

ANÁLISIS NUMÉRICO COMPUTACIONAL DEL PUNZONADO EN LOSAS DE H°A° REFORZADO CON FIBRAS

por

FABIÁN FIENGO PÉREZ

Ingeniero Civil

Tutor de tesis Mg. Ing. Sergio Eduardo Gutiérrez

Tesis presentada como requisito parcial para acceder al grado académico de

MAGISTER EN INGENIERIA ESTRUCTURAL

de la

Universidad Nacional de Tucumán

Instituto de Estructuras Ing. Arturo M. Guzmán

Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología

Universidad Nacional de Tucumán

San Miguel de Tucumán

Abril de 2016

RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se estudia el punzonamiento en losas de hormigón armado reforzado con fibras de acero, para lo cual se empleó el programa computacional de elementos finitos ANSYS. En primera instancia se modelaron en ANSYS losas de hormigón armado y de hormigón armado reforzado con fibras de acero, las mismas que fueron ensayadas experimentalmente por otros investigadores.

Estas losas sirvieron como modelos de calibración, permitiendo ajustar parámetros y establecer criterios de convergencia. Las curvas carga – desplazamiento obtenidas numéricamente presentan un buen grado de ajuste con respecto a las obtenidas experimentalmente, lo cual nos permite determinar que ANSYS es capaz de representar el comportamiento de los materiales de manera adecuada.

Posteriormente, se realizó un estudio paramétrico, en el cual a modelos de elementos finitos de losas de hormigón armado del mismo espesor, pero con diferentes armaduras de refuerzo (cuya finalidad fue obtener fallas del tipo dúctil y del tipo frágil), se adicionaron fibras de acero con ganchos en sus extremos. El volumen de las fibras de acero añadidas a los modelos de elementos finitos, fue determinado por medio del modelo de Huang (Huang V.Z., 1995) y la resistencia residual a tracción del hormigón reforzado con fibras de acero, fue aproximada analíticamente por medio de las expresiones propuestas por Huang (Huang V.Z., 1995) y por el reglamento DAfStB (2012).

Para el estudio paramétrico realizado, la adición de fibras de acero varió desde un volumen de 0.25% hasta 1%, con la finalidad de determinar la influencia de las fibras en la carga de punzonamiento de cada una de las losas.

Como resultado del análisis paramétrico, se determinó que la adición de fibras de acero a losas de hormigón armado es un medio eficaz para absorber esfuerzos cortantes y evitar la falla por punzonamiento.

ABSTRACT

In the current research work the punching of steel fiber reinforced concrete slabs is studied, whereby the finite element computer program ANSYS is used. In the first instance reinforced concrete slabs and steel fiber reinforced concrete slabs were modeled using ANSYS, the same ones that were tested by other researchers.

These slabs served as calibration models, allowing to adjust parameters and to establish convergence criteria. The load – displacement curves obtained numerically present a good degree of fit with respect to those obtained experimentally allowing us to determine that ANSYS is capable of representing properly the behavior of the materials.

Later, a parametric study was conducted in which to finite elements models of reinforced concrete slabs with the same thickness but different reinforcement (whose purpose was to obtain ductile type and fragile type failures), hooked steel fiber were added. The volume of steel fibers added to the finite elements models, was determined by Huang's model (Huang V.Z., 1995) and the residual tensile strength of the steel fiber reinforced concrete, was estimated analytically through expressions proposed by Huang (Huang V.Z., 1995) and the DAfStB (2012) guideline

For the parametric study performed, the steel fiber addition varied from a volume of 0.25% to 1% with the purpose of determining the influence of fiber in the punching load of each slab.

As a result of the parametric study performed, it was determined that the steel fiber addition to reinforced concrete slabs is an effective means to absorb shear stresses and prevent punching failure

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi más sincero agradecimiento al selecto plantel de docentes e investigadores del Instituto de Estructuras “Ing. Arturo M. Guzmán” de la Universidad Nacional de Tucumán, cuyas enseñanzas impartidas a nosotros, los alumnos de la 14va. maestría en ingeniería estructural; nos permiten desarrollar nuestra creatividad de ingenieros e incursionar en el laborioso campo de la investigación.

Entre el grupo humano mencionado precedentemente me permito destacar al Mg. Ing. Sergio Eduardo Gutiérrez quién fungió como tutor del presente trabajo de investigación, cuyo apoyo; experiencia y capacidad de análisis fueron fundamentales para dar solución a los problemas que se presentaban a medida que se avanzaba con la tesis.

Finalmente, agradezco al Dr. Ing. Facundo Andrés Isla Calderón por el apoyo desinteresado brindado a lo largo del desarrollo de este trabajo; siendo los resultados obtenidos en su tesis doctoral fundamentales para la conclusión de esta tesis.

INDICE

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1. MOTIVACIÓN	1
1.2. IMPORTANCIA DEL PROBLEMA	2
1.3. ALCANCE DE LA TESIS	3
1.4. OBJETIVOS	4
1.5. METODOLOGÍA	4
1.6. CONTENIDO DE LA TESIS	5

CAPÍTULO 2 ESTADO DEL ARTE

2.1. INTRODUCCIÓN	7
2.2. APORTES REALIZADOS POR OTROS INVESTIGADORES	9
2.2.1. Estudios experimentales.....	10
2.2.2. Estudios numérico - computacionales	16
2.2.3. Estudios analíticos	24

CAPÍTULO 3 CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE LOS MATERIALES

3.1. INTRODUCCIÓN	28
3.2. HORMIGÓN SIMPLE	28
3.2.1. Curvas tensión – deformación del hormigón en la rama de compresión.....	28
3.2.1.1. Rama en compresión.....	28
3.2.1.2. Rama en tracción.....	32
3.2.2. Propiedades elásticas del material	33
3.2.3. Criterio de falla empleado.....	34
3.2.4. Elemento finito empleado en ANSYS para caracterizar el hormigón simple	41
3.3. BARRAS DE ACERO CONFORMADO DE DUREZA NATURAL	41
3.3.1. Propiedades elásticas del material	41

3.3.2. Criterio de falla empleado.....	41
3.3.3. Elemento finito empleado en ANSYS para caracterizar las barras de acero conformado de dureza natural.....	43
3.4. HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO	43
3.4.1. Propiedades mecánicas del hormigón reforzado con fibras de acero	45
3.4.2. Modelación numérica – computacional del hormigón reforzado con fibras de acero	49
3.4.3. Curva tensión – deformación para un hormigón reforzado con fibras de acero	50
3.4.4. Refuerzo equivalente disperso que emula las fibras de acero añadidas al hormigón .	53

CAPÍTULO 4 PROCEDIMIENTO NUMÉRICO

4.1. INTRODUCCIÓN	60
4.2. CONFORMACIÓN DE UN ELEMENTO FINITO EN ANSYS	60
4.3. ELEMENTO SOLID 65.....	61
4.4. ELEMENTO LINK180.....	65
4.5. METODOLOGÍA NUMÉRICA Y CRITERIOS DE CONVERGENCIA	66

CAPÍTULO 5 MODELOS DE ELEMENTOS FINITOS GENERADOS

5.1. INTRODUCCIÓN	69
5.2. MODELOS GENERADOS PARA CALIBRACIÓN	70
5.2.1. Losas de hormigón armado	70
5.2.2. Losas de hormigón armado reforzado con fibras de acero	76
5.3. MODELOS PARA ESTUDIO NUMÉRICO	87
5.3.1. Losas de hormigón armado reforzado con fibras de acero	87

CAPÍTULO 6 RESULTADOS OBTENIDOS

6.1. INTRODUCCIÓN.....	96
6.2. RESULTADOS OBTENIDOS PARA AJUSTE Y/O CALIBRACIÓN.....	96

6.2.1. Losas de hormigón armado	96
6.2.2. Losas de hormigón armado reforzado con fibras de acero	101
6.3. RESULTADOS OBTENIDOS POR MEDIO DE LOS MODELOS EMPLEADOS PARA REALIZAR EL ESTUDIO NUMÉRICO	108
6.3.1. Losas de hormigón armado reforzado con fibras de acero – grupo 1	109
6.3.2. Losas de hormigón armado reforzado con fibras de acero – grupo 2	110
6.3.3. Losas de hormigón armado reforzado con fibras de acero – grupo 3	112
6.4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DEL ESTUDIO NUMÉRICO	114

CAPÍTULO 7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. CONCLUSIONES	124
7.2. RECOMENDACIONES	126
7.3. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	126

ANEXOS

ANEXO 1

COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN Y A TRACCIÓN DEL HORMIGÓN SIMPLE Y DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO MODELADO EN ANSYS	127
--	------------

ANEXO 2

FUERZA DE ARRANCAMIENTO DE LAS FIBRAS DE ACERO EN LA MATRIZ DE HORMIGÓN	134
--	------------

ANEXO 3

GENERACIÓN DE CURVAS TENSIÓN – DEFORMACIÓN PARA EL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO	136
--	------------

ANEXO 4

APLICACIÓN DE LA EXPRESIÓN PROPUESTA POR EL COMITÉ ALEMÁN PARA EL HORMIGÓN ARMADO (DafStB) PARA LA DETERMINACIÓN DE LA CARGA DE PUNZONAMIENTO EN LOSAS DE HORMIGÓN ARMADO REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO	139
--	------------

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	148
---	------------

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Comparación entre un entrepiso sin vigas provisto de ábacos y capiteles; y uno sin ábacos ni capiteles (MacGregor, 2012).....	1
Figura 1.2. Esquema de la conformación del presente proyecto de investigación	6
Figura 2.1. Espécimen de una conexión losa – columna de hormigón armado, después de la falla por punzonamiento (Park y Gamble, 2000).....	7
Figura 2.2. Resumen de los aportes realizados por otros investigadores.....	9
Figura 2.3. Curvas carga – desplazamiento obtenidas para las losas de la tabla 2.1 (Cheng y Parra, 2010).....	11
Figura 2.4. Curvas carga – desplazamiento obtenidas para los modelos de la tabla 2.2 (Nguyen, <i>et al</i> , 2011)	13
Figura 2.5. Relación entre el volumen de fibras adicionadas y el incremento porcentual de la carga de punzonamiento (Nguyen, <i>et al</i> , 2011)	13
Figura 2.6. Curvas carga – desplazamiento obtenidas para los modelos de la tabla 2.3 (Higashiyama <i>et al</i> , 2011)	15
Figura 2.7. Modelos de las losas de hormigón armado reforzado con fibras de acero a) Geometría b) Malla de elementos finitos y condiciones de borde (Ruano, 2009).....	18
Figura 2.8. Curvas carga - desplazamiento para H°A° simple y con fibras de acero (Ruano, 2009)	19
Figura 2.9. a) Montaje de la losa sobre apoyos b) Ensayo de laboratorio c) Modelo de elementos finitos d) Malla de elementos finitos de la armadura de refuerzo (Ragab, 2013)	20
Figura 2.10. Rama en compresión de la curva tensión – deformación para el hormigón fibro reforzado empleada por Ragab (Ragab, 2013)	21
Figura 2.11. Rama en compresión de la curva tensión – deformación para el hormigón fibro reforzado que emplea RILEM TC 162 – TDF (Vandewalle,2003).....	21

Figura 2.12. a) Malla y condiciones de borde impuestas b) Discretización de las capas de la sección transversal de las losas (Teixeira <i>et al</i> , 2014)	23
Figura 2.13. Comportamiento a compresión uniaxial del hormigón reforzado con fibras de acero (Choi <i>et al</i> , 2007)	24
Figura 2.14. Comportamiento a tracción uniaxial del hormigón reforzado con fibras de acero (Choi <i>et al</i> , 2007)	25
Figura 3.1. Curva tensión – deformación de Hognestad, rama en compresión (MacGregor, 2012)	29
Figura 3.2. Curva tensión – deformación de Todeschini, rama en compresión (MacGregor, 2012)	30
Figura 3.3. Curva tensión – deformación de Desayi, rama en compresión (Desayi, 1964).....	31
Figura 3.4. Curva tensión – deformación del hormigón simple en tracción uniaxial, incorporada en ANSYS (ANSYS Inc., 2009).....	32
Figura 3.5. Módulos de elasticidad tangentes y secantes (MacGregor, 2012)	34
Figura 3.6. Representación en el espacio de tensiones principales de la superficie S definida en (3.16) (ANSYS Inc., 2009)	37
Figura 3.7. Superficie de falla en el espacio de tensiones principales, con tensiones biaxiales (ANSYS Inc., 2009)	40
Figura 3.8. Idealización de un comportamiento elastoplástico perfecto (Mase, 1970)	42
Figura 3.9. a) Superficie de falla del criterio de Von Mises en el espacio de tensiones principales b) Superficie de falla en el plano (Chakrabarty, 2006)	42
Figura 3.10. Espécimen de hormigón reforzado con fibras de acero (Civildigital, 2015)....	43
Figura 3.11. Ejemplo de fibras de diferentes formas y secciones transversales (Núñez López, 2011)	44
Figura 3.12. a) Proceso de fractura en tracción uniaxial b) Relación tensión – apertura de fisura en el HRFA (Tazaly, 2011).....	45

Figura 3.13. Efecto del tamaño de las fibras en la costura de fisuras (Tazaly, 2011).....	46
Figura 3.14. Comportamiento típico de un HRFA a compresión $f_{ctm} = 42 \text{ N/mm}^2$ (Köning y Kützing, 1999)	48
Figura 3.15. Curva tensión – deformación típica para el HRFA y el hormigón simple sometidos a tracción uniaxial (Choi <i>et al</i> , 2007)	48
Figura 3.16. Curva tensión – deformación propuesta por Soroushian para un hormigón reforzado con fibras de acero, rama en compresión (Choi <i>et al</i> , 2007).....	51
Figura 3.17. Curva tensión – deformación propuesta por RILEM para un hormigón reforzado con fibras de acero a) Curva completa b) Rama en tracción (Vandewalle , 2003)	53
Figura 3.18. Diagrama para la determinación de $E_{qu}\beta_{BZ}$ y D_{BZ}^F (Huang V.Z., 1995).....	54
Figura 3.19. Determinación de la resistencia del HRFA después de fisurar (Huang V.Z., 1995)	55
Figura 3.20. Distribución de tensiones residuales en la sección transversal de una viga de HRFA a) Distribución en el hormigón b) Distribución en las fibras (Huang V.Z., 1995) ...	57
Figura 3.21. Descripción del comportamiento del HRFA en tracción, de acuerdo con el modelo de Huang (Huang V.Z., 1995)	58
Figura 4.1. Datos de entrada para conformar un elemento finito en ANSYS	60
Figura 4.2. Elemento SOLID65 (ANSYS Inc., 2009)	61
Figura 4.3. Idealización del refuerzo disperso en ANSYS (Tavarez, 2001).....	62
Figura 4.4. Orientación del refuerzo disperso en SOLID65	62
Figura 4.5. Ventana de real constant del elemento SOLID65	63
Figura 4.6. Ventana donde se define el criterio de falla de Willam y Warnke que emplea el elemento SOLID65	64
Figura 4.7. Idealización del refuerzo discreto en ANSYS (Tavarez, 2001)	65
Figura 4.8. Elemento LINK180 (ANSYS Inc., 2009)	66

Figura 4.9. Método iterativo de Newton – Raphson (2 incrementos de carga) (ANSYS Inc., 2009)	67
Figura 4.10. Definición de los pasos de aplicación de las cargas para los modelos generados	68
Figura 5.1. Esquema que resume la generación de modelos de elementos finitos llevada a cabo	69
Figura 5.2. Losas ensayadas a) Geometría b) Armadura para la losa LT3 (Isla, 2008)	71
Figura 5.3. Montaje de las losas para su ensayo experimental (Isla, 2008).....	71
Figura 5.4. a) Curva tensión – deformación empleada para la generación de los modelos de las losas LT1, LT2 y LT3 b) Ampliación de la rama en tracción	73
Figura 5.5. Definición de la geometría, condiciones de borde y cargas impuestas para la generación de los modelos LT1, LT2 y LT3 a) Definición de simetría b) Desplazamiento aplicado en Z c) Restricción de grados de libertad en X, Y y Z d) Restricción de desplazamiento en Y e) Restricción de desplazamiento en X	74
Figura 5.6. Generación de la malla de elementos finitos para la armadura de refuerzo a) Armadura para LT1, $\emptyset 10c/10cm$ b) Armadura para la losa LT3, $\emptyset 10c/5cm$	75
Figura 5.7. Modelo tridimensional de las losas de hormigón armado	76
Figura 5.8. Geometría y detalle de armadura por tracción correspondiente a la losa LC15 (Cheng y Parra, 2010)	77
Figura 5.9. Montaje de laboratorio losa LC15 (Cheng y Parra, 2010)	78
Figura 5.10. Geometría y detalle de armadura por tracción correspondiente a la losa LC10 (Higashiyama <i>et al</i> , 2011).....	79
Figura 5.11. Ensayo de laboratorio losa LC10 (Higashiyama <i>et al</i> , 2011).....	79
Figura 5.12. Ramas en compresión y en tracción de la curva tensión – deformación empleada para los modelos de las losas LC10, LC14 y LC18	82
Figura 5.13. Ramas en compresión y en tracción de la curva tensión – deformación empleada para el modelo de la losa LC15.....	82

Figura 5.14. Geometría y condiciones de borde para los modelos de los elementos finitos de las losas LC10, LC14 y LC18	83
Figura 5.15. Vista espacial de la definición de la geometría, condiciones de borde y cargas impuestas para la generación de los modelos LC10, LC14 y LC18.....	84
Figura 5.16. Vista en planta del detalle de la geometría y del refuerzo para la generación de los modelos LC10, LC14 y LC18	85
Figura 5.17. Vista frontal del detalle de la geometría y del refuerzo para la generación de los modelos LC10, LC14 y LC18.....	85
Figura 5.18. Geometría, condiciones de borde y cargas impuestas para la generación del modelo LC15	86
Figura 5.19. Vista espacial de la definición de la geometría, condiciones de borde y cargas impuestas para la generación del modelo LC15	87
Figura 5.20. Consideraciones para los grupos de modelos de elementos finitos empleados para realizar el estudio numérico	88
Figura 5.21. Rama en compresión de las curvas tensión – deformación generadas para el hormigón reforzado con fibras de acero considerando diferentes porcentajes de adición de fibras (ver anexo 3)	89
Figura 5.22. Rama en tracción de las curvas tensión – deformación generadas para el hormigón reforzado con fibras de acero considerando diferentes porcentajes de adición de fibras (ver anexo 3)	89
Figura 6.1. Curvas carga – desplazamiento obtenidas para la losa LT1	97
Figura 6.2. Curvas carga – desplazamiento obtenidas para la losa LT2.....	97
Figura 6.3. Curvas carga – desplazamiento obtenidas para la losa LT3.....	98
Figura 6.4. Patrón de agrietamiento para la losa LT1 a) Resultado experimental b) Resultado numérico	100
Figura 6.5. Patrón de agrietamiento para la losa LT2 a) Resultado experimental b) Resultado numérico	100

Figura 6.6. Patrón de agrietamiento para la losa LT3 a) Resultado experimental b) Resultado numérico	101
Figura 6.7. Resultados obtenidos para la losa LC10	104
Figura 6.8. Resultados obtenidos para la losa LC14.....	104
Figura 6.9. Resultados obtenidos para la losa LC15	105
Figura 6.10. Resultados obtenidos para la losa LC18	105
Figura 6.11. Resultados obtenidos para las losas HRFA1-20-1, HRFA1-40-1, HRFA1-60-1, HRFA1-80-1 pertenecientes al grupo 1	109
Figura 6.12. Resultados obtenidos para las losas HRFA2-20-1, HRFA2-40-1, HRFA2-60-1, HRFA2-80-1 pertenecientes al grupo 1	109
Figura 6.13. Resultados obtenidos para las losas HRFA3-20-1, HRFA3-40-1, HRFA3-60-1, HRFA3-80-1 pertenecientes al grupo 1	110
Figura 6.14. Resultados obtenidos para las losas HRFA1-20-2, HRFA1-40-2, HRFA1-60-2, HRFA1-80-2 pertenecientes al grupo 2	111
Figura 6.15. Resultados obtenidos para las losas HRFA2-20-2, HRFA2-40-2, HRFA2-60-2, HRFA2-80-2 pertenecientes al grupo 2	111
Figura 6.16. Resultados obtenidos para las losas HRFA3-20-2, HRFA3-40-2, HRFA3-60-2, HRFA3-80-2 pertenecientes al grupo 2	112
Figura 6.17. Resultados obtenidos para las losas HRFA1-20-3, HRFA1-40-3, HRFA1-60-3, HRFA1-80-3 pertenecientes al grupo 3	113
Figura 6.18. Resultados obtenidos para las losas HRFA2-20-3, HRFA2-40-3, HRFA2-60-3, HRFA2-80-3 pertenecientes al grupo 3	113
Figura 6.19. Resultados obtenidos para las losas HRFA3-20-3, HRFA3-40-3, HRFA3-60-3, HRFA3-80-3 pertenecientes al grupo 3	114
Figura 6.20. Representación gráfica de los resultados de la tabla 6.9	117
Figura 6.21. Representación gráfica de los resultados de la tabla 6.10	118

Figura 6.22. Representación gráfica de los resultados de la tabla 6.11	118
Figura 6.23. Representación gráfica de los resultados de la tabla 6.12	121
Figura 6.24. Representación gráfica de los resultados de la tabla 6.13	121
Figura 6.25. Representación gráfica de los resultados de la tabla 6.14	122
Figura 6.26. Diagrama de dispersión y ajuste no lineal de los resultados presentados en las tablas 6.12 a 6.14	123

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Propiedades de los materiales y de las fibras empleadas.....	10
Tabla 2.2. Geometría de los modelos, propiedades de los materiales y resultados obtenidos	12
Tabla 2.3. Geometría de los modelos, propiedades de los materiales y resultados obtenidos	14
Tabla 5.1. Detalle del armado y de las propiedades mecánicas de las losas de hormigón armado.....	72
Tabla 5.2. Detalle del armado y de las propiedades mecánicas de las losas de hormigón armado reforzado con fibras de acero LC10, LC14, LC15 y LC18	80
Tabla 5.3. Características de las fibras de acero utilizadas.....	81
Tabla 5.4. Características de las fibras de acero utilizadas en los modelos generados.....	90
Tabla 5.5. Determinación del refuerzo disperso equivalente $\bar{\rho}_s$, determinando la resistencia residual a tracción del HRFA por medio de la expresión (3.46) propuesta por Huang V.Z. (1995).....	90
Tabla 5.6. Determinación del refuerzo disperso equivalente $\bar{\rho}_s$, determinando la resistencia residual a tracción del HRFA por medio de la expresión (3.47) propuesta por DAfStB (2012).....	91
Tabla 5.7. Modelos de losas de hormigón armado reforzado con fibras de acero pertenecientes al grupo 1	92
Tabla 5.8. Modelos de losas de hormigón armado reforzado con fibras de acero pertenecientes al grupo 2	93
Tabla 5.9. Modelos de losas de hormigón armado reforzado con fibras de acero pertenecientes al grupo 3	94
Tabla 6.1. Cargas últimas de punzonamiento para las losas LT1, LT2 y LT3	98

Tabla 6.2. Diferencia entre las cargas de punzonamiento experimentales y las obtenidas analíticamente para las losas LT1, LT2 y LT3	99
Tabla 6.3. Resumen del refuerzo disperso equivalente para las losas LC10, LC14, LC15 y LC18; conforme a las modalidades “a”, “b”, “c” y “d”	103
Tabla 6.4. Resumen de las cargas de punzonamiento obtenidas para las losas LC10, LC14, LC15 y LC18	106
Tabla 6.5. Resumen del error relativo porcentual entre las cargas de punzonamiento experimentales y las obtenidas numéricamente para cada modalidad.....	107
Tabla 6.6. Resumen de las cargas de punzonamiento obtenidas a partir de las figuras 6.11 a 6.13.....	110
Tabla 6.7. Resumen de las cargas de punzonamiento obtenidas a partir de las figuras 6.14 a 6.16.....	112
Tabla 6.8. Resumen de las cargas de punzonamiento obtenidas a partir de las figuras 6.17 a 6.19.....	114
Tabla 6.9. Resumen de las cargas de punzonamiento para los modelos con armadura $\emptyset 8c/10cm$ y comparación con los resultados obtenidos analíticamente	116
Tabla 6.10. Resumen de las cargas de punzonamiento para los modelos con armadura $\emptyset 10c/10cm$ y comparación con los resultados obtenidos analíticamente.....	116
Tabla 6.11. Resumen de las cargas de punzonamiento para los modelos con armadura $\emptyset 10c/5cm$ y comparación con los resultados obtenidos analíticamente	117
Tabla 6.12. Incremento producido en la carga de punzonamiento, por la adición de fibras de acero en las losas con armadura $\emptyset 8c/10cm$	119
Tabla 6.13. Incremento producido en la carga de punzonamiento, por la adición de fibras de acero en las losas con armadura $\emptyset 10c/10cm$	120
Tabla 6.14. Incremento producido en la carga de punzonamiento, por la adición de fibras de acero en las losas con armadura $\emptyset 10c/5cm$	120

Tabla 7.1. Incrementos porcentuales promedio de la carga de punzonamiento en función del volumen de fibras añadido	125
--	-----

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. MOTIVACIÓN

Las ventajas arquitectónicas que brinda un entrepiso de hormigón armado sin vigas y sin ábacos ni capiteles en el proyecto de edificios para oficinas, plantas industriales y estacionamientos ha incrementado el uso de esta tipología estructural en la construcción actual. Debido esto no solo al agradable aspecto que producen, sino también al ahorro generado en la etapa de construcción pues es requerido menos tiempo para las tareas de encofrado y de preparación de armadura de refuerzo, pues si bien los ábacos y capiteles cumplen una función estructural importante, requieren tiempo y recursos para su ejecución y absorben espacio que resta funcionalidad al ambiente.

