ohne Querkraftbewehrung .

- Leonhardt, F., & Walther, R. (1962). *Beitrag zur Behandlung der Schubprobleme im Stahlbetonbau*.
- Lignola, G. P. (2006). RC hollow members confined with FRP: Experimental behavior and numerical modeling.
- Maekawa, K., & Okamura, H. (1990). *Non-linear analysis and constitutive models of reinforced concrete*.
- Maekawa, K., Okamura, H., & Li, B. (1989). Contact Density Model for Stress Transfer Across Cracks in Concrete . *Journal of the Faculty of Engineering, The University of Tokyo*.
- Mazzarolo, E., Scotta, R., Bert, L., & Saetta, A. (2012). Long anchorage bond–slip formulation for modeling of r.c. elements and joints. *Engineering Structures*, 330-341.
- Meguro, K. (2001). Applied element method: A new efficient tool for design of structure considering its failure behavior. *International Center for Urban Safety Engineering*, 13-30.
- Meguro, K., & Tagel-Din, H. (1997). A new efficient technique for fracture analysis of structures.
- Moehle, J. (2015). *Seismic Design of Reinforced Concrete Buildings*. Mc Graw Hill Education.
- Park, R., & T., P. (1988). *Estructuras de concreto reforzado* . Christchurch, Nueva Zelandia.
- Prasad Dhakal, R., & Maekawa, K. (2002). PATH-DEPENDENT CYCLIC STRESS-STRAIN RELATIONSHIP OF REINFORCING BAR INCLUDING BUCKLING. *Engineering Structures* , 1383-1396.
- Verschuren, J. P., & MacGregor, J. (1965). *Contribution to the treatment of shear in reinforced concrete*. Ottawa.
- Wigth, J. K., & MacGregor, J. G. (2012). *Reinforced Concrete Mechanics and Design* .
- Zilch, K. Z. (2010). *Bemessung im konstruktiven betonbau*. Springer .