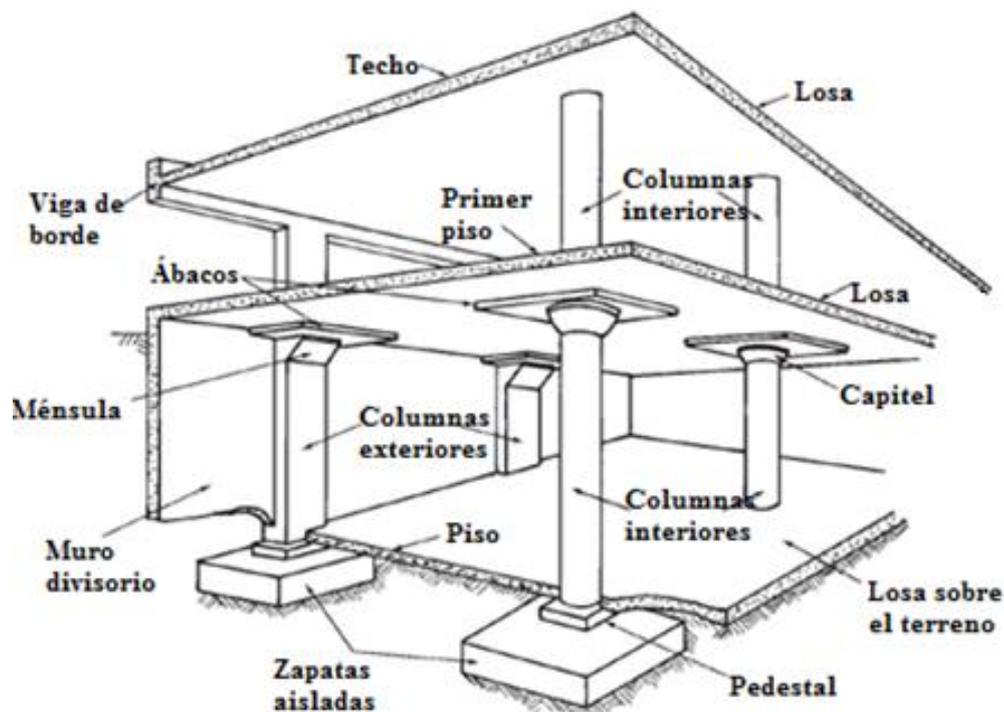


Figura 1.1: Comparación entre un entrepiso sin vigas provisto de ábacos y capiteles; y uno sin ábacos ni capiteles (MacGregor, 2012).

En la figura 1.1 se muestra lo agradable que resulta un entrepiso sin vigas desprovisto de interferencias visuales frente a uno convencional (con ábacos y capiteles).

Es importante indicar que el prescindir de ábacos y capiteles debe responder a un criterio estructural más que a necesidades del tipo estéticas, siendo el criterio estructural la resistencia del entrepiso de hormigón armado al esfuerzo cortante bidireccional denominado punzonamiento, el cual no puede ser pasado por alto sin el constante riesgo de que se produzca el colapso de la estructura.

Desde principios del siglo XX, la industria de la construcción emplea entrepisos de hormigón armado sin vigas y los códigos de diseño indican las medidas estructurales que deben asumirse en caso de prescindir de ábacos y capiteles, siendo estas medidas la provisión de armadura adicional para absorber el esfuerzo cortante en las losas, ya sea en forma de estribos o perfiles metálicos dispuestos en la unión losa – columna, pudiendo también incrementarse el espesor de los entrepisos lo que lleva a soluciones poco económicas.

Desde mediados de los años cincuenta (del siglo XX), la adición de fibras de acero de tamaño reducido esparcidas de manera aleatoria en una matriz de hormigón simple, dio origen a un nuevo tipo de material, denominado hormigón reforzado con fibras de acero (HRFA). Las grandes virtudes del hormigón reforzado con fibras de acero radican en su mayor ductilidad a compresión y mayor resistencia a tracción frente al hormigón normal, indicando también que tiene una gran capacidad de absorber energía de fractura.

Teniendo presentes las virtudes del HRFA y la característica falla del tipo frágil que presenta un entrepiso de hormigón armado sin vigas, ábacos ni capiteles cuando falla por punzonamiento, surge el interés de emplear el HRFA en estos entrepisos, con la finalidad de obtener mayor resistencia a los esfuerzos cortantes, evitar fallas del tipo frágil y proporcionar una alternativa a la utilización de ábacos y capiteles.

Es de esta forma que surge la importancia de conocer el comportamiento estructural de estos entrepisos conformados por HRFA, que motivó la realización de esta investigación; más aún, empleando técnicas computacionales que es la tendencia actual en el campo de la ingeniería estructural.

1.2. IMPORTANCIA DEL PROBLEMA

Si bien el hormigón reforzado con fibras de acero hizo su aparición a mediados de los años cincuenta del pasado siglo XX, a partir de lo cual empezó su estudio por parte de numerosos

investigadores; su utilización como material base para la construcción de elementos estructurales no está difundida, contándose a la fecha con experiencias de su empleo en la construcción de pavimentos rígidos y tableros de puentes.

En lo que respecta al objeto de esta investigación que es el punzonamiento en losas de hormigón armado reforzadas con fibras de acero, se cuenta únicamente en la literatura técnica con información de ensayos de laboratorio realizados en prototipos, a partir de los cuales los investigadores proponen expresiones empíricas para la determinación de la carga crítica de punzonamiento. Hasta la fecha no se llegó a un consenso referente a la validez de las expresiones empíricas planteadas, pero teniendo como guía al CEB – FIP Model Code 2010 (CEB-FIP, 2013) que incluye comentarios respecto al hormigón armado reforzado con fibras de acero y en lo referente al punzonamiento en losas, indica que la resistencia con la que se cuenta es la proporcionadas por la acción conjunta del hormigón, la armadura adicional por cortante y las fibras de acero de refuerzo, pero se sigue teniendo la incertidumbre de la magnitud del aporte de las fibras de acero.

Es así que el principal problema que se encuentra, es la falta de conocimiento del comportamiento mecánico del hormigón armado reforzado con fibras de acero, sometido a cargas puntuales que provocan punzonamiento (como en el caso de un entrepiso sin vigas); debido esto a su complejidad y naturaleza no lineal.

Este problema trae como consecuencia la no utilización de las fibras de acero como refuerzo de entrepisos sin vigas (sin ábacos ni capiteles); no aprovechando las virtudes del HRFA ni pudiendo avanzar en el conocimiento de la resistencia al cortante en las losas de hormigón.

1.3. ALCANCE DE LA TESIS

El enfoque de este proyecto de investigación es numérico – computacional, pero se realizan comparaciones con resultados experimentales (obtenidos por otros investigadores) con el objeto de validar los modelos realizados.

Los materiales analizados son hormigón simple de resistencia normal, acero de refuerzo de dureza natural empleado en elementos de hormigón armado y hormigón reforzado con fibras

de acero, siendo estas con ganchos en sus extremos. El comportamiento mecánico que se asigna a los materiales depende de su naturaleza.

Se considera únicamente cargas estáticas y la acción de la fuerza de gravedad (peso propio), no habiendo sido considerados efectos térmicos ni presfuerzo.

1.4. OBJETIVOS

a) Objetivo general

Determinar la carga crítica de punzonamiento en losas de hormigón armado reforzado con fibras de acero, sin ábacos ni capiteles; con la finalidad de conocer su comportamiento mecánico bajo cargas similares a las que soporta un entrepiso sin vigas, prestando particular atención a su resistencia a los esfuerzos cortantes.

b) Objetivos específicos

- Generar modelos de elementos finitos de losas de hormigón armado ensayadas en laboratorio con la finalidad de comparar las cargas de punzonamiento determinadas numéricamente con las obtenidas experimentalmente.
- Incluir el efecto del refuerzo de fibras de acero en los modelos generados, para apreciar su influencia con respecto a la resistencia al corte por punzonamiento.
- Verificar la sensibilidad de la relación existente entre la carga de punzonamiento y la cantidad de fibras de acero añadidas, como así también el efecto de la distribución del volumen de las mismas.
- Contrastar los resultados obtenidos por medio de los modelos de elementos finitos, con los obtenidos experimentalmente.

1.5. METODOLOGÍA

Fue empleado el programa computacional de elementos finitos ANSYS para generar los modelos de las losas de hormigón armado reforzado con fibras de acero. Este programa dispone en su librería, de elementos que han sido concebidos para modelar materiales cuasi – frágiles como el hormigón, como así también el acero de refuerzo a tracción.

Se empieza el estudio, generando modelos de elementos finitos de losas de hormigón armado y de hormigón armado reforzado con fibras de acero, que fueron ensayadas en laboratorio por otros investigadores con el fin de estudiar el punzonamiento en las mismas.

Una vez que los resultados obtenidos numéricamente fueron validados por los obtenidos experimentalmente, se procedió a incluir en los modelos de losas de hormigón armado, el efecto del refuerzo de fibras de acero por medio del modelo de Huang (Huang V.Z., 1995).

La adición de las fibras de acero fue realizada con la finalidad de apreciar el efecto que ejercen sobre la resistencia al punzonamiento de las losas y con este fin se realizó un análisis de sensibilidad haciendo variar el volumen de fibras añadido y su distribución en tres direcciones ortogonales.

Finalmente, los resultados obtenidos son plasmados en forma de curvas carga – desplazamiento, de las cuales se obtienen las cargas de punzonamiento para cada caso. Estas cargas son comparadas y analizadas permitiendo llegar a conclusiones referentes a la efectividad de la adición de fibras de acero en el problema del punzonamiento de losas de hormigón.

1.6. CONTENIDO DE LA TESIS

El presente proyecto de investigación está conformado por una introducción, estado del arte, metodología, resultados, discusión y anexos (ver figura 1.2).

La introducción comprende el capítulo 1, en el cual se indica la motivación, problema a resolver, alcances y objetivos de esta investigación.

El estado del arte está constituido por el capítulo 2, donde se empieza con una explicación en detalle del fenómeno del punzonamiento en losas de hormigón armado siguiendo a esto, una revisión de la literatura actual referente a estudios experimentales, al análisis numérico computacional y a estudios analíticos del punzonamiento en losas de hormigón armado reforzado con fibras de acero.

La metodología engloba los capítulos 3, 4 y 5; explicándose en el capítulo 3 la caracterización mecánica que se realiza por medio de ANSYS, de materiales tales como el hormigón simple, el acero de dureza natural empleado como refuerzo a tracción en elementos de hormigón armado y finalmente del hormigón reforzado con fibras de acero. Esto con la intención de facilitar la

compresión referente a la generación de modelos de elementos finitos tanto para hormigón armado como para hormigón armado reforzado con fibras de acero.

En el capítulo 4, se realiza una descripción de los elementos finitos de la biblioteca de ANSYS que fueron empleados para la generación de los modelos, como así también el procedimiento numérico aplicado para obtener la solución del problema.

En base a lo indicado en los capítulos 3 y 4, son presentados en el capítulo 5 los modelos de elementos finitos generados para losas planas de hormigón armado y de hormigón armado reforzado con fibras de acero, determinándose de forma numérica las cargas de punzonamiento de cada modelo.

Los resultados de este proyecto, son presentados en el capítulo 6, donde se realiza el análisis, discusión y contraste de los mismos.

Al final del proyecto, son presentados los anexos donde se incluyen resultados complementarios útiles para la comprensión de los resultados obtenidos y de las conclusiones a las que se arribó.

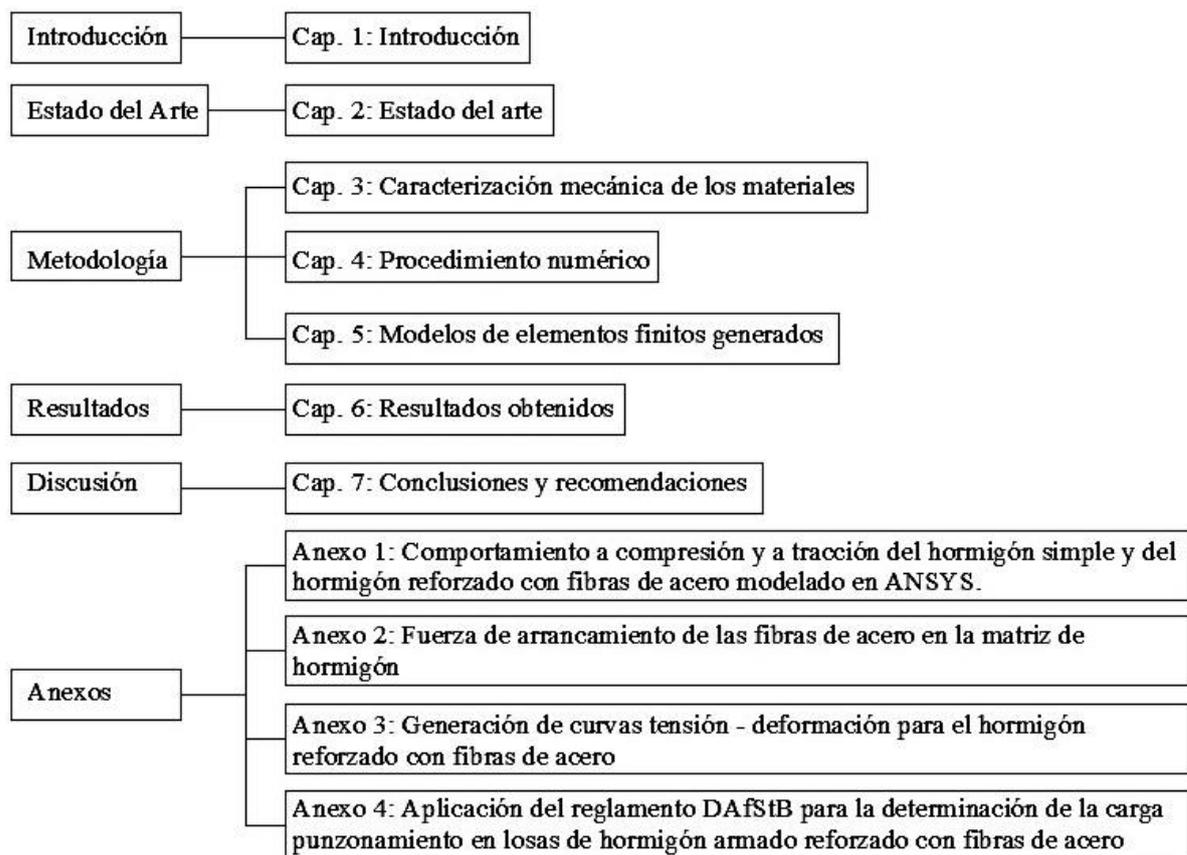


Figura 1.2: Esquema de la conformación del presente proyecto de investigación.

CAPITULO 2

ESTADO DEL ARTE

2.1. INTRODUCCIÓN

El punzonamiento en entrepisos sin vigas de hormigón armado, es el esfuerzo cortante de penetración que provoca su colapso. La falla se ubica alrededor de la carga concentrada que incide sobre la losa y por efecto del mencionado esfuerzo, la falla se produce como una fisura diagonal en las proximidades de la unión losa – columna, formándose una superficie de cono o pirámide truncada alrededor de la columna (Möller, 2004).

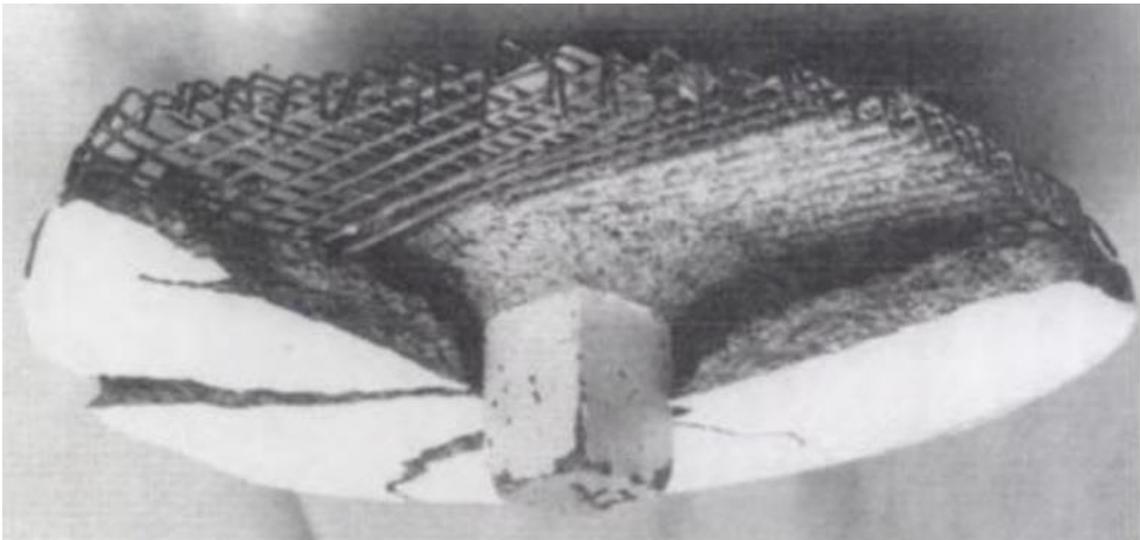


Figura 2.1: Especímen de una conexión losa - columna de hormigón armado, después de la falla por punzonamiento (Park y Gamble, 2000).

En la figura 2.1 se puede apreciar el patrón de agrietamiento y la formación de la superficie de falla alrededor de la unión losa – columna, de una losa que fallo por punzonamiento.

En lo que respecta al estudio del punzonamiento en losas de hormigón armado reforzado con fibras de acero, la forma en la que se estudia este problema es similar a la empleada en las losas de hormigón armado sin adición de fibras. Se considera que la resistencia al punzonamiento de una losa de este tipo, es igual a la suma de las resistencias que aportan los componentes; como

ser el hormigón reforzado con fibras de acero, la armadura de refuerzo por tracción de la losa y la armadura adicional para absorber esfuerzos cortantes (si es que la misma es empleada).

El aporte de resistencia realizado por el hormigón reforzado con fibras de acero, se puede descomponer en los aportes realizados tanto por el hormigón simple como por las fibras de acero (CEB-FIP, 2013).

Como resultado de la revisión de la literatura referente al estudio del punzonamiento en losas de hormigón armado reforzado con fibras de acero, se pudo apreciar que los investigadores dedicados a este tema, emplean principalmente estudios experimentales. Sin embargo, el empleo de métodos numérico - computacionales para estudiar este problema toma cada vez más fuerza.

En los estudios experimentales, los investigadores por medio de prototipos y/o modelos ensayados en laboratorio obtienen curvas carga – desplazamiento, a partir de las cuales determinan las cargas de punzonamiento. Estas cargas corresponden a los máximos valores de carga que provocan el colapso de las losas y son identificadas en base a los puntos pico (puntos de inflexión), que separan las curvas en ramas de comportamiento “pre-pico” (endurecimiento), donde el material es capaz de soportar las cargas impuestas y “post-pico” (ablandamiento), donde el material ya tiene daño interno y no es capaz de seguir resistiendo cargas.

A partir de las cargas de punzonamiento obtenidas experimentalmente, los investigadores se concentraron en determinar expresiones analíticas para el cálculo de las mismas por medio de técnicas estadísticas. Los resultados obtenidos hasta la fecha, fueron incluidos en los reglamentos de diseño ACI 544.4R-88 (ACI 544.4R-88, 1999), el CEB FIP MODEL CODE – 2010 (CEB-FIP, 2013) y el DAfStB (DAfStB, 2012).

En los estudios numérico – computacionales que son llevados a cabo por medio de programas comerciales de elementos finitos como ser ANSYS (Ansys Inc, 2009), o a través de la implementación computacional de la teoría de mezclas; puede realizarse la modelación numérica de losas de hormigón armado reforzado con fibras de acero, reproduciéndose los ensayos experimentales y obtener curvas carga – desplazamiento y cargas de punzonamiento de las losas modeladas.

2.2. APORTES REALIZADOS POR OTROS INVESTIGADORES

Si bien el enfoque de este trabajo de investigación es numérico – computacional, es imperioso contar con resultados experimentales que permitan generar modelos de calibración y contar con una base de datos de referencia que nos permita analizar los resultados obtenidos y sacar conclusiones a partir de los mismos. También resulta importante conocer el grado de exactitud de las expresiones analíticas proporcionadas por los reglamentos de diseño estructural, de forma tal que sea posible comparar las cargas de punzonamiento obtenidas por medio de estas expresiones con las obtenidas mediante modelación numérica.

Por lo indicado precedentemente, en este apartado se resumirán los aportes realizados por los investigadores que estudiaron el punzonamiento en losas de hormigón armado reforzado con fibras de acero, tanto por medios experimentales, numérico – computacionales o por medio de expresiones analíticas presentadas en los reglamentos de diseño de estructuras de hormigón armado; indicando también los aportes realizados en la caracterización del hormigón reforzado con fibras de acero por medio del programa computacional de elementos finitos ANSYS (ver figura 2.2).

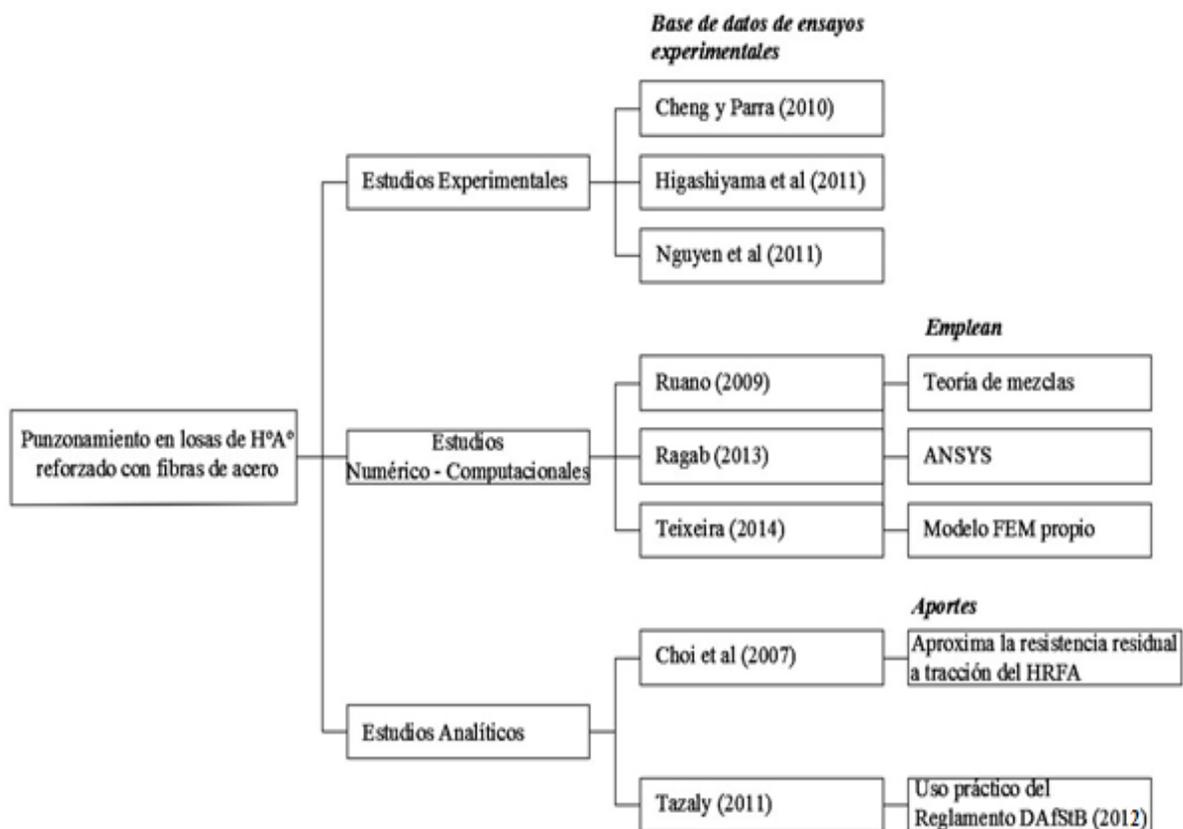


Figura 2.2: Resumen de los aportes realizados por otros investigadores

2.2.1. Estudios experimentales

a) Cheng y Parra (2010)

Estos investigadores ensayaron experimentalmente un grupo de 10 losas de hormigón armado reforzado con fibras de acero. Las dimensiones de las mismas fueron 15x150x150 cm, estando provistas de armadura por tracción $\varnothing 13/10\text{ cm}$ ($\rho = 0.83\%$) en unos casos y en otros $\varnothing 13/15\text{ cm}$ ($\rho = 0.56\%$). El detalle de las propiedades mecánicas de los materiales de estas losas se presenta en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Propiedades de los materiales y de las fibras empleadas (Cheng y Parra, 2010).

Especimen	Hormigón		Fibras de acero			Barras de acero		
	Material	f'_c [MPa]	Tipo de fibra (V_f)	L_f (d_f) [mm]	f_u [MPa]	ρ [%]	f_y [MPa]	f_u [MPa]
S1	H°A°	47.7	-----	-----	-----	0.83	471	697
S2						0.56		
S3	FRC	25.4	C/ganchos (1%)	30 (0.55)	1100	0.83	455	670
S4						0.56		
S5	FRM	59.3	Curvada (1.5%)	35 (0.5)	1800	0.83	471	689
	H°A°	45.7	-----	-----	-----			
S6	FRM	57.9	Curvada (1.5%)	35 (0.5)	1800	0.56	471	689
	H°A°	35.0	-----	-----	-----			
S7	FRC	31.0	C/ganchos (1.5%)	30 (0.55)	1100	0.83	449	681
S8						0.56		
S9	FRC	46.1	C/ganchos (1.5%)	30 (0.38)	2300	0.83	449	681
	H°A°	40.7	-----	-----	-----			
S10	FRC	59.1	C/ganchos (1.5%)	30 (0.38)	2300	0.56	449	681
	H°A°	50.6	-----	-----	-----			

FRC: Hormigón reforzado con fibras f'_c : Resistencia cilíndrica compresión f_u : Resistencia última a tracción
 FRM: Mortero reforzado con fibras f_y : Límite de fluencia L_f : Longitud de la fibra
 D_f : Diámetro de la fibra ρ : Cuantía de la armadura de refuerzo V_f : Volumen de adición de fibras
 $\rho = 0.83\%$ Armadura $\varnothing 13c/10\text{ cm}$ $\rho = 0.56\%$ Armadura $\varnothing 13c/15\text{ cm}$ H°A°: Hormigón armado (sin fibras)

Entre las losas indicadas en la tabla 2.1, se destacan la S3 y la S4, que son bastante similares a las empleadas en el estudio numérico de esta tesis; diferenciándose en la menor longitud y menor diámetro de sus fibras. Cabe indicar que la losa S4 fue empleada para realizar tareas de calibración (ver apartado 5.2.2 de capítulo 5). Los resultados obtenidos por estos investigadores son plasmados en las curvas carga – desplazamiento que son presentadas en la figura 2.3.

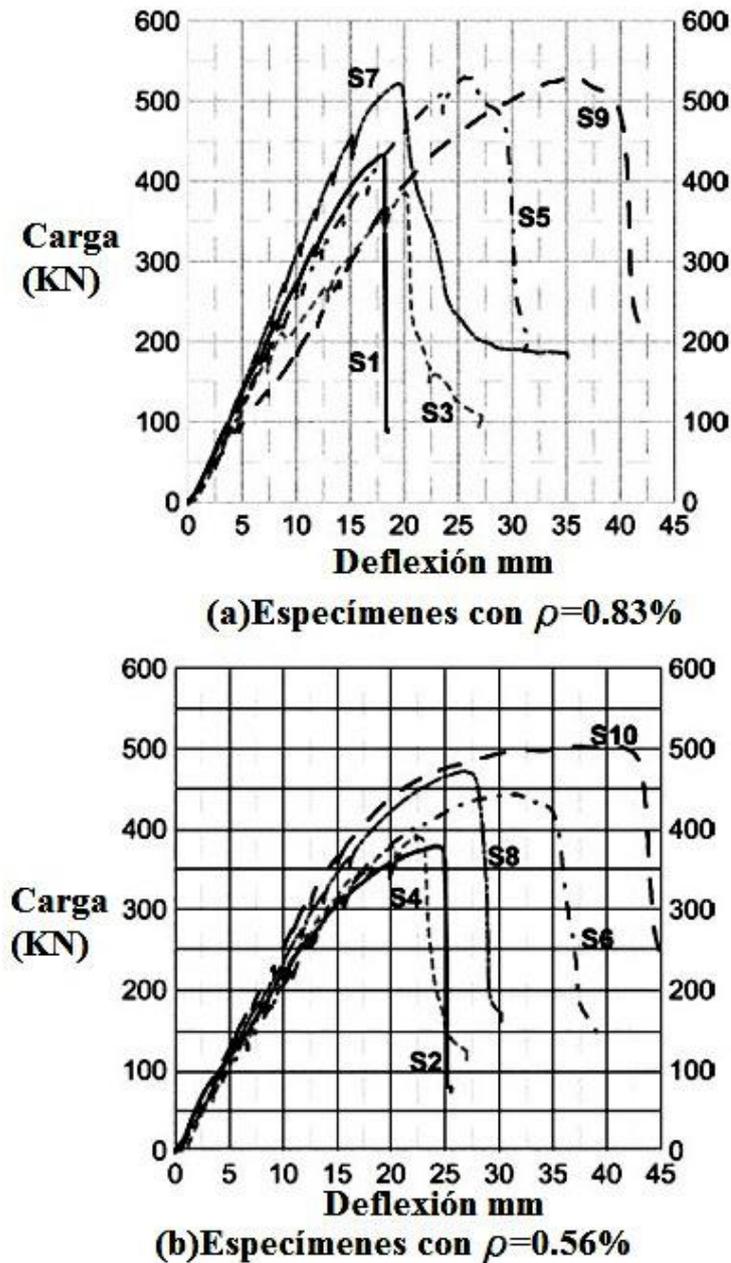


Figura 2.3: Curvas carga – desplazamiento obtenidas para las losas de la tabla 2.1 (Cheng y Parra, 2010).

Entre las conclusiones a las que arribaron Cheng y Parra (2010), puede mencionarse:

- 1.- La adición de fibras de acero incrementa la carga de punzonamiento y la capacidad de deformación de las losas en las que son incorporadas.
- 2.- El uso de fibras de acero, puede cambiar la falla de frágil a dúctil.
- 3.- Es posible adicionar fibras de acero solamente a la unión losa – columna, en un área comprendida por dos veces la altura útil de las losas; medida esta distancia a partir de las caras de las columnas. Esta iniciativa fue aplicada a las losas S6, S9 y S10 (ver tabla 2.1) cuyas

resistencias a compresión uniaxial son 57.9, 46.1 y 59.1 MPa. Estas resistencias son bastante altas y podría entenderse que para resistencias a compresión de esta índole, podría ser suficiente mejorar el comportamiento mecánico de la unión losa – columna y no de toda la losa.

Las conclusiones que se mencionan son de utilidad, pues demuestran que la adición de fibras de acero es un instrumento eficaz para absorber esfuerzos cortantes en las losas de hormigón armado. A pesar de esto, se encuentran los siguientes aspectos negativos, los cuales serán tomados en cuenta en el estudio numérico a realizar:

- 1.- El limitado rango de adición de fibras que realiza, 1% y 1.5%; dejando de lado adiciones de fibras menores como ser entre 0.25% y 1% cuyo uso es más frecuente.
- 2.- La fragilidad del comportamiento post pico que se puede apreciar en la figura 2.3.

b) Nguyen *et al* (2011)

Nguyen *et al* (2011) estudiaron experimentalmente el punzonamiento en losas de hormigón armado reforzado con fibras de acero, pero las resistencias a compresión uniaxial del hormigón que emplearon en sus prototipos estuvo en el rango de 26 a 30 MPa (ver tabla 2.2). Utilizaron fibras con ganchos de 60 mm de longitud, 0.75 mm de diámetro, 1100 MPa de límite de fluencia y 200 GPa de módulo de elasticidad. Como refuerzo a tracción de sus prototipos emplearon barras de acero conformado de 10 mm de diámetro.

Tabla 2.2. Geometría de los modelos, propiedades de los materiales y resultados obtenidos (Nguyen *et al*, 2011).

Losas	Dimensiones [mm]	D [mm]	V_f [Kg/m ³]	$f_{c,cube}$ [MPa]	V_u [KN]	δ_u [mm]
A0	900x900x125	105	0	27.1	284	4.12
A1		105	30	27.9	330	5.45
A2		105	45	29.2	345	6.82
A3		105	60	31.6	397	6.71
B0	1200x1200x125	105	0	27.1	301	11.71
B1		105	30	27.9	328	23.21
B2		105	45	29.2	337	13.13
B3		105	60	31.6	347	14.04
C0	1500x1500x125	105	0	27.1	264	22.05
C1		105	30	27.9	307	23.63
C2		105	45	29.2	310	23.10
C3		105	60	31.6	326	26.52

Los resultados obtenidos por Nguyen *et al* (2011), hacen hincapié en la relación existente entre el volumen de fibras de acero adicionado y la resistencia al punzonamiento de las losas ensayadas tal como se aprecia en las curvas carga – desplazamiento mostradas en la figura 2.4.

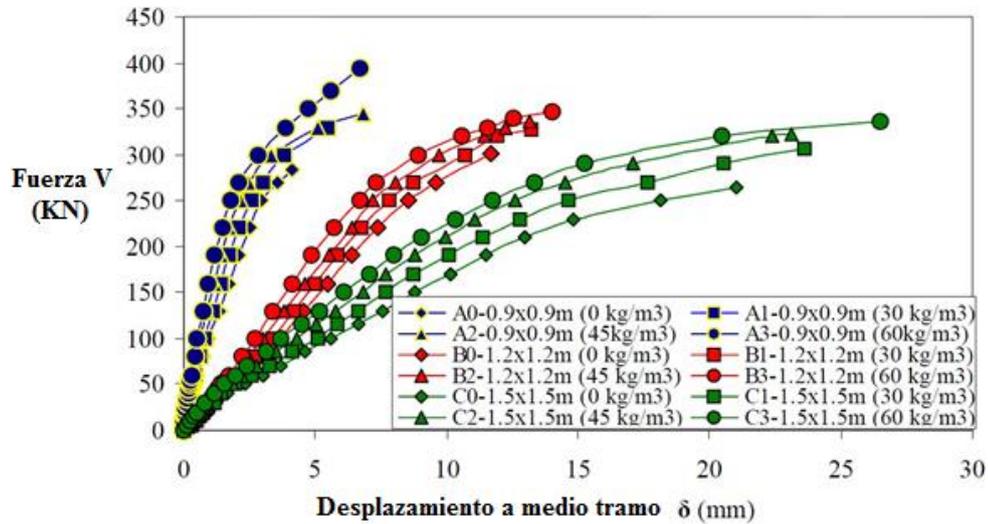


Figura 2.4: Curvas carga – desplazamiento obtenidas para los modelos de la tabla 2.2 (Nguyen *et al*, 2011).

Entre los resultados más relevantes podemos destacar que la adición de fibras de acero incrementa considerablemente las cargas de punzonamiento de las losas; para volúmenes de adición de fibras entre 30 y 60 Kg/m³ las cargas de punzonamiento se incrementan desde 9 hasta un 39.8% (ver figura 2.5), siendo este incremento directamente proporcional al volumen de fibras añadido. También determinaron que la adición de fibras de acero reduce el ancho de las grietas por tracción en aproximadamente un 70.8%.

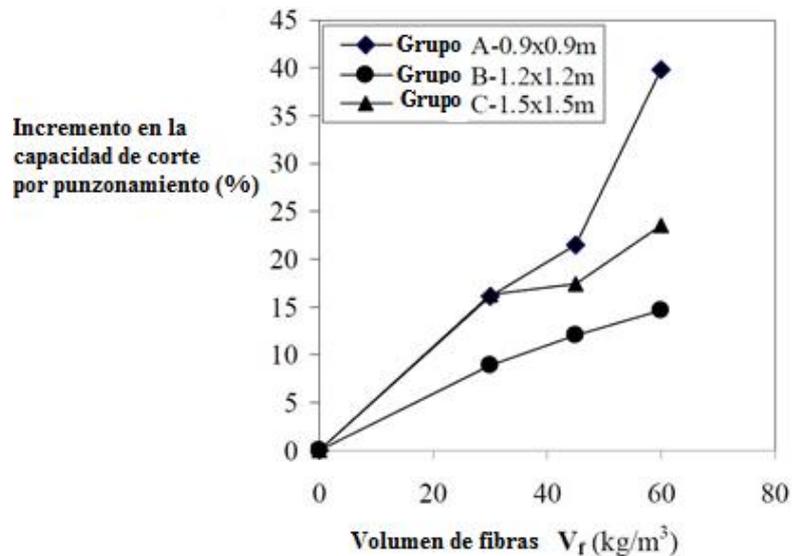


Figura 2.5: Relación entre el volumen de fibras adicionadas y el incremento porcentual de la carga de punzonamiento (Nguyen *et al*, 2011).

Lo destacable de los resultados a los que arribaron Nguyen *et al* (2011), radica en indicar un porcentaje en el cual la adición de fibras de acero incrementa la carga de punzonamiento de las losas a las cuales fueron añadidas, lo cual podría ser empleado con fines de diseño.

Este resultado es de bastante utilidad; ya que las losas que ensayaron estos investigadores son muy similares a las empleadas en nuestro medio. La figura 2.5 permite apreciar, que en los resultados obtenidos por Nguyen *et al* (2011) no hay una relación directa o lineal entre el volumen de fibras adicionado y el incremento porcentual de la carga de punzonamiento.

El trabajo de Nguyen *et al* (2011) es de bastante utilidad, no solo por proporcionar resultados experimentales; sino también que genera la inquietud por saber el tipo de relación entre el volumen de fibras adicionado y el incremento porcentual de la carga de punzonamiento que podría esperarse; siendo este resultado la antesala para la generación de expresiones analíticas para determinar la carga de punzonamiento en losas de hormigón armado reforzado con fibras de acero.

c) Higashiyama *et al* (2011)

Un grupo de investigadores de la sociedad japonesa de ingenieros civiles (JSCE) (Higashiyama *et al*, 2011) ensayaron en laboratorio un grupo de 12 losas de hormigón armado reforzado con fibras de acero con la finalidad de determinar expresiones analíticas para calcular la carga de punzonamiento de estas losas (ver tabla 2.3).

Tabla 2.3. Geometría de los modelos, propiedades de los materiales y resultados obtenidos (Higashiyama *et al*, 2011).

Losas	Espesor [mm]	Altura útil [mm]	Cuantía [%]	V_f [%]	Lado [mm]	Carga [KN]
t100-0.67	100	70	0.75	0.67	1200	137.5
t140-0.67	140	110	0.54	0.67	1200	210.2
t180-0.67	180	150	0.40	0.67	1200	297.6
t100-0.72	100	65	0.91	0.72	1200	140.8
t140-0.72	140	105	0.57	0.72	1200	213.2
t180-0.72	180	145	0.41	0.72	1200	290.7
t100-0.91	100	65	0.91	0.91	1200	120.8
t140-0.91	140	105	0.57	0.91	1200	183.1
t180-0.91	180	145	0.41	0.91	1200	231.2
t100-0.63	100	70	0.85	0.63	1200	152.3
t100-0.94	100	70	0.85	0.94	1200	147.9
t100-1.03	100	70	0.85	1.03	1200	158.9

Las características geométricas y mecánicas de las fibras de acero que se emplearon son las siguientes:

Tipo de fibras: Con ganchos en los extremos.

Longitud: 30 mm.

Diámetro: 0.62 mm.

Límite de fluencia: 1119 MPa.

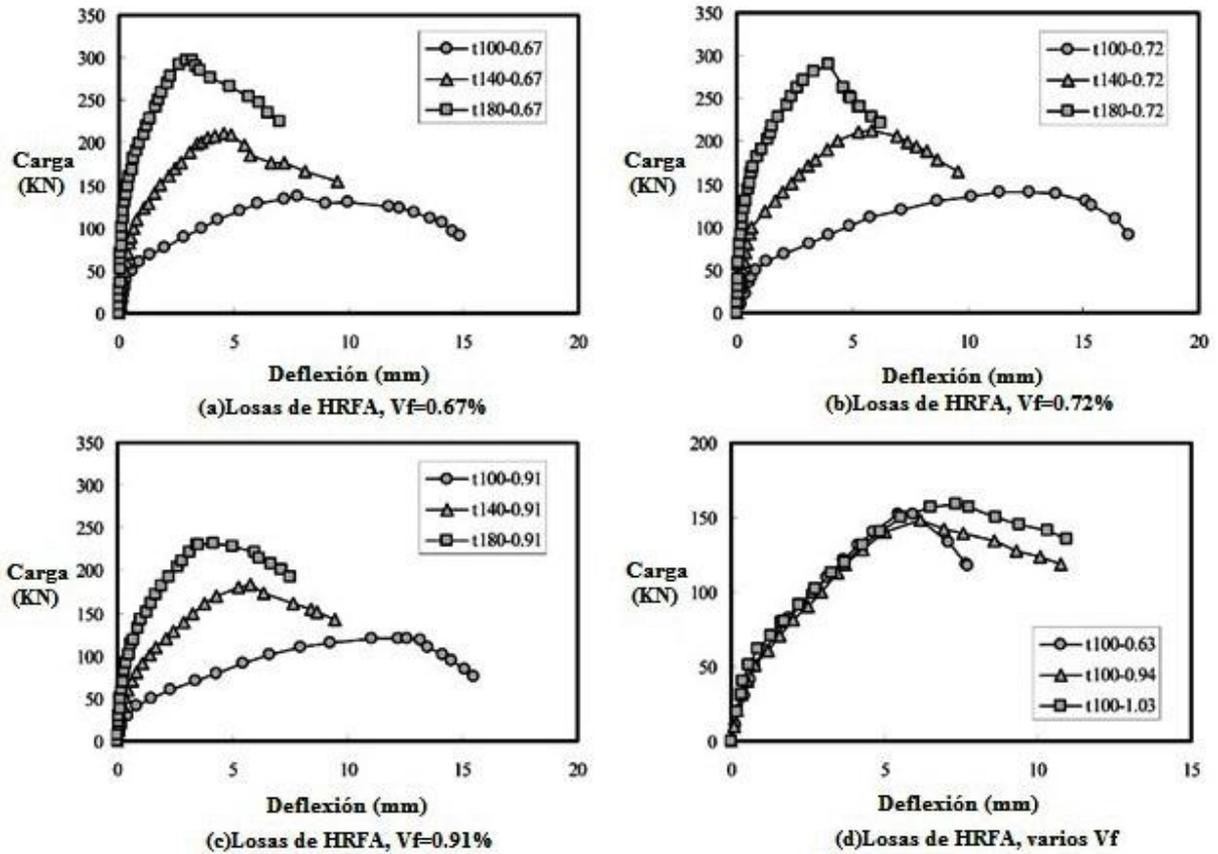


Figura 2.6: Curvas carga – desplazamiento obtenidas para los modelos de la tabla 2.3 (Higashiyama *et al*, 2011).

En la figura 2.6 se muestran las curvas carga – desplazamiento correspondientes a los modelos indicados en la tabla 2.3, destacándose de estas curvas la ductilidad del comportamiento post pico, lo cual permite evidenciar que la adición de fibras de acero es un mecanismo efectivo para absorber esfuerzos cortantes.

Estos investigadores tomaron en cuenta los resultados obtenidos por Narayanan y Darwish (1987) quienes en las expresiones que determinaron, indican que entre los factores que afectan al punzonamiento de estas losas, destacan no solo el volumen de fibras adicionado, sus propiedades mecánicas y la armadura de refuerzo por tracción dispuesta; sino también la

resistencia de la zona en compresión que se encuentra por encima de las grietas inclinadas, las fuerzas de arrancamiento de las fibras a lo largo de las grietas inclinadas y las fuerzas de corte que son absorbidas por el efecto de dovela.

Estos factores no fueron tomados en cuenta por los investigadores citados precedentemente, pudiendo deberse a las limitaciones de las formulaciones numérico computacionales llevadas a cabo o en el caso de los ensayos de laboratorio realizados, por dar mayor prioridad a la relación existente entre el volumen de fibras añadido, las propiedades de las mismas y la carga de punzonamiento obtenida; frente a otros factores que no resultaban muy evidentes a la luz de los datos empleados para los ensayos.

Los resultados obtenidos por Higashiyama *et al* (2011) son de mucha utilidad para esta tesis, ya que las losas t100-0.67, t140-0.67 y t180-0.67 (ver tabla 2.3) son empleadas con fines de ajuste y/o calibración (ver apartado 5.2.2 de capítulo 5). Además, las curvas carga – desplazamiento obtenidas permiten apreciar la ductilidad en el comportamiento post pico que es obtenida por medio de la adición de fibras de acero.

2.2.2. Estudios numérico - computacionales

a) Ruano (2009)

Ruano (2009) estudió el comportamiento de elementos estructurales de hormigón armado reforzado con fibras de acero, para este fin empleó un programa computacional no lineal de elementos finitos de código abierto, al que se le incorporó un modelo para materiales compuestos reforzados con fibras; basado en la teoría de mezclas de materiales ortótropos.

Esta teoría permite considerar el comportamiento simultáneo de todas las fases de un compuesto y a partir de la combinación de los mismos obtener el comportamiento del conjunto. Cada una de las sustancias que conforma el compuesto puede tener una ley constitutiva propia, isótropa o anisótropa.

La teoría de mezclas en su forma clásica, se basa en las siguientes hipótesis (Ruano, 2009):

- En cada volumen infinitesimal del compuesto, participan el conjunto de sustancias componentes.

- Cada componente contribuye en el comportamiento del compuesto en la misma proporción que su participación volumétrica.
- El volumen ocupado por cada componente es menor que el volumen ocupado por el compuesto.
- Todos los componentes poseen la misma deformación (ecuación de cierre o compatibilidad).

Para pequeñas deformaciones, la última hipótesis se escribe como:

$$\varepsilon_{ij} = (\varepsilon_{ij})_1 = (\varepsilon_{ij})_2 = \dots = (\varepsilon_{ij})_n; \quad n = \text{Nro. de componentes.} \quad (2.1)$$

Donde:

ε_{ij} Tensor de deformaciones infinitesimales (de Cauchy) del conjunto.

$(\varepsilon_{ij})_n$ Tensor de deformaciones infinitesimales (de Cauchy) de la n -ésima componente del conjunto.

La energía libre de deformación por unidad de volumen del compuesto puede escribirse como:

$$\Psi(\varepsilon_{ij}, \alpha_i) = \sum_{c=1}^n k_c \Psi_c(\varepsilon_{ij}, \alpha_{ci}) \quad (2.2)$$

Donde:

$\Psi(\varepsilon_{ij}, \alpha_i)$ Energía libre de deformación del compuesto.

$\Psi_c(\varepsilon_{ij}, \alpha_{ci})$ Energía libre de deformación de cada componente.

$k_c = \frac{dV_c}{dV}$ Fracción de volumen de cada componente.

α_i Conjunto de variables internas.

A partir de (2.2) la ecuación constitutiva secante se obtiene por medio de:

$$\sigma_{ij} = \frac{\partial \Psi(\varepsilon_{kl}, \alpha_k)}{\partial \varepsilon_{ij}} = \sum_{c=1}^n k_c \frac{\partial \Psi(\varepsilon_{kl}, \alpha_{kc})}{\partial \varepsilon_{ij}} = \sum_{c=1}^n k_c (\sigma_{ij})_c \quad (2.3)$$

Donde:

σ_{ij} Tensiones del compuesto.

$(\sigma_{ij})_c$ Tensiones de cada componente.

Ruano (2009) incluyó en su trabajo la simulación de losas de hormigón armado reforzado con fibras de acero, cuyo detalle de geometría y malla de elementos finitos son mostrados en la figura 2.7.

A partir de estos modelos se obtuvo las curvas carga – desplazamiento mostradas en la figura 2.8, en la cual se incluyen las curvas experimentales (curva roja) y las numéricas (curva verde) para la losa de H°A° sin adición de fibras que se muestra en la figura 2.7. A su vez la curva en azul muestra los resultados obtenidos numéricamente para esta losa con una adición de 30 Kg de fibras de acero (con ganchos en los extremos) por metro cúbico de hormigón.

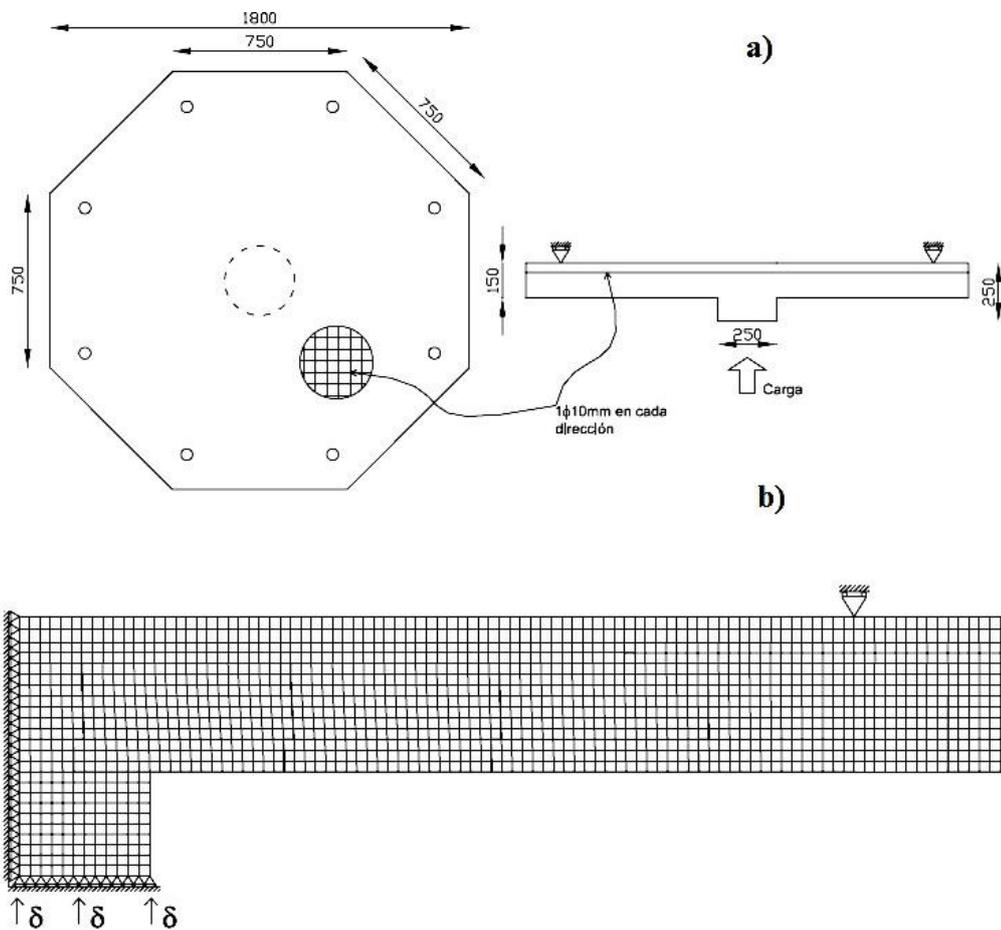


Figura 2.7: Modelos de losas de hormigón armado reforzado con fibras de acero a) Geometría b) Malla de elementos finitos y condiciones de borde (Ruano, 2009).

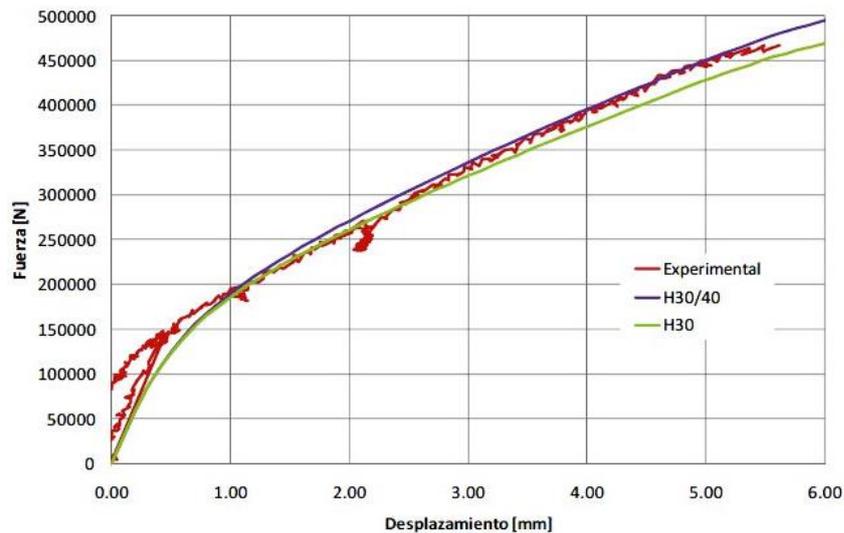


Figura 2.8: Curvas carga – desplazamiento para H°A° simple y con fibras de acero (Ruano, 2009).

Los resultados mostrados en la figura 2.8, nos permiten apreciar que la adición de fibras dotó al material mayor capacidad de absorción de esfuerzos cortantes, pues permite obtener una carga de punzonamiento mayor a la obtenida para el hormigón armado sin fibras.

Los principales aportes realizados por Ruano (2009) son tomar en cuenta la orientación y la proporción de las fibras añadidas y su posible desplazamiento en la matriz de hormigón.

Una limitante que se encuentra en este trabajo, es la formulación de elementos finitos que se realizó, la cual está orientada a modelos planos. Esto restringe su aplicación a modelos doblemente simétricos o con axil simetría, dejando de lado a los modelos tridimensionales y a los asimétricos.

b) Ragab (2013)

Con respecto al punzonamiento en losas de hormigón armado reforzado con fibras de acero empleando programas computacionales de elementos finitos, Ragab (2013) estudió este problema por medio de ANSYS, para lo cual ensayó en laboratorio 3 losas de hormigón armado con adiciones de fibras de acero (con ganchos en los extremos) en el rango de 0 a 0.75%.

A partir de estos ensayos, generó 9 modelos de elementos finitos en los cuales considera escenarios con diferentes volúmenes de adición de fibras de acero y diferentes armaduras de refuerzo por tracción y compresión en las losas. Para caracterizar tanto al hormigón como a las

barras de refuerzo, empleó los elementos finitos SOLID65 y LINK8 respectivamente (el elemento LINK8 es una versión previa del elemento LINK180).

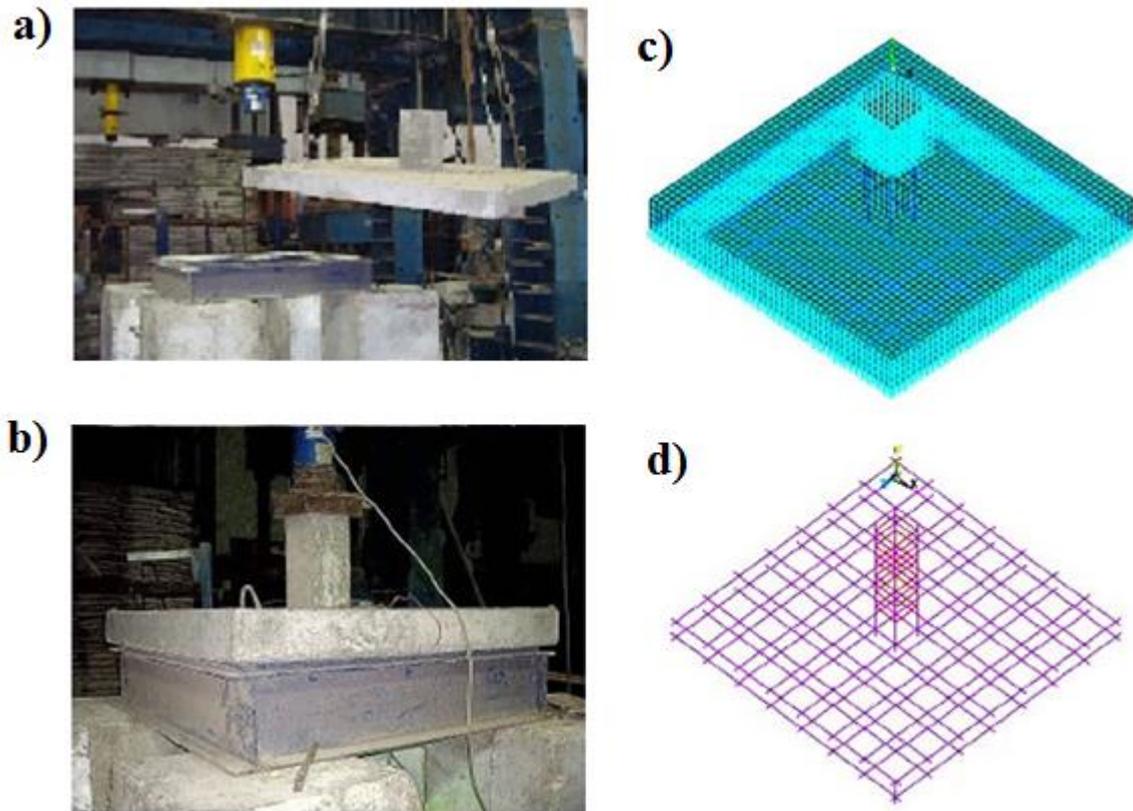


Figura 2.9: a) Montaje de la losa sobre los apoyos b) Ensayo de laboratorio c) Modelo de elementos finitos d) Malla de elementos finitos de la armadura de refuerzo (Ragab, 2013).

En la figura 2.9, se muestra un detalle de los ensayos de laboratorio y de los modelos de elementos finitos generados por Ragab (2013).

El aporte que se destaca del trabajo realizado por Ragab (2013) es proporcionar las pautas para generar modelos de elementos finitos empleando ANSYS, de losas de hormigón armado reforzado con fibras de acero. Cabe indicar que un aspecto no mencionado por Ragab (2013) es la forma en la cual son incorporadas en ANSYS las fibras de acero adicionales, que comportamiento mecánico se asigna a las mismas y como es que se incorpora en este programa la ductilidad que induce en el hormigón las mencionadas fibras; ya que el criterio de falla empleado (que está incorporado en ANSYS) fue desarrollado para materiales cuasi frágiles.

Ragab (2013) indica que para caracterizar al hormigón reforzado con fibras de acero, debe emplearse el elemento SOLID65 de ANSYS, un criterio de falla y una rama en compresión de la curva tensión – deformación del hormigón empleado (ver figura 2.10).

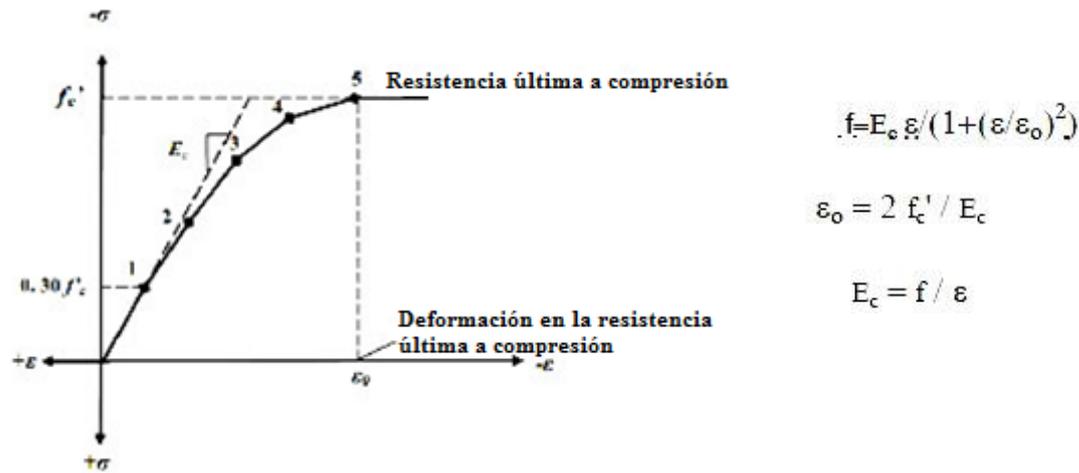


Figura 2.10: Rama en compresión de la curva tensión – deformación para el hormigón fibro reforzado empleada por Ragab (2013).

La curva mostrada en la figura 2.10, es obtenida por medio de expresiones empíricas y considera un comportamiento elástico lineal hasta un 30% de la resistencia a compresión y luego uno no lineal hasta alcanzar la resistencia pico a compresión, a partir de lo cual se asigna al material un comportamiento plástico perfecto. A su vez RILEM TC 162 – TDF (Vandewalle, 2003) asigna al hormigón reforzado con fibras de acero sometido a compresión uniaxial, un comportamiento similar al mostrado en la figura 2.10; el mismo que es mostrado en la figura 2.11 (mayores detalles son presentados en la figura 3.17).

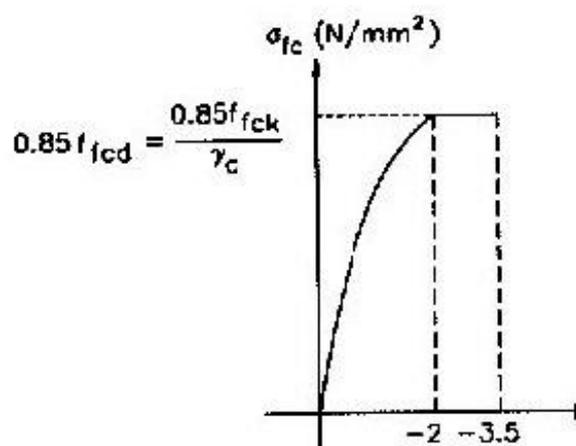


Figura 2.11: Rama en compresión de la curva tensión – deformación para el hormigón fibro reforzado que emplea RILEM TC162 – TDF (Vandewalle, 2003).

Cabe destacar que el comportamiento mostrado en la figura 2.11, es empleado por el reglamento RILEM TC 162 – TDF (Vandewalle, 2003) con fines de diseño de elementos de hormigón reforzado con fibras de acero, constituyéndose en una simplificación del comportamiento real de este material cuando está sometido a compresión uniaxial.

Cuando se procedió a generar los modelos de elementos finitos presentados en esta tesis, fue empleada una rama en compresión de la curva tensión – deformación similar a las mostradas en las figuras 2.10 y 2.11. Estando conscientes de las simplificaciones que conllevan su implementación, el principal problema que resultó de su uso fue la no convergencia de los modelos generados, debiéndose esta situación a que los segmentos lineales que conforman la rama en compresión de la curva tensión – deformación pueden tener pendientes iguales o menores al módulo elástico del material (módulo de Young) pero no mayores, ni iguales a cero; lo cual ocasiona que ANSYS no pueda capturar completamente el comportamiento plástico del hormigón (The Focus, 2006) y no se alcance la convergencia.

Es importante destacar que la rama en compresión de la curva tensión – deformación que debe ser empleada para el estudio del punzonamiento en losas de hormigón armado reforzado con fibras de acero, cumple las funciones de incorporar en ANSYS la ductilidad en el material que es inducida por la adición de las fibras y es un medio para obtener la convergencia en los modelos generados; por lo cual su elección debe ser cuidadosa.

c) Teixeira *et al* (2014)

Teixeira *et al* (2014) ensayaron experimentalmente un grupo de losas de hormigón armado reforzado con fibras de acero, para las cuales realizaron sus respectivos modelos de elementos finitos (ver figura 2.12). La geometría de las losas, la armadura de refuerzo por tracción, el tipo de fibras de acero y la proporción en la que fueron adicionadas son muy similares a las empleadas en esta tesis. Cabe indicar que las resistencias a compresión del hormigón empleado en estos modelos están en el rango de 50 a 70 MPa.

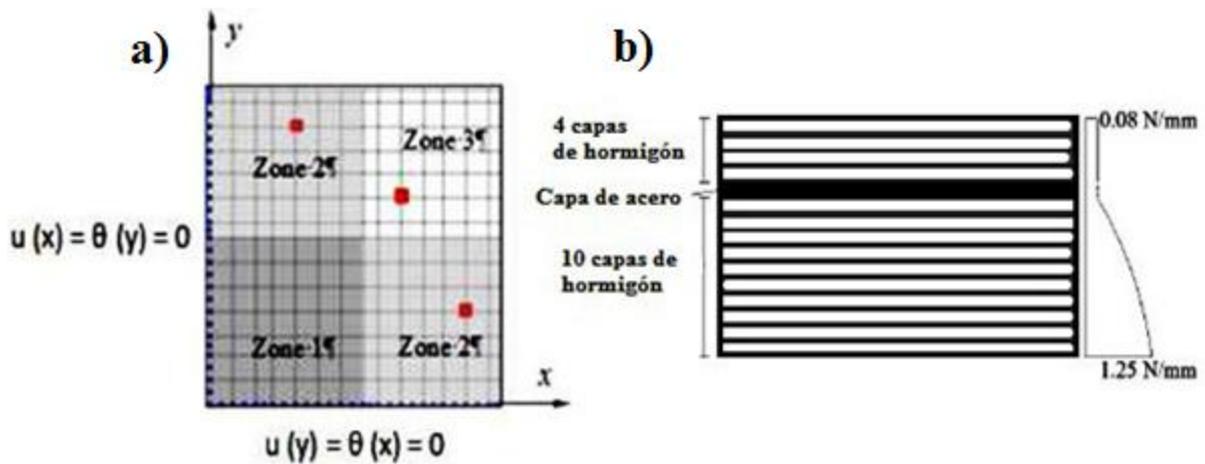


Figura 2.12: a) Malla y condiciones de borde impuestas b) Discretización de las capas de la sección transversal de las losas (Teixeira *et al*, 2014).

Los modelos de elementos finitos generados por Teixeira *et al* (2014), emplean la teoría de Reissner – Mindlin para simular el comportamiento no lineal del material y son empleados elementos del tipo *shell* para la formación de los mismos. Cabe destacar que el daño debido a la formación de grietas y su propagación fue simulado discretizando el espesor de las losas, de forma tal que el espesor está conformado por varias capas (ver figura 2.12 b). Para el patrón de agrietamiento se consideró un modelo constitutivo de agrietamiento disperso.

Entre los resultados obtenidos por Teixeira *et al* (2014) destacan la relación existente entre el volumen de fibras adicionado y la carga de punzonamiento obtenida, siendo a mayores volúmenes de fibras añadidas, mayores las cargas de punzonamiento que se obtienen.

Este grupo de investigadores, estudió también la relación existente entre la esbeltez de las fibras de acero empleadas y la energía de fractura. Se determinó que a mayor esbeltez de las fibras empleadas, mayor la energía de fractura obtenida; siendo en consecuencia mayor la capacidad de soportar cargas sin que las losas fallen por punzonamiento.

Estos resultados son importantes, pues confirman una de las ventajas de añadir fibras de acero al hormigón; que es capaz de soportar tracciones aun estando agrietado ya que las fibras ejercen un papel de costura de fisuras.

Cabe destacar que las resistencias a compresión uniaxial empleadas por estos investigadores (entre 50 y 70 MPa) resultan demasiado elevadas y en nuestro medio resulta poco frecuente emplear tales resistencias en losas de hormigón armado destinadas a entrepisos sin vigas, por

lo cual se considera pertinente generar modelos de elementos finitos de losas de H°A° reforzado con fibras de acero con resistencias a compresión que sean de uso frecuente, como por ejemplo entre 20 y 30 MPa.

2.2.3. Estudios analíticos

a) Choi *et al* (2007)

Choi *et al* (2007) realizaron un estudio teórico del punzonamiento en losas de hormigón armado reforzado con fibras de acero y determinaron que el punzonamiento en las uniones losa – columna, era absorbido tanto por las zonas en tracción como en compresión de las mencionadas uniones. La resistencia aportada por la zona en compresión fue definida considerando la interacción entre los esfuerzos cortantes y los normales que actúan en el área crítica que encierra la unión losa – columna. A su vez, la resistencia al cortante en la zona traccionada fue determinada considerando la resistencia a tracción post agrietamiento del hormigón reforzado con fibras de acero. De esta forma, Choi *et al* (2007) desarrollaron un nuevo modelo que permite estudiar el punzonamiento en losas de hormigón armado reforzado con fibras de acero.

En este modelo, se considera que el hormigón reforzado con fibras de acero es caracterizado por medio de su resistencia a compresión uniaxial f'_{cf} , su resistencia a tracción uniaxial f'_{ct} y su resistencia a tracción uniaxial post agrietamiento f'_{pc} (resistencia residual a tracción) (ver figuras 2.13 y 2.14).

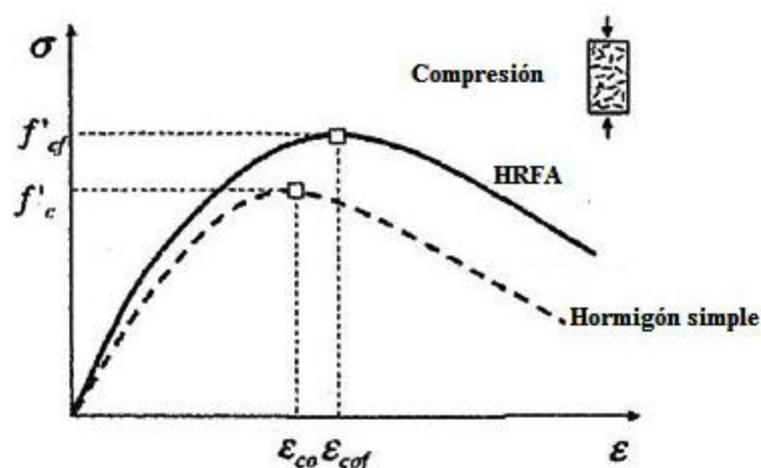


Figura 2.13: Comportamiento a compresión uniaxial del hormigón reforzado con fibras de acero (Choi *et al*, 2007).

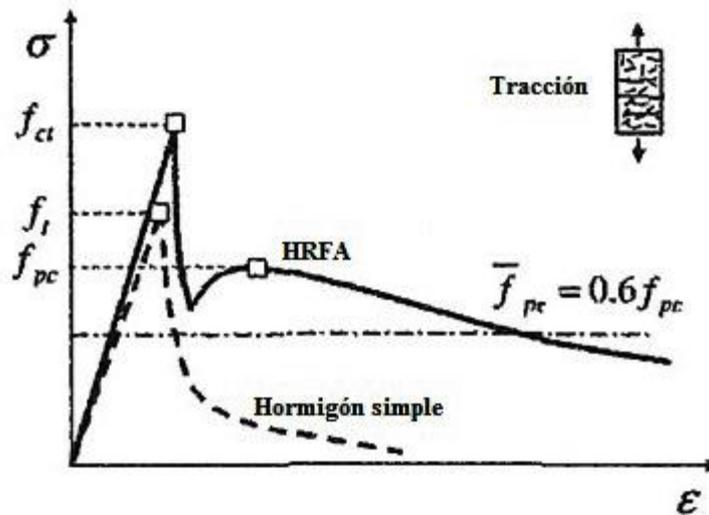


Figura 2.14: Comportamiento a tracción uniaxial del hormigón reforzado con fibras de acero (Choi *et al*, 2007).

La resistencia a tracción uniaxial post agrietamiento f_{pc} (ver figura 2.14), es obtenida experimentalmente por medio de ensayos de flexión con aplicación de cargas en cuatro puntos, aplicados a viguetas prismáticas de 15x15x70 cm (DAfStB, 2012).

Uno de los principales aportes del trabajo de Choi *et al* (2007) es proporcionar una expresión analítica para determinar el valor de f_{pc} , la cual toma en cuenta la forma de las fibras de acero empleadas, las propiedades de la matriz de hormigón, la fuerza de arrancamiento de las fibras y la resistencia de adherencia *bond strength* entre las fibras y la matriz.

La mencionada expresión es la siguiente:

$$f_{pc} = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdot V_f \cdot \left(\frac{L}{D}\right) \cdot \tau \cdot \beta \tag{2.4}$$

Donde:

f_{pc} Resistencia a tracción post agrietamiento del HRFA.

λ_1 Índice fuerza de arrancamiento – longitud de la fibra, se asigna un valor de 0.25.

λ_2 Factor de eficiencia de la orientación de las fibras en el estado agrietado, se asigna un valor de 1.2.

λ_3 Factor de reducción de grupo, asociado con el número de fibras arrancadas por unidad

- de área, se asigna un valor de 1.0.
- V_f Volumen de fibras de acero adicionadas [%].
- L Longitud de las fibras de acero
- D Diámetro de las fibras de acero.
- τ Resistencia de adherencia (*bond strength*) interfacial promedio entre la matriz y las Fibras, se asigna un valor igual a $\tau = 2 \cdot f_t$
- f_t Resistencia a tracción uniaxial de la matriz de hormigón, se asigna un valor
- $$f_t = 0.292 \cdot \sqrt{f_c'}$$
- f_c' Resistencia a compresión uniaxial de la matriz de hormigón.
- β Factor que toma en cuenta la forma de las fibras de acero y el tipo de hormigón de la matriz. Los valores a considerar para este factor son:
- Para fibras con ganchos o corrugadas, $\beta = 1$
 - Para fibras lisas redondeadas y matriz de hormigón normal, $\beta = 2/3$
 - Para fibras con ganchos o corrugadas con matriz de hormigón ligero, $\beta = 3/4$

b) Tazaly (2011)

Tazaly (2011) en su tesis de maestría, aplicó el modelo propuesto por la guía de diseño alemana DAfStB – BetonKalender 2011 (DAfStB, 2012) para determinar la carga de punzonamiento en losas de hormigón armado reforzado con fibras de acero. Dado el enfoque analítico de su trabajo, aplicó el mencionado modelo a 136 losas ensayadas experimentalmente por otros investigadores, quienes no habían determinado los respectivos valores de la resistencia residual a tracción del hormigón con fibras.

Una de las principales limitantes para la aplicación del modelo propuesto por la DAfStB – BetonKalender 2011 (DAfStB, 2012), era la falta de datos de la mencionada resistencia a tracción, para la cual este reglamento tiene una base de datos limitada; requiriéndose su determinación por medio de ensayos de flexión con aplicación de cargas en cuatro puntos aplicados a viguetas prismáticas.

De esta forma, se aproximó el valor de la resistencia residual a tracción por medio de las expresiones propuestas por Silfwerbrand (2000) y por Choi *et al* (2007).

Para validar sus resultados, contrastó las cargas de punzonamiento obtenidas por medio del modelo DAfStB – BetonKalender 2011 (DAfStB, 2012) con las obtenidas por medio del reglamento de la sociedad sueca del hormigón, el cual no usa la mencionada resistencia a tracción.

El contraste realizado indicó la aplicabilidad de aproximar el valor de la resistencia residual a tracción del hormigón reforzado con fibras de acero por medio de la expresión propuesta por Choi *et al* (2007), teniendo en cuenta el carácter conservador de los resultados.

El aporte del trabajo de Tazaly (2011) a la presente investigación, es constituirse en una amplia base de datos de ensayos experimentales realizados a losas de hormigón armado reforzado con fibras de acero y es también un antecedente que valida la obtención de las cargas de punzonamiento en estas losas aplicando el modelo DAfStB – BetonKalender 2011 (DAfStB, 2012) y la expresión propuesta por Choi *et al* (2007); las mismas que son empleadas en el contraste de resultados realizado en el apartado 6.4 del capítulo 6.

Si bien existen otros modelos para determinar las cargas de punzonamiento en losas de hormigón armado reforzadas con fibras de acero, como ser los propuestos por investigadores tales como Maya y Mutoni (2011) que requieren la determinación de la rotación en la unión losa – columna o los correspondientes a reglamentos de diseño como ser el CEB FIP Model Code 2010 (CEB-FIP, 2013) que requiere necesariamente la realización de ensayos experimentales; se destaca entre estos el modelo de la DAfStB – BetonKalender 2011 (DAfStB, 2012) por su buen desempeño.

CAPITULO 3

CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE LOS MATERIALES

3.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se describe la caracterización mecánica del hormigón simple, las barras de acero conformado de dureza natural y del hormigón reforzado con fibras de acero, que debe realizarse para que el programa de elementos finitos ANSYS tome en cuenta la influencia de cada uno de estos materiales en los modelos de elementos finitos que se desarrollaron.

3.2. EL HORMIGÓN SIMPLE

El hormigón simple (H^{°S°}) es un material cuasi frágil cuyo comportamiento a compresión difiere en gran medida de su comportamiento a tracción. Presenta como virtud inherente su elevada resistencia a la compresión, lo cual se contrasta con su fragilidad a la tracción.

De acuerdo con Ansys Inc. (2009), Pozolo (2010) y Gawas (2014); para caracterizar este material en ANSYS deben ser empleados los siguientes elementos:

- Una rama en compresión de la curva tensión – deformación del hormigón.
- Propiedades elásticas del material, como ser módulo elástico, coeficiente de Poisson, resistencia uniaxial a compresión, resistencia uniaxial a tracción.
- Un criterio de falla.

3.2.1. Curvas tensión - deformación del hormigón

3.2.1.1. Rama en compresión

Muchos investigadores con la finalidad de representar con la mayor fiabilidad posible el comportamiento del hormigón a compresión propusieron un sinnúmero de curvas tensión –

deformación entre las cuales destacamos las de Hognestad, Todeschini y Desayi, las cuales son ampliamente usadas en la modelación de elementos de hormigón por medio del método del elemento finito.

a) Curva de Hognestad

Esta curva esta compuesta por una rama parabólica y por un segmento lineal (ver figura 3.1), siendo para una deformación menor a ϵ_o , la rama parabólica generada por medio de:

$$f_c = f_c'' \left[\left(\frac{2\epsilon_c}{\epsilon_o} \right) - \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_o} \right)^2 \right] \tag{3.1}$$

Donde:

f_c : Tensión para una ϵ dada.

ϵ_c : Deformación uniaxial.

ϵ_o : Deformación a la que se produce la tensión pico.

$$\epsilon_o = \frac{1.8 f_c''}{E_c}$$

E_c : Módulo elástico del hormigón.

$$f_c'' = 0.9 f_c'$$

f_c' : Resistencia cilíndrica a compresión del hormigón.

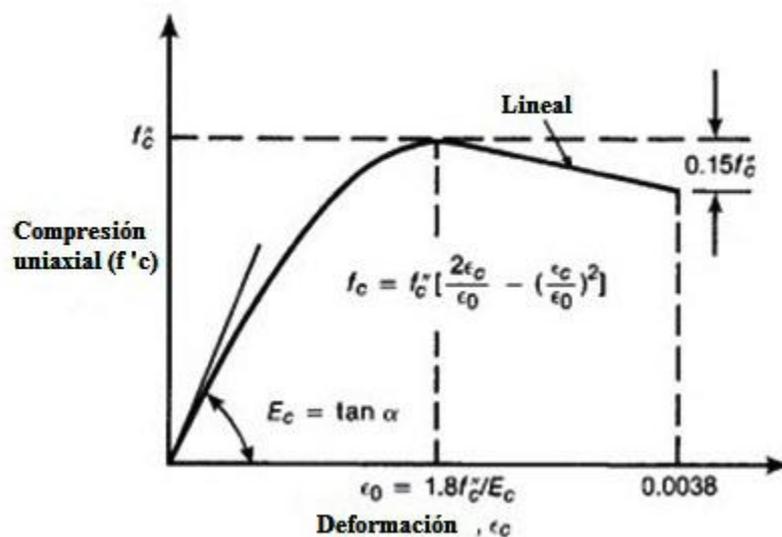


Figura 3.1: Curva tensión-deformación de Hognestad, rama en compresión (MacGregor, 2012).

El segmento lineal es formado por medio de una recta que une los puntos (ϵ_o , f_c'') y $(0.0038 , 0.15f_c'')$.

b) Curva de Todeschini

Como se aprecia en la figura 3.2, esta curva está compuesta por una rama de forma parabólica que sigue la siguiente ecuación:

$$f_c = \frac{2f_c'' \frac{\epsilon}{\epsilon_o}}{1 + \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_o}\right)^2} \tag{3.2}$$

Donde:

f_c : Tensión para una ϵ dada.

ϵ : Deformación uniaxial.

ϵ_o : Deformación a la que se produce la tensión pico.

$$\epsilon_o = \frac{1.71f_c''}{E_c}$$

E_c : Módulo elástico del hormigón.

$$f_c'' = 0.9f_c'$$

f_c' : Resistencia cilíndrica a compresión uniaxial del hormigón.

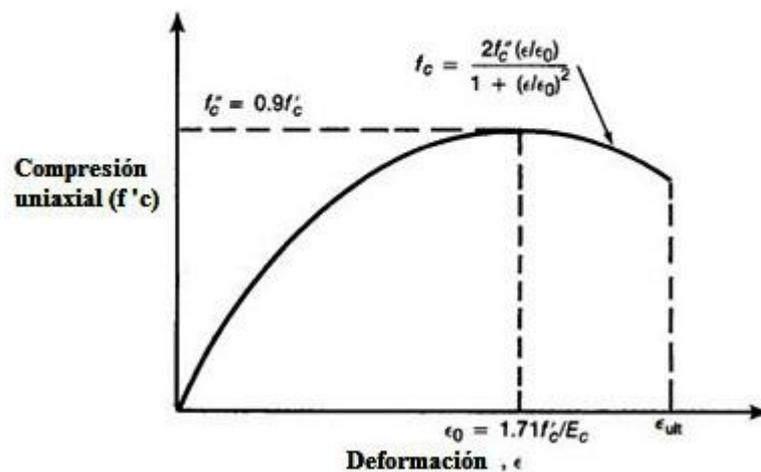


Figura 3.2: Curva tensión-deformación de Todeschini, rama en compresión (MacGregor, 2012).

c) Curva de Desayi

La curva de Desayi está compuesta por una rama de forma parabólica y por un segmento lineal totalmente horizontal. La rama parabólica, es generada por medio de (3.3).

$$f_c = \frac{E_c \varepsilon}{1 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_o}\right)^2} \quad (3.3)$$

Donde:

f_c : Tensión para una ε dada.

ε : Deformación uniaxial.

ε_o : Deformación a la que se produce la tensión pico.

$$\varepsilon_o = \frac{2f'_c}{E_c}$$

E_c : Módulo de elasticidad del hormigón.

f'_c : Resistencia cilíndrica a compresión uniaxial del hormigón.

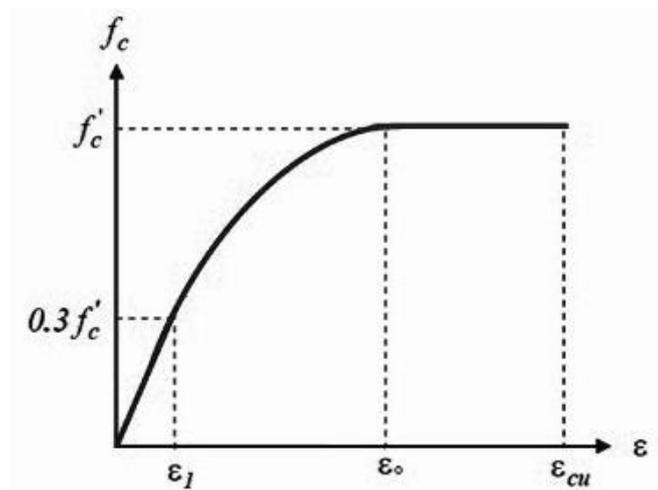


Figura 3.3: Curva tensión-deformación de Desayi, rama en compresión (Desayi, 1964).

En las curvas de tensión-deformación del hormigón simple, en general puede apreciarse un comportamiento elástico lineal hasta un 30% de la máxima resistencia a compresión. Rebasando este punto, se presenta un incremento gradual hasta llegar alrededor del 90% de la misma. Inmediatamente después de haber alcanzado el valor pico, se presenta una rama de

ablandamiento, llegando a producirse la falla por aplastamiento del material cuando se alcanza la deformación ε_{cu} (Bangash, 2001).

En las curvas de Hognestad y Todeschini se aprecia el comportamiento general descrito precedentemente. En la curva de Desayi se aprecia un comportamiento plástico perfecto después de que se alcanzó la resistencia pico a compresión; esto permite concluir que no se tiene una curva tensión-deformación única para describir el comportamiento del hormigón en compresión.

3.2.1.2. Rama en tracción

En lo que respecta a la rama en tracción de la curva tensión-deformación, ANSYS genera la misma basado en el modelo de la fisura distribuida, tal como se muestra en la figura 3.4.

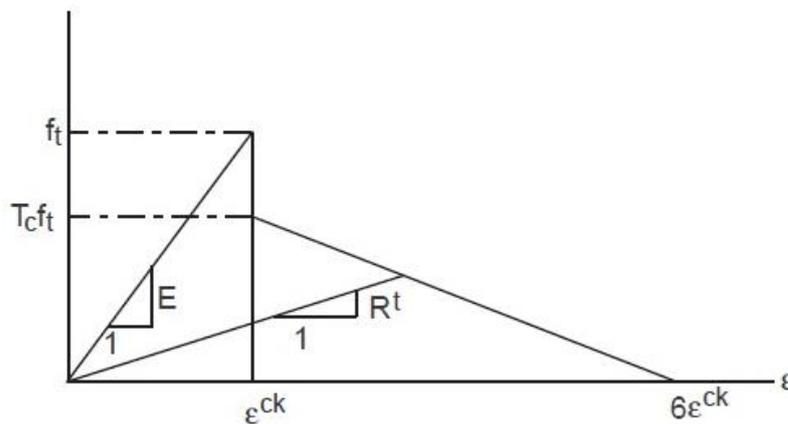


Figura 3.4: Curva tensión-deformación del hormigón simple en tracción uniaxial, incorporada en ANSYS (ANSYS Inc., 2009).

En el intervalo $0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon^{ck}$ la figura 3.4 muestra un segmento lineal, el mismo que es generado por medio de (3.4).

$$f = \frac{f_t}{\varepsilon^{ck}} \varepsilon \tag{3.4}$$

Donde:

- f Esfuerzo de tracción para una deformación ε dada.
- ε Deformación uniaxial.
- f_t Resistencia a tracción uniaxial del hormigón.

ε^{ck} Deformación a la cual la relación tensión-deformación está referida a un sistema coordinado paralelo a las direcciones de las tensiones principales con el eje x^{ck} perpendicular a la cara del agrietamiento.

En el intervalo $\varepsilon^{ck} \leq \varepsilon \leq 6\varepsilon^{ck}$ se produce un descenso de la resistencia a tracción del hormigón, el segmento lineal de este intervalo se genera por medio de (3.5).

$$f = \frac{6}{5} T_c f_t - \frac{T_c f_t}{5 \varepsilon^{ck}} \quad (3.5)$$

Donde:

T_c Factor de reducción de f_t , su valor está entre 0 y 1, siendo asumido comúnmente 0.6.

De acuerdo con la figura 3.4, en el intervalo $0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon^{ck}$ la pendiente del segmento lineal es E que equivale a módulo elástico del hormigón obtenido de la rama en compresión. A su vez, R^t equivale al módulo de elasticidad secante definido para la modificación de la matriz constitutiva tangente.

3.2.2. Propiedades elásticas del material

Estas corresponden al módulo de elasticidad tangente inicial del hormigón (ver figura 3.5) y al coeficiente de Poisson. Con referencia a este coeficiente, se define un valor igual a 0.2; en lo que respecta al módulo de elasticidad tangente inicial cada reglamento de diseño de estructuras de hormigón armado propone expresiones analíticas para determinar su valor, como por ejemplo la de CIRSOC 201 (Möller, 2004):

$$E_c = 4700 \cdot \sqrt{f'_c} \quad (3.6)$$

Donde:

E_c Módulo de elasticidad del hormigón, MPa.

f'_c Resistencia cilíndrica a compresión uniaxial, MPa.

De acuerdo con CIRSOC 201 (Möller, 2004), la resistencia uniaxial a tracción del hormigón, se encuentra en el siguiente intervalo $0.292\sqrt{f'_c}$ hasta $0.42\sqrt{f'_c}$.

A su vez, en el reglamento ACI 318-11 (2011) se presenta la siguiente expresión:

$$E_c = 57000\sqrt{f'_c} \tag{3.7}$$

Donde:

E_c Módulo de elasticidad del hormigón, Psi.

f'_c Resistencia cilíndrica a compresión uniaxial, Psi.

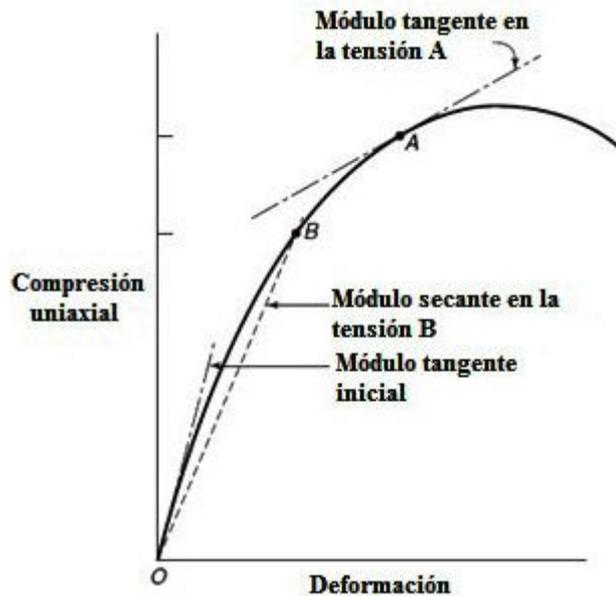


Figura 3.5: Módulos de elasticidad tangentes y secantes (MacGregor, 2012).

3.2.3. Criterio de falla empleado

Se emplea el criterio de falla de Willam y Warnke (ANSYS Inc, 2009), que es expresado por medio de (3.8).

$$\frac{F}{f_c} - S \geq 0 \tag{3.8}$$

Donde:

F Función del estado de tensiones principales $(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$.

- S Superficie de falla expresada en términos de las tensiones principales y de cinco parámetros dato $(f_t, f_c, f_{cb}, f_1, f_2)$.
- f_t Resistencia última a tracción uniaxial.
- f_c Resistencia última a compresión uniaxial.
- f_{cb} Resistencia última a compresión biaxial.
- f_1 Resistencia última a compresión para un estado de compresión biaxial sobrepuesto a un estado de tensión hidrostática (σ_a^h) .
- f_2 Resistencia última a compresión para un estado de compresión uniaxial sobrepuesto a un estado de tensión hidrostática (σ_a^h) .

Sin embargo, la superficie de falla S puede ser especificada solamente con dos parámetros, f_t y f_c ; los otros parámetros asumen por defecto los siguientes valores:

$$f_{cb} = 1.2 f_c \quad (3.9)$$

$$f_1 = 1.45 f_c \quad (3.10)$$

$$f_2 = 1.725 f_c \quad (3.11)$$

Estos valores por defecto son válidos únicamente si se cumple la siguiente condición:

$$|\sigma_h| \leq \sqrt{3} f_c \quad (3.12)$$

Siendo $\sigma_h = \frac{1}{3}(\sigma_{xp}, \sigma_{yp}, \sigma_{zp})$ la tensión hidrostática (ver figura 3.6).

Tanto la función F como la superficie S son expresadas en términos de las tensiones principales denotadas por σ_1 , σ_2 y σ_3 ; siendo $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$.

$$\sigma_1 = \max(\sigma_{xp}, \sigma_{yp}, \sigma_{zp}) \quad (3.13)$$

$$\sigma_3 = \min(\sigma_{xp}, \sigma_{yp}, \sigma_{zp}) \quad (3.14)$$

De esta forma, la falla en el hormigón está categorizada en cuatro dominios:

1. $0 \geq \sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ (compresión – compresión – compresión).
2. $\sigma_1 \geq 0 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ (tracción – compresión – compresión).
3. $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq 0 \geq \sigma_3$ (tracción – tracción – compresión).
4. $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 \geq 0$ (tracción – tracción – tracción).

En cada dominio, las funciones independientes F_1, F_2, F_3 y F_4 describen a F y asimismo las funciones S_1, S_2, S_3 y S_4 describen a S .

a) Dominio compresión – compresión – compresión:

La función F toma la siguiente forma:

$$F = F_1 = \frac{1}{\sqrt{15}} \left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.15)$$

Y a su vez la función S es definida por:

$$S = S_1 = \frac{2r_2(r_2^2 - r_1^2)\cos\eta + r_2(2r_1 - r_2)\left[4(r_2^2 - r_1^2)\cos^2\eta + 5r_1^2 - 4r_1r_2\right]^{\frac{1}{2}}}{4(r_2^2 - r_1^2)\cos^2\eta + (r_2 - 2r_1)^2} \quad (3.16)$$

Los términos empleados para definir S son:

$$\cos\eta = \frac{2\sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_3}{\sqrt{2\left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2\right]^{\frac{1}{2}}}} \quad (3.17)$$

$$r_1 = a_0 + a_1\xi + a_2\xi^2 \quad (3.18)$$

$$r_2 = b_0 + b_1\xi + b_2\xi^2 \quad (3.19)$$

$$\xi = \frac{\sigma_h}{f_c} \quad (3.20)$$

En la figura 3.6 se aprecia la función S (ecuación 3.16) en el espacio de tensiones principales, como así también las funciones r_1, r_2 y el ángulo de similitud η .

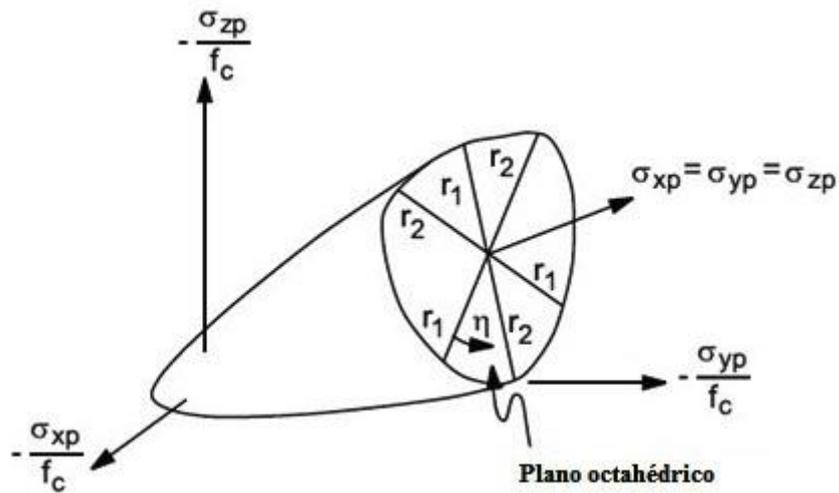


Figura 3.6: Representación en el espacio de tensiones principales de la superficie S definida por (3.16) (ANSYS Inc., 2009).

La función r_1 es determinada ajustando los coeficientes a_0 , a_1 y a_2 de forma que f_t , f_{cb} y f_1 se encuentren sobre la superficie de falla. Los valores de los coeficientes a_0 , a_1 y a_2 son obtenidos resolviendo el sistema de ecuaciones (3.21).

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{F_1}{f_c} (\sigma_1 = f_t, \sigma_2 = \sigma_3 = 0) \\ \frac{F_1}{f_c} (\sigma_1 = 0, \sigma_2 = \sigma_3 = -f_{cb}) \\ \frac{F_1}{f_c} (\sigma_1 = -\sigma_h^a, \sigma_2 = \sigma_3 = -\sigma_h^a - f_1) \end{array} \right\} = \begin{bmatrix} 1 & \xi_t & \xi_t^2 \\ 1 & \xi_{cb} & \xi_{cb}^2 \\ 1 & \xi_1 & \xi_1^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{Bmatrix} \quad (3.21)$$

Con:

$$\xi_t = \frac{f_t}{3f_c}, \quad \xi_{cb} = -\frac{2f_{cb}}{3f_c}, \quad \xi_1 = -\frac{\sigma_h^a}{f_c} - \frac{2f_1}{3f_c}$$

La función r_2 es calculada ajustando los coeficientes b_0 , b_1 y b_2 , que pueden ser obtenidos resolviendo el sistema (3.22).

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{F_1}{f_c}(\sigma_1 = \sigma_2 = 0, \sigma_3 = -f_c) \\ \frac{F_1}{f_c}(\sigma_1 = \sigma_2 = -\sigma_h^a, \sigma_3 = -\sigma_h^a - f_2) \\ \frac{F_1}{f_c}(0) \end{array} \right\} = \begin{bmatrix} 1 & 1/3 & 1/9 \\ 1 & \xi_2 & \xi_2^2 \\ 1 & \xi_0 & \xi_0^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \end{Bmatrix} \quad (3.22)$$

Siendo:

$$\xi_2 = -\frac{\sigma_h^a}{f_c} - \frac{f_2}{3f_c} \quad (3.23)$$

Se indica también que la variable ξ_0 , es la raíz positiva de la ecuación (3.24).

$$r_2(\xi_0) = a_0 + a_1\xi_0 + a_2\xi_0^2 = 0 \quad (3.24)$$

En la ecuación (3.24), los coeficientes a_0 , a_1 y a_2 fueron evaluados por medio de (3.21).

Considerando que la superficie de falla debe mantenerse convexa, la relación entre r_1/r_2 está limitada al rango:

$$0.5 < r_1/r_2 < 1.25$$

b) Dominio tracción – compresión – compresión:

En este dominio, la función F toma la siguiente forma:

$$F = F_2 = \frac{1}{\sqrt{15}} \left[(\sigma_2 - \sigma_3)^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.25)$$

Y la superficie S es definida por:

$$S = S_2 = \left(1 - \frac{\sigma_1}{f_t} \right) \frac{2p_2(p_2^2 - p_1^2)\cos\eta + p_2(2p_1 - p_2)[4(p_2^2 - p_1^2)\cos^2\eta + 5p_1^2 - 4p_1p_2]^{\frac{1}{2}}}{4(p_2^2 - p_1^2)\cos^2\eta + (p_2 - 2p_1)^2} \quad (3.26)$$

$$\cos\eta = \frac{2\sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_3}{\sqrt{2}\left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2\right]^{\frac{1}{2}}} \quad (3.27)$$

$$p_1 = a_0 + a_1\chi + a_2\chi^2 \quad (3.28)$$

$$p_2 = b_0 + b_1\chi + b_2\chi^2 \quad (3.29)$$

$$\chi = \frac{(\sigma_2 + \sigma_3)}{3f_c} \quad (3.30)$$

Los coeficientes a_0 , a_1 , a_2 , b_0 , b_1 y b_2 son obtenidos por medio de (3.21) y (3.22).

Si el criterio de falla (3.8) es satisfecho, el agrietamiento del hormigón se producirá en el plano perpendicular a la tensión principal σ_1 .

c) Dominio tracción – tracción – compresión:

La función F toma la siguiente forma:

$$F = F_3 = \sigma_i \quad ; i = 1, 2 \quad (3.31)$$

A su vez la superficie S , se define por medio de (3.32).

$$S = S_3 = \frac{f_t}{f_c} \left(1 + \frac{\sigma_i}{f_c} \right) ; i = 1, 2 \quad (3.32)$$

Si el criterio de falla (3.8) es satisfecho para i igual a 1 y 2, entonces se produce el agrietamiento del hormigón en los planos perpendiculares a las tensiones principales σ_1 y σ_2 .

Si (3.8) se cumple únicamente para i igual a 1, el agrietamiento se produce solamente en el plano perpendicular a σ_1 .

d) Dominio tracción – tracción – tracción:

En este dominio la función F toma la siguiente forma:

$$F = F_4 = \sigma_i \quad ; \quad i = 1, 2, 3 \tag{3.33}$$

Y la superficie S está definida por:

$$S = S_4 = \frac{f_t}{f_c} \tag{3.34}$$

Si el criterio de falla (3.8) es satisfecho en las direcciones 1, 2 y 3; se produce el agrietamiento en los planos perpendiculares a σ_1 , σ_2 y σ_3 .

Si (3.8) es satisfecho únicamente en las direcciones 1 y 2, entonces el agrietamiento se presenta en los planos perpendiculares a las tensiones principales σ_1 y σ_2 .

Finalmente, si el criterio de falla (3.8) se cumple solamente en la dirección 1, el agrietamiento ocurre en el plano perpendicular a σ_1 .

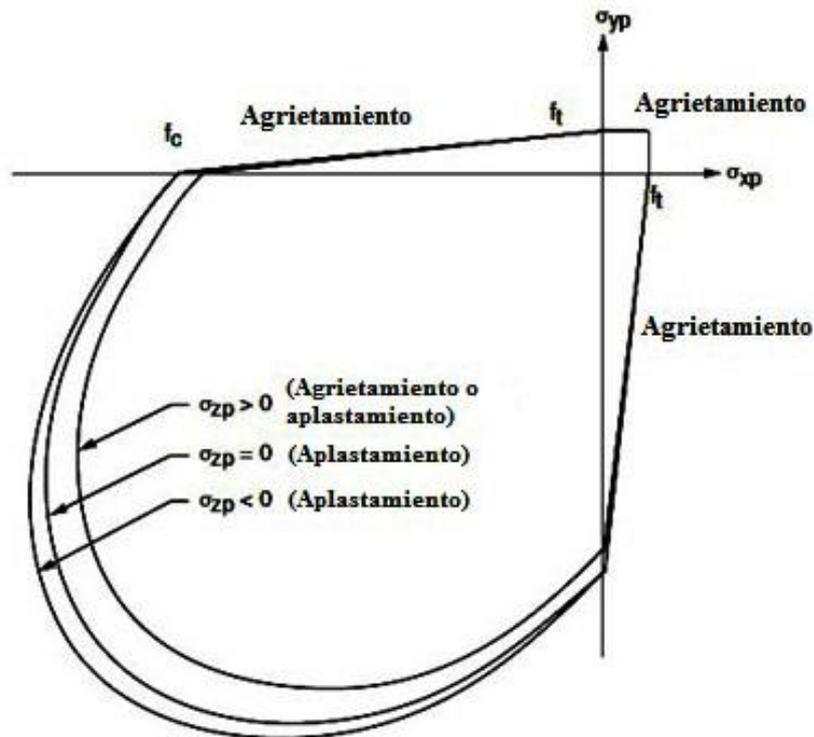


Figura 3.7: Superficie de falla en el espacio de tensiones principales, con tensiones biaxiales (ANSYS Inc., 2009).

La figura 3.7 representa la superficie de falla para estados de tensiones que son biaxiales o casi biaxiales, si las tensiones principales más significativas se encuentran en las direcciones σ_{xp} y σ_{yy} , entonces las tres superficies representadas en 3.7 son para σ_{zp} ligeramente mayor a cero,

igual a cero y ligeramente menor que cero. Aunque las tres curvas mostradas como proyecciones de la superficie de falla en el plano $\sigma_{xp} - \sigma_{yp}$ son casi iguales y la superficie de falla sea continua; el modo de falla del material es función del signo de σ_{zp} . Por ejemplo, si σ_{xp} y σ_{yp} son negativas y σ_{zp} es positiva, se podría predecir el agrietamiento en la dirección perpendicular a σ_{zp} . Sin embargo, si σ_{zp} es nula o negativa se asume que el hormigón falla por aplastamiento.

3.2.4. Elemento finito empleado en ANSYS para caracterizar el hormigón simple

Se emplea el elemento SOLID65 que es explicado en el apartado 4.3 del capítulo 4.

3.3. BARRAS DE ACERO CONFORMADO DE DUREZA NATURAL

Las barras de acero conformado de dureza natural son un componente indispensable en los elementos de hormigón armado, siendo requerido para su caracterización mecánica en ANSYS:

- Las propiedades elásticas del material
- Un criterio de falla

3.3.1. Propiedades elásticas del material

Deben de emplearse el módulo de elasticidad tangente inicial del acero (módulo de elasticidad) y el coeficiente de Poisson.

Para el módulo de elasticidad puede asumirse un valor igual a 210 GPa y con respecto al coeficiente de Poisson puede considerarse un valor igual a 0.3.

3.3.2. Criterio de falla empleado

Si bien el comportamiento mecánico de las barras de acero conformado de dureza natural que forman parte de los elementos de hormigón armado, puede ser considerado como elástico lineal; se opta por asignar a este material un comportamiento elastoplástico perfecto (figura 3.8), el cual emplea como criterio de falla el correspondiente a Von Mises.

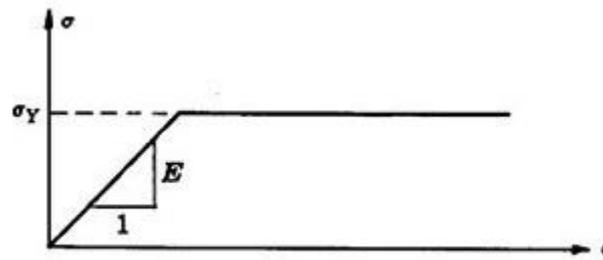


Figura 3.8: Idealización de un comportamiento elasto-plástico perfecto (Mase, 1970).

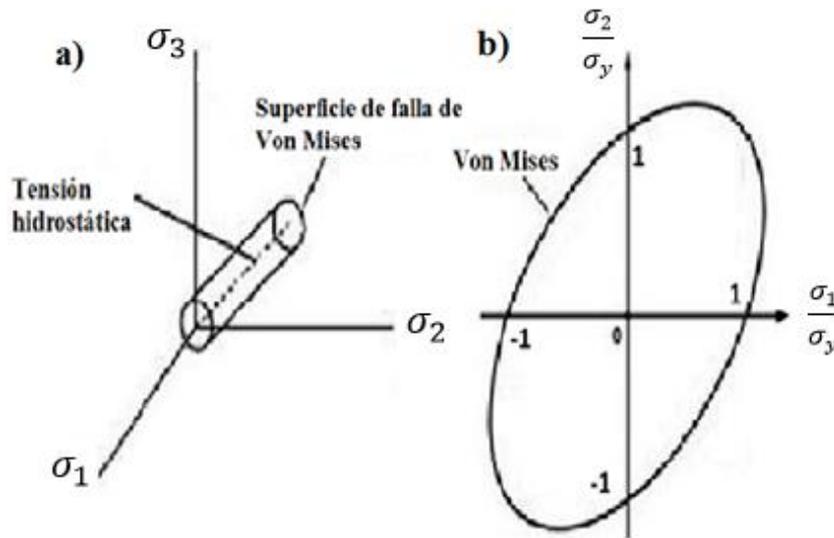


Figura 3.9: a) Superficie de falla del criterio de Von Mises en el espacio de tensiones principales b) Superficie de falla en el plano (Chakrabarty, 2006).

La superficie de falla del criterio de Von Mises tiene la forma de un cilíndrico que se desarrolla a lo largo del eje hidrostático del espacio de tensiones principales (figura 3.9 a); cuando se intersecta la superficie de falla con alguno de los planos $\sigma_1 = 0$, $\sigma_2 = 0$ o $\sigma_3 = 0$ se obtiene una elipse (figura 3.9 b). Matemáticamente, este criterio se establece por:

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2\sigma_y^2 \tag{3.35}$$

Siendo σ_1 , σ_2 y σ_3 las tensiones principales, considerando que $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$.

Como indica (3.35), para aplicar este criterio de falla es necesario definir el valor del límite de fluencia σ_y del acero conformado de dureza natural.

3.3.3. Elemento finito empleado en ANSYS para caracterizar las barras de acero conformado de dureza natural

Será empleado el elemento LINK180 que es explicado en el apartado 4.4 del capítulo 4.

3.4. HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO

El hormigón reforzado con fibras de acero (HRFA) es un material compuesto, que surge de combinar una matriz de hormigón con fibras cortas de acero (ver figura 3.10).

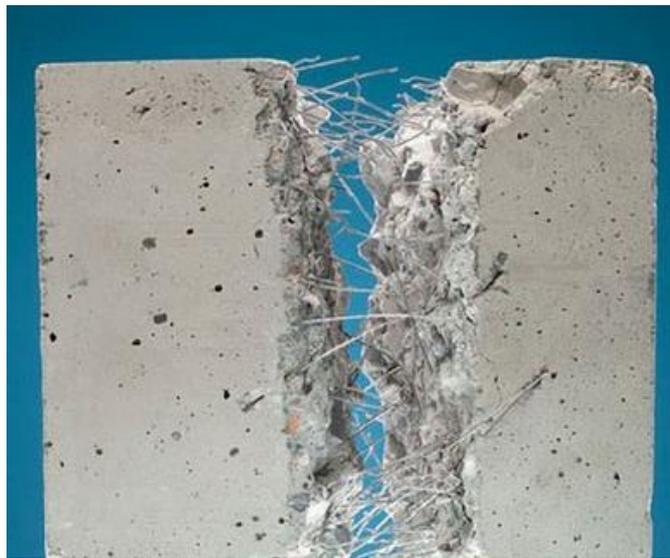


Figura 3.10: Espécimen de hormigón reforzado con fibras de acero (Civildigital, 2015).

Preferentemente ha de emplearse hormigón autocompactante o uno de consistencia fluida, elaborado en base a cemento hidráulico, agregado grueso, agregado fino y agua; siendo recomendable la adición de aditivos superplastificantes, para reducir la cantidad de agua de amasado y dar al hormigón la consistencia deseada.

Las fibras de acero son filamentos metálicos pequeños, caracterizados geoméricamente por la relación existente entre su longitud L y su diámetro D , denominada esbeltez λ (ver ecuación 3.36).

$$\lambda = \frac{L}{D} \quad (3.36)$$

La esbeltez puede variar desde 20 hasta 100 y a su vez las fibras pueden ser de diversas formas y pueden tener varios tipos de secciones transversales (ver figura 3.11).



Figura 3.11: Ejemplo de fibras de diferentes formas y secciones transversales (Núñez López, 2011).

De acuerdo con Maccaferri (2015), las propiedades mecánicas más relevantes de las fibras de acero son:

- **Diámetro μm :** 5 – 500
- **Densidad Kg/m^3 :** 7.84E3
- **Módulo elástico MN/m^2 :** 200E3
- **Resistencia a la tracción MN/m^2 :** 500 - 2000
- **Elongación a ruptura %:** 0.5 – 3.5

En términos generales, la calidad mecánica de las fibras debe ser muy elevada, con resistencias a tracción típicas del orden de los 1100 MPa (Maccaferri, 2015).

La adición de fibras no debe ser inferior a 20 – 25 Kg/m^3 (0.25% - 0.3125% en volumen de hormigón) y puede alcanzar, para aplicaciones más exigentes, los 40 u 80 Kg/m^3 (0.5% - 1% en volumen de hormigón) (Núñez López, 2011).

3.4.1. Propiedades mecánicas del hormigón reforzado con fibras de acero

De acuerdo con Tazaly (2011), el desempeño mecánico de este material compuesto está controlado principalmente por las propiedades de la matriz de hormigón y de las fibras de acero; como ser el porcentaje en volumen de las fibras añadidas y su orientación.

La adición de fibras de acero a la matriz de hormigón, tiene poco efecto en factores tales como la resistencia a compresión uniaxial, el coeficiente de Poisson, el módulo de elasticidad y la porosidad (Vondran, 1991). Antes del inicio del agrietamiento, las fibras de acero no ejercen efecto alguno en el comportamiento del hormigón. El principal beneficio del empleo de estas fibras, es la capacidad de deformación que proporcionan a los elementos y el control del agrietamiento, ya que las fibras frenan la propagación de las macrofisuras de la matriz (ver figura 3.12).

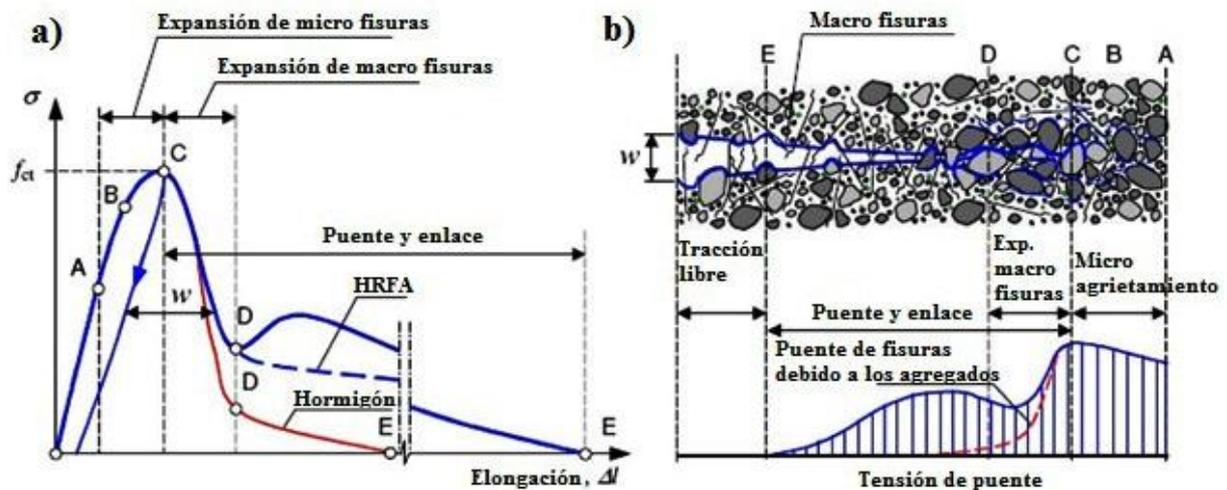


Figura 3.12: a) Proceso de fractura en tracción uniaxial b) Relación tensión – apertura de fisura en el HRFA (Tazaly, 2011).

Las elongaciones que alcanzan las fibras de acero al momento de su rotura, son dos o tres veces mayores a las deformaciones que alcanza la matriz de hormigón al momento de romperse y pueden incrementar hasta veinte veces su resistencia al agrietamiento (Shah, 1981). De esta forma, mucho antes de que las fibras hayan alcanzado su resistencia límite, la matriz de hormigón ya habrá fallado (Tazaly, 2011). Mientras la carga sobre los elementos de hormigón reforzados con fibras de acero sea pequeña y los mismos no estén agrietados, el compuesto se

comportará como un hormigón ordinario. Una vez que el hormigón llega a la fase de agrietamiento, es ahí donde la influencia de las fibras de acero se deja notar.

Los principales beneficios de la adición de fibras de acero, se presentan en el hormigón endurecido, ya que las mismas absorben las tracciones y las redistribuyen eficazmente, ejerciendo una función de puente que evita que las grietas se sigan abriendo.

a) Resistencia al arrancamiento de las fibras (*Steel fiber pull-out*)

El mecanismo de arrancamiento de las fibras de acero, es esencial cuando la resistencia a tracción es transmitida de las fibras a la matriz de hormigón.

Para evitar fallas del tipo frágil, la longitud de arrancamiento de las fibras debe ser tomada cuidadosamente. Puede tomarse en promedio longitudes de arrancamiento de $\frac{1}{4}$ de la longitud de la fibra (Tazaly, 2011). Este resultado indica que las fibras largas, brindan una resistencia más eficaz a la falla del compuesto y que presentan un mejor desempeño mecánico (ver figura 3.13).

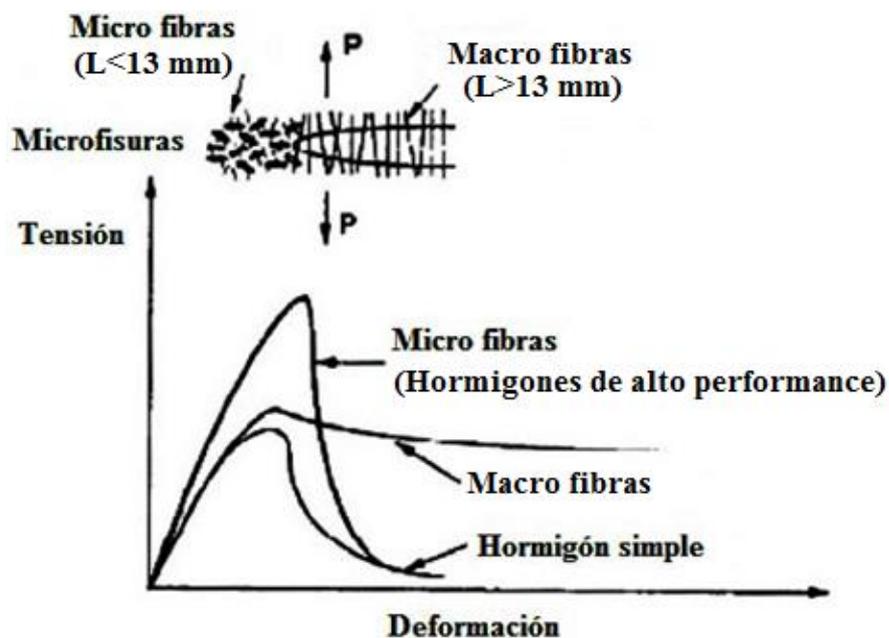


Figura 3.13: Efecto del tamaño de las fibras en la costura de fisuras (Tazaly, 2011).

b) Resistencia de adherencia de las fibras con la matriz de hormigón (*Steel fiber bond strength*)

La resistencia de adherencia, es la resistencia entre las fibras de acero y la matriz; es descrita para las fibras de acero en términos de la esbeltez o índice de aspecto L/d . Como la falla de las fibras de acero y la resistencia de arrancamiento de las mismas, depende de su forma y de la resistencia de la matriz; no es posible proporcionar una fórmula generalizada que represente en los cálculos a esta resistencia de adherencia.

Cuando las fibras de acero tienen esbelteces elevadas, las mismas inducen en el comportamiento post pico del compuesto un efecto positivo, ya que las ramas de ablandamiento de las curvas tensión – deformación se tornan dúctiles.

c) Corrosión de las fibras de acero

La corrosión de las fibras de acero es un fenómeno que puede presentarse, pero su efecto no es de mayor consideración. Granju y Balouch (2004), expusieron muestras de hormigón reforzado con fibras de acero, por un periodo de un año; a ambientes salinos como los de las playas y evidenciaron que solo las fibras que atraviesan las grietas de 2 mm a 3 mm (en la superficie) presentan corrosión, pero sin que se produzca el astillamiento de las mismas.

d) Curvas tensión - deformación

En las figuras 3.14 y 3.15 se muestran las ramas en compresión y en tracción respectivamente, de las curvas tensión – deformación típicas para el hormigón reforzado con fibras de acero (HRFA). Con referencia al comportamiento en compresión del HRFA (figura 3.14) se aprecia que el mismo es muy similar al del hormigón simple (al menos en el rango elástico), con la diferencia de que la adición de fibras incrementa ligeramente la resistencia uniaxial a compresión. Un hecho que es importante destacar, es la ductilidad que introducen las fibras de acero en el comportamiento post pico, el cual se incrementa a medida que son mayores las adiciones de fibras.

A su vez, en el comportamiento a tracción (figura 3.15) las fibras de acero ejercen una notoria influencia en la matriz de hormigón ya que aumentan su resistencia uniaxial a tracción post pico, siendo mayor este aumento en función a mayores adiciones de fibras.

Mientras que el hormigón simple presenta en el comportamiento post pico una falla del tipo frágil, el HRFA tiene una resistencia residual a tracción que le confiere un comportamiento post pico mucho más dúctil que el del hormigón simple.

Esta ductilidad se ve manifestada por el hecho de que el HRFA es capaz de soportar tracciones aun estando fisurado, lo cual es posible por la acción de costura de fisuras que ejercen las fibras.

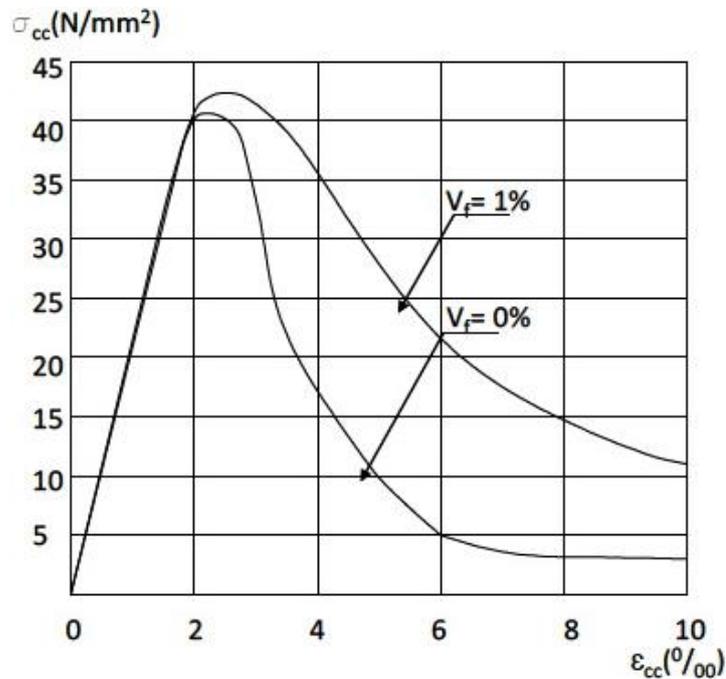


Figura 3.14: Comportamiento típico de un HRFA a compresión $f_{ctm} = 42 N/mm^2$ (Köning y Kützing, 1999).

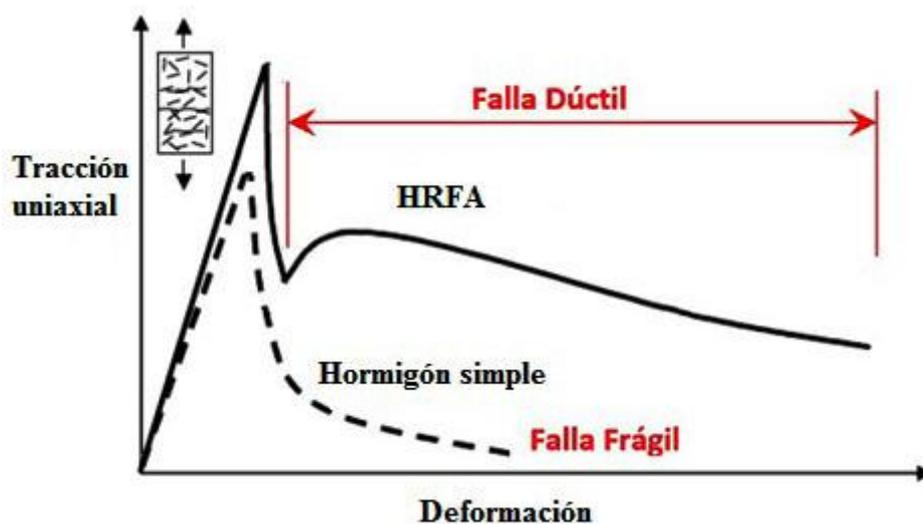


Figura 3.15: Curva tensión – deformación típica para el HRFA y para el hormigón simple sometidos a tracción uniaxial (Choi *et al*, 2007).

3.4.2. Modelación numérica – computacional del hormigón reforzado con fibras de acero

La modelación numérica computacional del hormigón reforzado con fibras de acero, no es una tarea sencilla; pudiendo ser empleado para este fin enfoques de homogenización basados en la teoría de mezclas modificada (Luccioni *et al*, 2012). Estos enfoques deben implementarse en programas computacionales de elementos finitos de código abierto, pero también es posible usar programas comerciales de elemento finito multipropósito que tienen incorporadas características que hacen posible modelar este material.

Entre los programas computacionales multipropósito que pueden ser empleados, se destacan ANSYS y ABAQUS que se encuentran entre los más utilizados para la modelación de elementos reforzados con fibras de acero. En la presente tesis se empleará el programa ANSYS.

La biblioteca de elementos finitos de ANSYS, no cuenta con un elemento concebido específicamente para modelar hormigón reforzado con fibras, por lo que se utiliza las características incorporadas para modelar hormigón armado, como ser la incorporación de refuerzo del tipo discreto y disperso.

Cabe mencionar que investigadores tales como Zhang (2004), Kachlakev *et al* (2001), Ragab (2013), López Lancheros (2012) y Majeed (2012); emplearon ANSYS para generar modelos de elementos finitos que incluyen hormigón reforzado con fibras y utilizaron el elemento finito SOLID65 (ver apartado 4.3 del capítulo 4). Este elemento tiene la capacidad de incorporar refuerzo del tipo disperso (*smearred*) que es precisamente el que corresponde al refuerzo de fibras de acero.

En base a los trabajos de estos investigadores, se establece que para caracterizar al hormigón reforzado con fibras de acero en ANSYS, son requeridos los siguientes elementos:

- Las propiedades elásticas del material, como ser módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson.
- Las resistencias uniaxiales a tracción y a compresión del hormigón reforzado con fibras de acero.

- Definir los coeficientes *Open shear transfer coefficient* “ β_t ” y *Closed shear transfer coefficient* “ β_c ” (ver apartado 4.3 del capítulo 4).
- Un criterio de falla.
- Una rama en compresión de la curva tensión-deformación, obtenida experimentalmente para un hormigón al cual se le incorporó fibras de acero, según los criterios del tipo y volumen definidos por el investigador.
- Una cuantía de refuerzo disperso que emula las fibras de acero añadidas a la matriz de hormigón. Esta cuantía es distribuida de forma igualitaria en tres direcciones ortogonales entre sí.

Con referencia al criterio de falla, el mismo corresponde al apartado 3.2.3 descrito precedentemente.

En lo que respecta a la mencionada cuantía de refuerzo disperso, se seguirán los lineamientos definidos en el trabajo de Huang V.Z. (1995). Este investigador determinó una expresión analítica para calcular la cuantía de refuerzo disperso que emula las fibras de acero, tomando en cuenta el aporte de las resistencias tanto de la matriz de hormigón como de las fibras de acero (ver apartado 3.4.4). La expresión analítica determinada por Huang V.Z (1995), es empleada por otros investigadores tales como de Ribeiro *et al* (2009), Ribeiro y Serna (2009) y Núñez López (2011) que modelaron elementos de hormigón reforzado con fibras de acero en ANSYS.

3.4.3. Curva tensión - deformación para un hormigón reforzado con fibras de acero

En caso de no contar con curvas tensión – deformación obtenidas experimentalmente, numerosos autores propusieron curvas tensión-deformación para hormigones reforzados con fibras de acero, unos con fines de diseño y otros para modelar por medio de elementos finitos elementos reforzados con estas fibras. Destacamos las curvas tensión-deformación propuestas por RILEM TC 162-TDF (Vandewalle, 2003) y por Soroushian (1989).

a) Curva tensión-deformación propuesta por Soroushian

Soroushian propone un modelo de curva-tensión deformación para hormigones reforzados con fibras de acero, el cual toma en cuenta la esbeltez y la forma de las fibras (Soroushian, 1989).

Este modelo está compuesto por ramas en compresión y en tracción, siendo la rama en compresión mostrada en la figura 3.16.

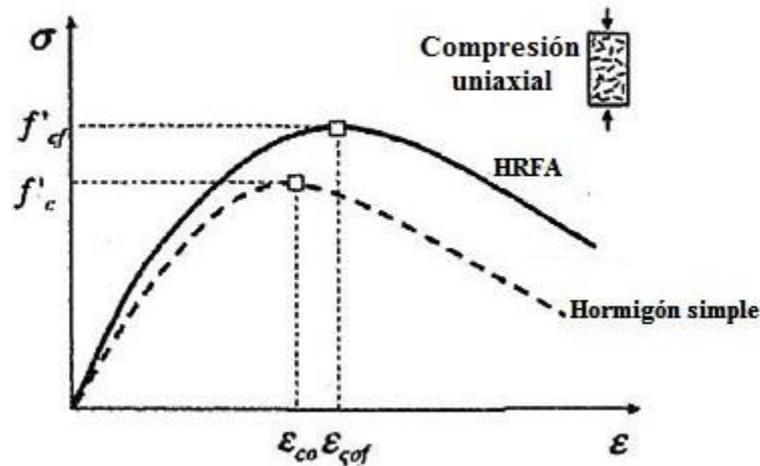


Figura 3.16: Curva tensión-deformación propuesta por Soroushian para un hormigón reforzado con fibras de acero, rama en compresión (Choi *et al*, 2007).

La rama en compresión (ver figura 3.16) se constituye en una curva parabólica sin quiebres que es generada a partir de (3.37).

$$\sigma_c(\varepsilon) = f'_{cf} \left[2 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{cof}} \right) - \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{cof}} \right)^2 \right] \quad (3.37)$$

Donde:

$\sigma_c(\varepsilon)$ Esfuerzo de compresión para una deformación ε , [MPa].

ε_{cof} Deformación a la cual se alcanza el esfuerzo de compresión pico f'_{cf} .

f'_{cf} Esfuerzo de compresión pico del hormigón reforzado con fibras de acero [MPa].

El valor numérico de ε_{cof} es determinado por medio de (3.38).

$$\varepsilon_{cof} = \frac{2f'_c}{E_c} + 0.0007 \left(V_f \frac{L}{D} \right) \quad (3.38)$$

Donde:

f'_c Resistencia cilíndrica a compresión uniaxial del hormigón simple [MPa].

E_c Módulo elástico del hormigón simple [MPa].

V_f Volumen de fibras de acero adicionadas al hormigón [%].

L Longitud de la fibra [mm].

D Diámetro de la fibra [mm].

A su vez, el valor de la resistencia a compresión pico del hormigón reforzado con fibras de acero, es determinado por medio de (3.39).

$$f'_{cf} = 1.9V_f(L/D)\beta + f'_c \quad (3.39)$$

Donde:

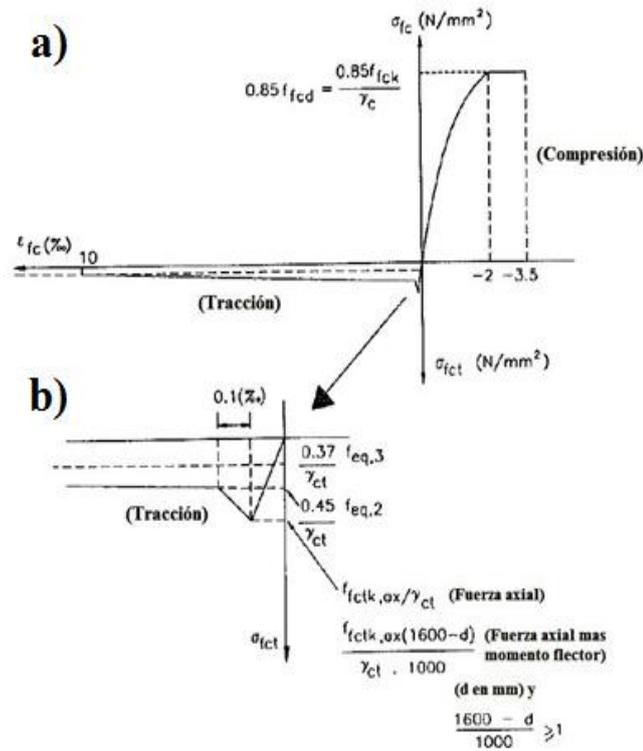
β Coeficiente que depende de la forma de la fibra, adoptándose el valor de 1 para fibras con ganchos en los extremos, 2/3 para fibras rectas con sección transversal redonda y 3/4 para fibras con ganchos, adicionadas a hormigones ligeros.

b) Curva tensión-deformación propuesta por RILEM TC 162-TDF

Con la finalidad de proporcionar una guía de diseño en la cual se empleé el hormigón reforzado con fibras de acero de forma eficiente y segura, RILEM presentó dos métodos de diseño; el primero basado en una curva tensión – deformación ($\sigma - \varepsilon$) (Vandewalle, 2003) y el segundo basado en una curva tensión – apertura de fisura ($\sigma - w$) (Vandewalle, 2002).

En el método $\sigma - \varepsilon$ se presenta una curva tensión-deformación que caracteriza al hormigón reforzado con fibras de acero (ver figura 3.17). En esta curva la rama en compresión, está conformada por una curva parabólica hasta alcanzar el esfuerzo a compresión pico, a lo cual continúa un comportamiento plástico perfecto (Vandewalle, 2003).

En la rama en tracción, se presenta un comportamiento elástico lineal hasta que se alcanza la resistencia a tracción del material, posteriormente se produce una disminución gradual en la resistencia.



γ_c : Factor de seguridad parcial del HRFA en compresión.

γ_f : Factor de seguridad parcial del HRFA en tracción.

f_{fck} : Resistencia característica del HRFA en compresión uniaxial.

f_{fcd} : Resistencia de diseño del HRFA en compresión uniaxial.

$f_{eq,2}, f_{eq,3}$: Factores que representan la capacidad de absorción de energía provista por las fibras de acero.

Figura 3.17: Curva tensión-deformación propuesta por RILEM para un hormigón reforzado con fibras de acero a) Curva completa b) Rama en tracción (Vandewalle, 2003).

3.4.4. Refuerzo equivalente disperso que emula las fibras de acero añadidas al hormigón.

La adición de fibras de acero al hormigón es realizada en base a porcentajes V_f que define el investigador en base a ensayos realizados o por medio de recomendaciones dadas por reglamentos técnicos. Estos porcentajes son obtenidos como el cociente entre el volumen de las fibras de acero añadido y el volumen de hormigón (Demagistri, 2013).

$$V_f[\%] = \frac{\text{Volumen fibras de acero}}{\text{Volumen de hormigón}} \times 100\% \tag{3.40}$$

Lo que se busca en la actualidad, es que el porcentaje V_f sea determinado por medio de los principios de la resistencia de materiales, es decir que en base al esfuerzo de tracción que puede absorber el HRFA, se determine analíticamente el volumen de fibras a ser añadido.

En el apartado 3.2.4 se indica que, el hormigón simple es modelado en ANSYS por medio del elemento SOLID65. De manera similar el hormigón reforzado con fibras de acero también es modelado por medio de este elemento, pero se le debe adicionar una cuantía de refuerzo distribuida en tres direcciones. Esta cuantía de refuerzo emula el volumen de fibras de acero añadidas a la matriz de hormigón y le proporciona ductilidad.

Para determinar la mencionada cuantía de refuerzo, se decidió emplear el modelo de Huang V.Z. (1995), quién en su tesis doctoral estudió el comportamiento de losas de hormigón reforzado con fibras de acero empleando ANSYS y determinó una expresión analítica para calcular esta cuantía, a la que denominó “refuerzo equivalente disperso” ρ_s y que es calculada por medio de (3.50). En el modelo de Huang es prioritaria la determinación de la resistencia residual a tracción $\beta_{Z,f}$ del elemento reforzado con fibras de acero, la cual puede ser obtenida por medio del ensayo de flexo tracción con aplicación de carga en cuatro puntos, realizado a probetas prismáticas de 15 x 15 x 70 centímetros (DAfStB, 2012). Como resultado de este ensayo, se obtienen curvas carga-deflexión como la mostrada en la figura 3.18.

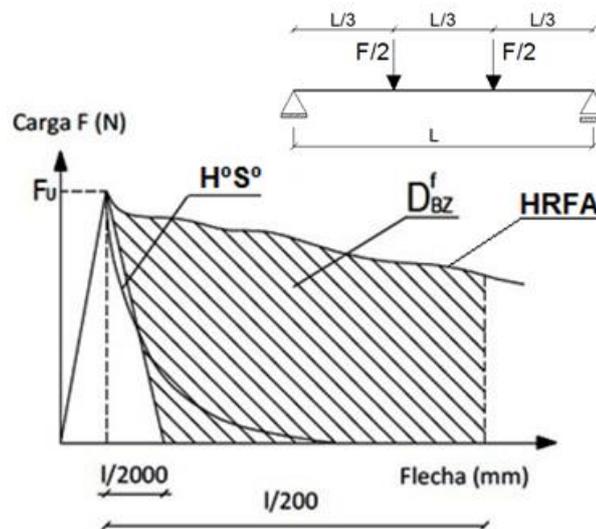


Figura 3.18: Diagrama para la determinación de $Equ\beta_{BZ}$ y D_{BZ}^F (Huang V.Z, 1995).

En la figura 3.18 el área sombreada corresponde a D_{BZ}^F y representa la contribución de las fibras de acero a la capacidad del elemento estructural de absorber energía de fractura mientras que el sector no sombreado es el aporte del hormigón simple. De acuerdo con Huang V.Z.

(1995), el hormigón reforzado con fibras de acero es simulado teniendo en cuenta la resistencia a tracción del hormigón a primera fisura, β_{BZ} que es calculada por medio del ensayo a flexo tracción y considerando un diagrama triangular de tensiones. La capacidad de disipación de energía D_{BZ}^F aportada por la fibras de acero después de la primera fisura se incluye considerando la resistencia residual equivalente $Equ\beta_{BF}$ (Núñez López, 2011). A su vez la resistencia residual equivalente es determinada por medio de (3.41).

$$Equ\beta_{BZ} = \frac{M}{W} = \frac{M}{\frac{b \cdot h^2}{6}} = \frac{6 \cdot M}{b \cdot h^2} \tag{3.41}$$

Donde:

- M Momento flector ocasionado por las cargas externas.
- W Módulo resistente de la sección transversal.
- b Base de la sección transversal.
- h Altura de la sección transversal.

En el comportamiento posterior a la fisuración, debe evaluarse el valor de la resistencia residual a tracción $\beta_{Z,f}$, para este fin se muestra en la figura 3.19 una sección transversal de un elemento de hormigón reforzado con fibras de acero al cual se aplica un momento externo M^I que debe ser igualado al momento interior M^{II} , que es posterior a la fisuración.

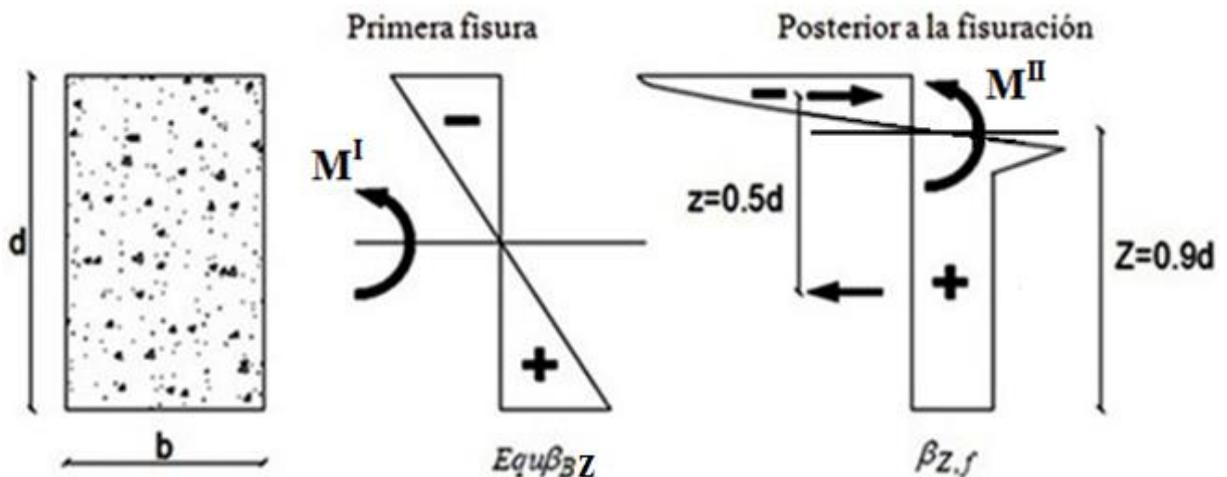


Figura 3.19: Determinación de la resistencia del HRFA después de fisurar (Huang V.Z, 1995).

De acuerdo con la figura 3.19:

$$M^I = Equ\beta_{BZ} \cdot W = Equ\beta_{BZ} \frac{b \cdot d^2}{6} \quad (3.42)$$

$$M^{II} = zZ\beta_{Z,f}b = 0.5d \cdot 0.9d\beta_{Z,f}b = 0.45d^2\beta_{Z,f}b \quad (3.43)$$

Se establece que: $M^I = M^{II}$

$$Equ\beta_{BZ} \frac{b \cdot d^2}{6} = 0.45d^2\beta_{Z,f}b \quad (3.44)$$

Despejando $\beta_{Z,f}$ de (3.44), se obtiene:

$$\beta_{Z,f} = 0.37Equ\beta_{BZ} \quad (3.45)$$

En caso de no contar con ensayos experimentales para determinar la resistencia residual a tracción $\beta_{Z,f}$, Huang V.Z. (1995) propone la expresión (3.46) mediante la cual puede calcularse este valor; en base al tipo y al volumen de fibras adicionadas como así también en base a la resistencia característica del hormigón a compresión.

$$\beta_{Z,f} = kV_f(1 - kV_f)\beta_{WN}^{2/3} \quad (3.46)$$

Donde:

$\beta_{Z,f}$ Resistencia residual a tracción del HRFA.

V_f Fracción que indica el volumen de adición de fibras al hormigón.

β_{WN} Resistencia cilíndrica a compresión del hormigón.

k Factor que toma en cuenta la forma de la fibra.

$$k = 0.3 \cdot \frac{l}{d}$$

l Longitud de la fibra.

d Diámetro de la fibra.

A su vez, el reglamento alemán DAfStB (2012) presenta la expresión (3.47) mediante la cual también puede aproximarse el valor de la resistencia residual a tracción del hormigón reforzado con fibras de acero.

$$f_{ctR,u}^f = \kappa_F^f \kappa_G^f f_{ct0,u}^f \tag{3.47}$$

Donde:

$f_{ctR,u}^f$ Valor de diseño de la resistencia a tracción post agrietamiento en el estado límite último.

κ_F^f Factor que considera la orientación de la fibra, se le asigna un valor igual a 1 para losas.

κ_G^f Factor que considera la influencia del tamaño del espécimen (ver apartado A4.6 del anexo 4).

A_c Área de la sección transversal de la viga prismática de hormigón.

$f_{ct0,u}^f$ Valor de la resistencia a tracción post agrietamiento del HRFA, que debe ser determinado experimentalmente por medio de ensayos de flexo tracción con aplicación de carga en cuatro puntos, realizados en al menos 6 vigas de 15 x 15 x 70 cm (Tazaly, 2011).

La determinación del parámetro $f_{ct0,u}^f$ es compleja y requiere necesariamente resultados experimentales. Para salvar este problema, Tazaly (2011) determinó que este parámetro puede ser aproximado con gran exactitud por medio de la resistencia a tracción post agrietamiento f_{pc} propuesta por Choi *et al* (2007) (ver apartado A4.6 del anexo 4).

Una vez determinada la resistencia residual a tracción necesaria para la determinación del refuerzo ρ_s , Huang V.Z. (1995) emplea el diagrama mostrado en la figura 3.20, en el cual se muestra una distribución rectangular de la resistencia residual a tracción del hormigón, encontrándose el eje neutro a una distancia $0.9 \cdot d$ de la fibra traccionada inferior.

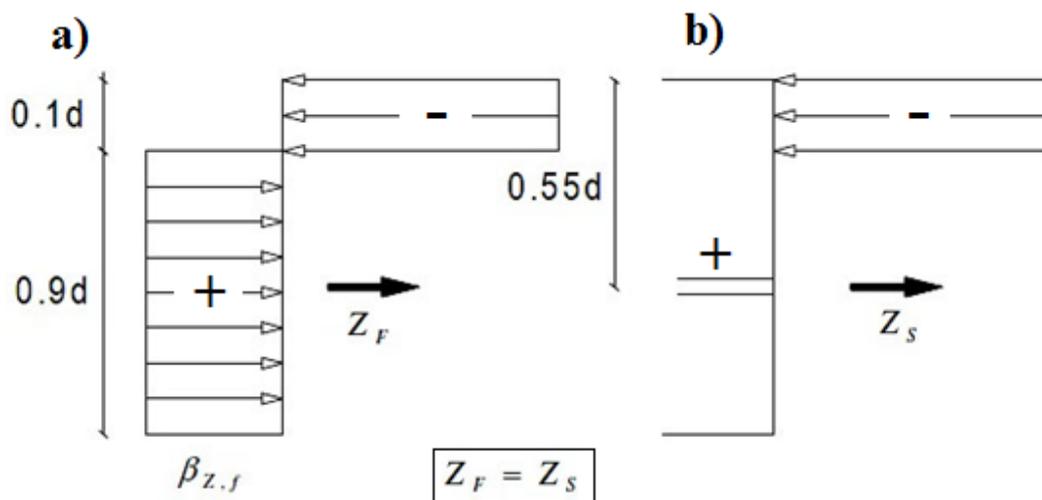


Figura 3.20: Distribución de tensiones residuales en la sección transversal de una viga de HRFA
 a) Distribución en el hormigón b) Distribución en las fibras (Huang V.Z, 1995).

A partir de esta consideración, se iguala la fuerza de tracción equivalente que actúa en el hormigón Z_F con la fuerza de tracción equivalente que absorben las fibras de acero Z_S .

$$Z_F = 0.9db\beta_{Z,f} \tag{3.48}$$

$$Z_S = \bar{A}_s \bar{\beta}_s \tag{3.49}$$

Siendo: $\bar{\rho}_s = \frac{\bar{A}_s}{0.9db}$ (ver figura 3.20).

Igualando: $Z_F = Z_S$

Se obtiene:

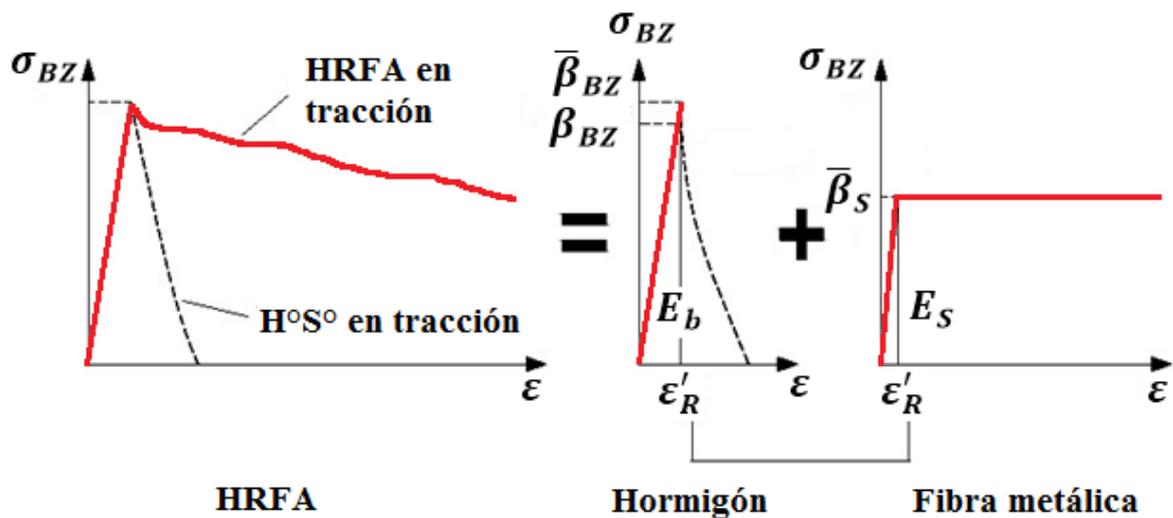
$$\bar{\rho}_s = \frac{\beta_{Z,f}}{\bar{\beta}_s} \tag{3.50}$$

Donde:

$\bar{\rho}_s$ Refuerzo disperso equivalente de fibras de acero.

$\bar{\beta}_s$ Límite elástico de las fibras de acero determinado para una deformación del hormigón a primera fisura $\epsilon'_R = 0.2\%$ (Núñez López, 2011).

$\beta_{Z,f}$ Resistencia residual a tracción del HRFA.



Nota: $\bar{\beta}_{BZ} = 1.15\beta_{BZ}$

Figura 3.21: Descripción del comportamiento del HRFA en tracción, de acuerdo con el modelo de Huang (Huang V.Z, 1995).

En la figura 3.21 se resume el comportamiento del hormigón reforzado con fibras de acero en tracción, de acuerdo con el modelo de Huang V.Z. (1995). Puede apreciarse que una vez

alcanzada la deformación a primera fisura ε'_R , el comportamiento del hormigón deja de ser elástico lineal y es a partir de este punto en que las fibras aportan ductilidad al hormigón; siendo la resistencia del material igual a la suma de las resistencias del hormigón y de las fibras de acero.

Se indica que a las fibras se les asigna un comportamiento elastoplástico perfecto teniendo como criterio de falla el de Von Mises y que la cuantía ρ_s , debe ser distribuida de manera igualitaria en tres direcciones ortogonales (Núñez López, 2011) que son en las que se orientan las fibras cuando el hormigón es vertido en los encofrados.

CAPITULO 4

PROCEDIMIENTO NUMÉRICO

4.1. INTRODUCCIÓN

En los apartados 3.2.4 y 3.3.3 del capítulo 3, se da a conocer el empleo de los elementos SOLID65 y LINK180 de la biblioteca de ANSYS, para caracterizar al hormigón simple y a las barras de acero de dureza natural que constituyen la armadura de refuerzo por tracción (respectivamente). El empleo de ambos elementos, permite generar modelos de estructuras de hormigón armado como así también de hormigón armado reforzado con fibras de acero

En este capítulo se explican en detalle ambos elementos y la técnica numérica empleada en ANSYS para obtener la solución del problema.

4.2. CONFORMACIÓN DE UN ELEMENTO FINITO EN ANSYS

La utilización de un elemento de la biblioteca de ANSYS, requiere que se definan sus propiedades geométricas, elásticas y su comportamiento mecánico.

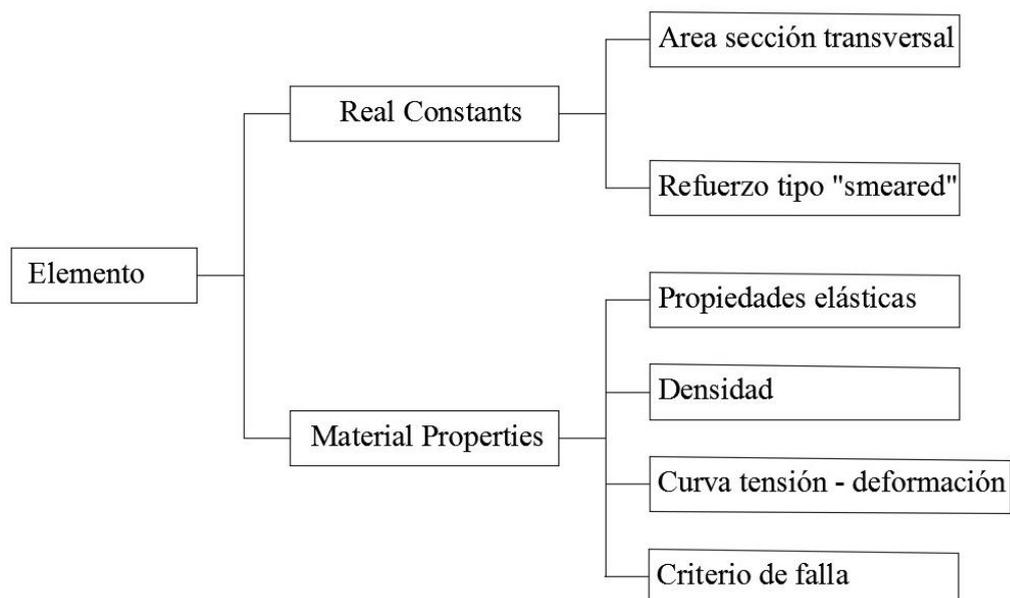


Figura 4.1: Datos de entrada para conformar un elemento finito en ANSYS

En la figura 4.1 se resumen los datos de ingreso que son requeridos, siendo los mismos los constituidos por *Real Constant* y por *Material Properties*.

Real Constant agrupa todo lo referente a las propiedades geométricas, como ser el área de sección transversal del elemento y también, la armadura de refuerzo dispersa (*smearred*) que es incluida (dependiendo de si el elemento posee esa característica).

A su vez, *Material Properties* comprende las propiedades elásticas y el comportamiento mecánico del material.

4.3. ELEMENTO SOLID65

El elemento SOLID65 fue concebido para la modelación de materiales cuasi frágiles como el hormigón y los cerámicos, siendo empleado también para modelar el comportamiento mecánico de rocas.

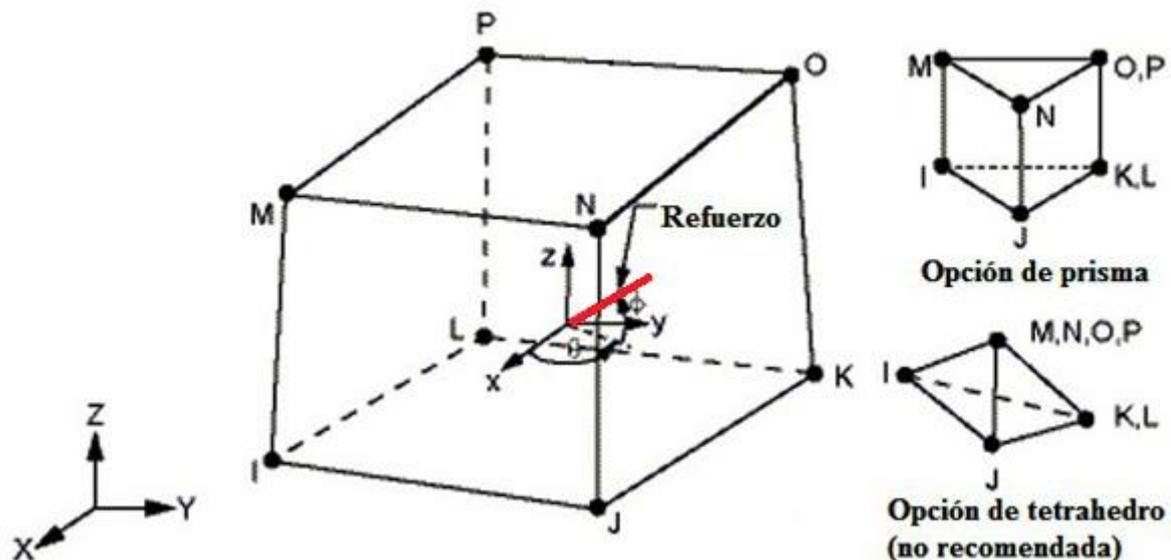


Figura 4.2: Elemento SOLID65 (ANSYS Inc., 2009).

Este elemento es del tipo *brick* compuesto por ocho nodos (ver figura 4.2), donde cada uno posee tres grados de libertad, que son desplazamientos a lo largo de los ejes X, Y, Z.

En función a la malla de elementos finitos del modelo a generar, este elemento también puede tener la forma de un prisma o de un tetraedro.

Las propiedades elásticas que definen este elemento deben ser isótropas, siendo el mismo capaz de agrietarse en tracción (en tres direcciones ortogonales), aplastarse en compresión, presentar deformaciones plásticas y tener características reológicas como la fluencia.

Este elemento tiene la característica de incluir armadura de fuerza (*rebar*) la misma que puede ser del tipo discreto o disperso (*smeared*). La armadura del tipo discreto será explicada en los siguientes incisos y está vinculada con elemento LINK180.

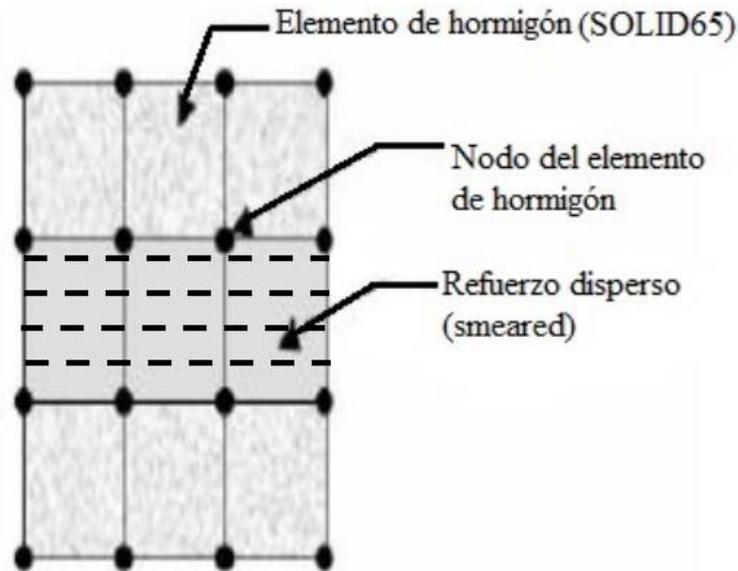


Figura 4.3: Idealización del refuerzo disperso en ANSYS (Tavarez, 2001).

La armadura de tipo disperso como la mostrada en la figura 4.3, es el refuerzo distribuido en el volumen de la matriz de hormigón en una cantidad definida por *volumen ratio* (razón volumétrica) V_r que es el cociente entre el volumen de la armadura de refuerzo y el volumen total del elemento.

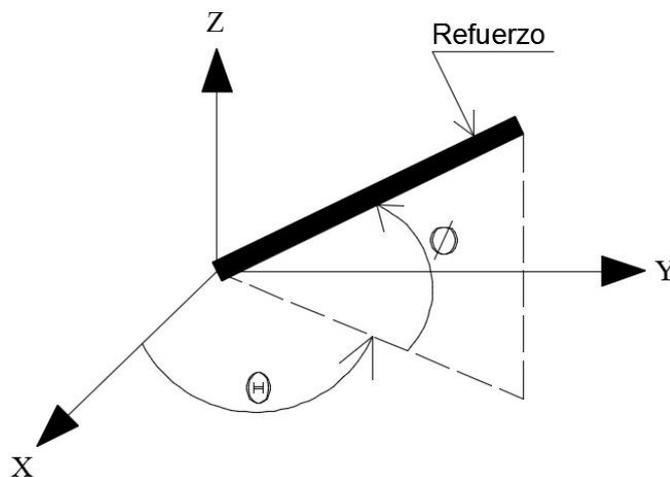


Figura 4.4: Orientación del refuerzo disperso en SOLID65.

ANSYS tiene la capacidad de incorporar en un elemento SOLID65 hasta tres refuerzos dispersos, que pueden ser de materiales diferentes, cada uno dotado de sus propiedades elásticas y comportamiento mecánico. Cabe indicar que para cada refuerzo disperso, debe definirse su orientación por medio de los ángulos θ y ϕ (en grados sexagesimales) tal como es indicado en la figura 4.4.

En el apartado 3.4.4 del capítulo 3, referente al refuerzo equivalente disperso que emula las fibras de acero añadidas a la matriz de hormigón; se explicó el procedimiento para la determinación de este refuerzo, que es expresado por medio de ρ_s .

Teniendo esto en cuenta, el valor de ρ_s y su distribución en el elemento al que se adicionó las fibras de acero; son incorporados en ANSYS por medio de *volumen ratio* V_r y por los ángulos θ y ϕ de los *real constant* de SOLID65, que es mostrado en la figura 4.5, donde se resume todo lo indicado en los párrafos precedentes.

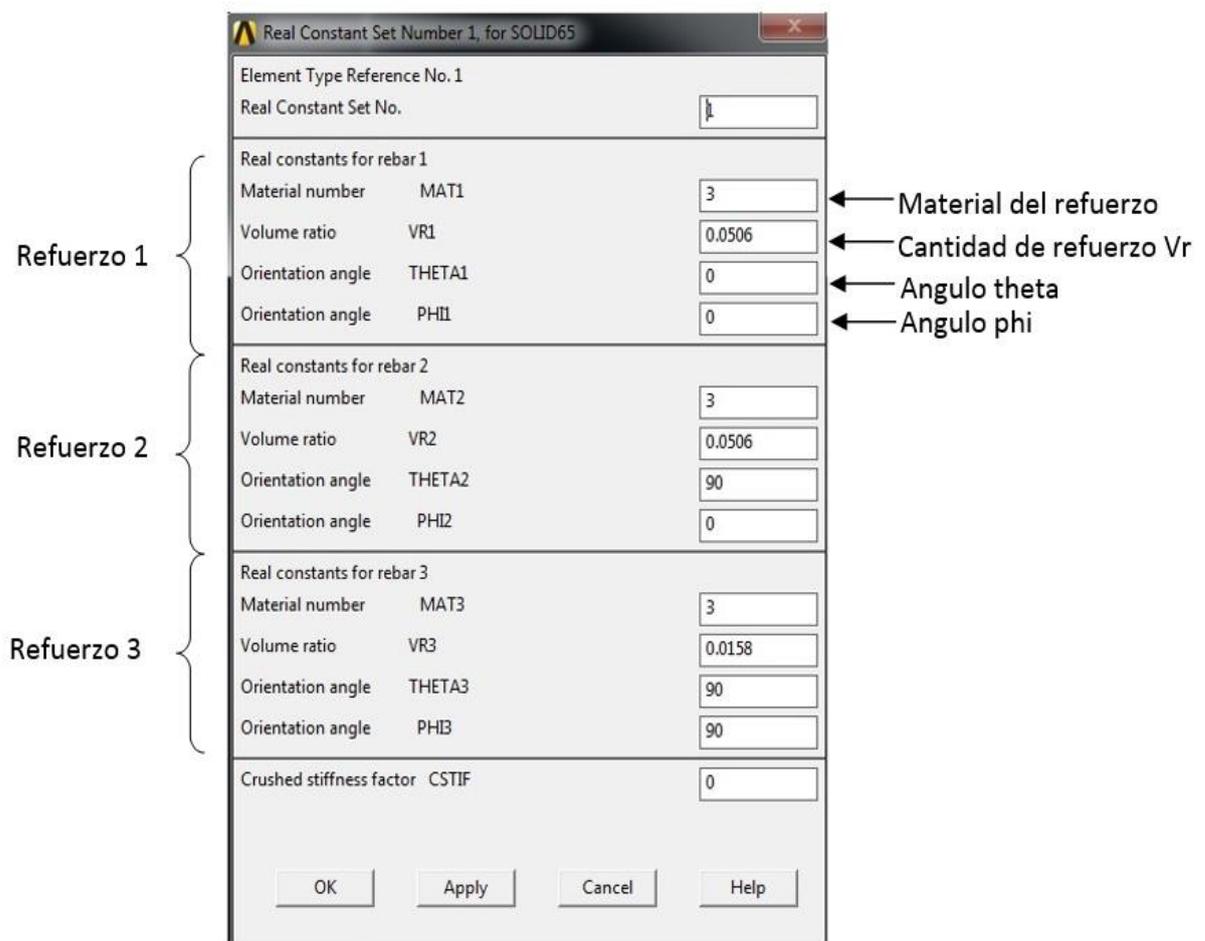


Figura 4.5: Ventana de *real constant* del elemento SOLID65.

A su vez, en el apartado 3.2.3 del capítulo 3 referente al criterio de falla de Willam y Warnke de cinco parámetros, queda establecido que deben ser definidas de manera obligatoria las resistencias a tracción y compresión uniaxial del material, debiendo definirse también; si el estado de tensiones hidrostáticas es bajo o alto (como es el caso de grandes volúmenes de hormigón en masa empleados en presas de gravedad) para que sea cumplida la ecuación (3.12).

En esta tesis, la ecuación (3.12) es cumplida, por lo cual son tomadas como válidas las ecuaciones (3.9), (3.10) y (3.11).

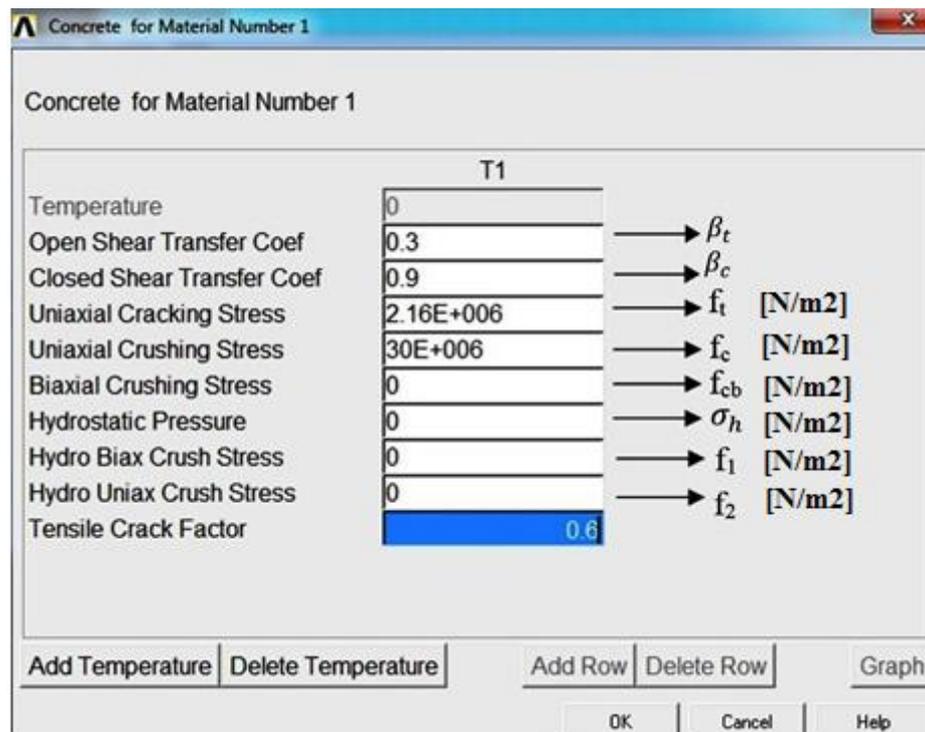


Figura 4.6: Ventana donde se define el criterio de falla de Willam y Warnke que emplea el elemento SOLID65.

En la figura 4.6, se muestra la ventana en la cual son definidos los cinco parámetros del criterio de Willam y Warnke que se emplea, haciendo notar que la presencia de ceros en las casillas no expresa la anulación de la propiedad, sino que instruye a ANSYS adoptar los valores definidos por defecto. En esta figura se aprecian las casillas *Open shear transfer coeficient* “ β_t ” y *Closed shear transfer coeficient* “ β_c ”, que se refieren a los coeficientes de transferencia de cortante para fisura abierta y cerrada respectivamente. Para comprender la función de cumplen estos coeficientes, debemos referirnos al apartado 2.1 del capítulo 2, en el cual se explica el

fenómeno del punzonamiento en losas de hormigón armado, indicando que una vez que se produce el agrietamiento del material, acompañado por la presencia de grietas inclinadas en las proximidades de la unión losa – columna; la trabazón que existe entre los agregados de la matriz de hormigón ofrece resistencia a la propagación de las fisuras, siendo este aporte lo que intentan reflejar. A ambos coeficientes se les asignan valores comprendidos entre 0.0 y 1.0, correspondiendo al valor de 0.0 un agrietamiento suave (representa la pérdida completa de la transferencia de cortante) y para el valor 1.0 un agrietamiento áspero (no se pierde la transferencia de cortante) (ANSYS Inc., 2009). De esta forma, se asigna un valor de 0.3 para el *Open shear transfer coef*, siendo recomendado que su valor se encuentre entre 0.05 y 0.3 (Bangash, 2001) y a su vez, para el *Closed shear transfer coef*, se asigna un valor de 0.9, indicándose también, que se recomienda que su valor se encuentre en el rango de 0.9 y 1 (Zhang, 2004).

4.4. ELEMENTO LINK180

En lo referente al refuerzo discreto, constituido por las barras de acero conformado dispuestas como armadura de refuerzo por tracción, el apartado 3.3 del capítulo 3 hace referencia a su caracterización mecánica y se indica que su modelación en ANSYS es realizada por medio del elemento LINK180.

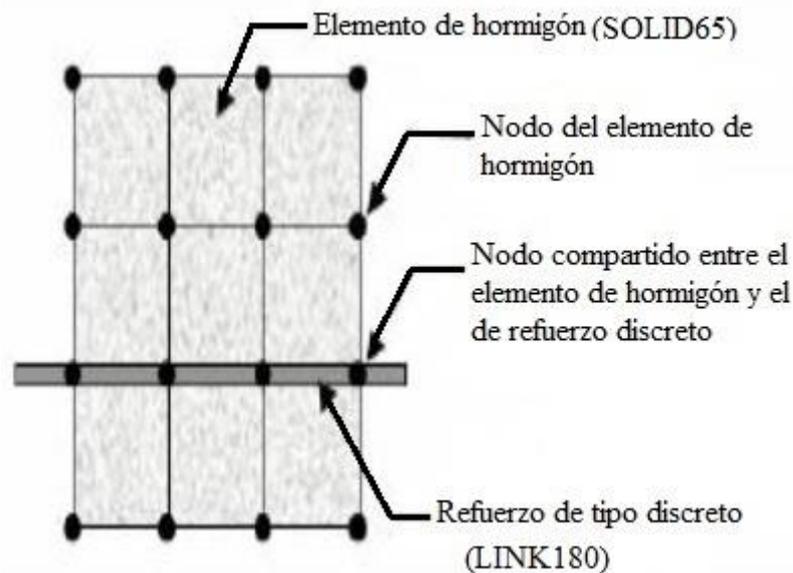


Figura 4.7: Idealización del refuerzo discreto en ANSYS (Tavarez, 2001).

Como se observa en la figura 4.7, una vez definida la matriz de hormigón por medio de elementos SOLID65, se procede a generar el refuerzo discreto que se constituye en una sucesión

de elementos LINK180 cuyos nodos deben ser coincidentes con los de los elementos SOLID65, para garantizar la adherencia entre el acero de refuerzo y el hormigón; y evitar el problema del deslizamiento (*bond-slip*).

El elemento LINK180, cuya geometría es mostrada en la figura 4.8, es un elemento unidimensional compuesto por dos nodos con tres grados de libertad cada uno. Estos grados de libertad son desplazamientos en los ejes X, Y, Z.

Este elemento es ampliamente usado para la modelación de estructuras compuestas por barras, como ser reticulados; como así también en catenarias de cables y soportes. Esto se debe a que solo puede soportar esfuerzos axiales de tracción o compresión.

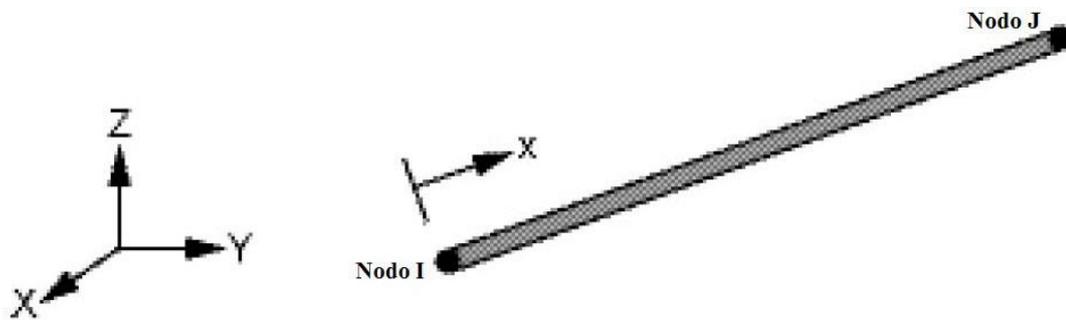


Figura 4.8: Elemento LINK180 (ANSYS Inc., 2009).

Tal como se indica en la figura 4.1, las *real constant* de este elemento son su área de sección transversal, que es igual al área de la barra de refuerzo en consideración; y sus *material properties* son las propiedades elásticas isotrópicas del acero de dureza natural y el comportamiento elasto plástico que se le asigna (ver apartado 3.3.2 del capítulo 3).

4.5. METODOLOGÍA NUMÉRICA Y CRITERIOS DE CONVERGENCIA

Dada la naturaleza no lineal de los modelos de elementos finitos generados, debe emplearse procedimientos numéricos iterativos para obtener la solución. ANSYS emplea el método de Newton – Raphson, en el cual la carga es subdividida en una serie de incrementos de carga. Los incrementos de carga pueden ser aplicados en una serie de pasos de carga (*load steps*). En la figura 4.9, se muestra el uso del método de Newton – Raphson en el análisis no lineal de un sistema de un grado de libertad.

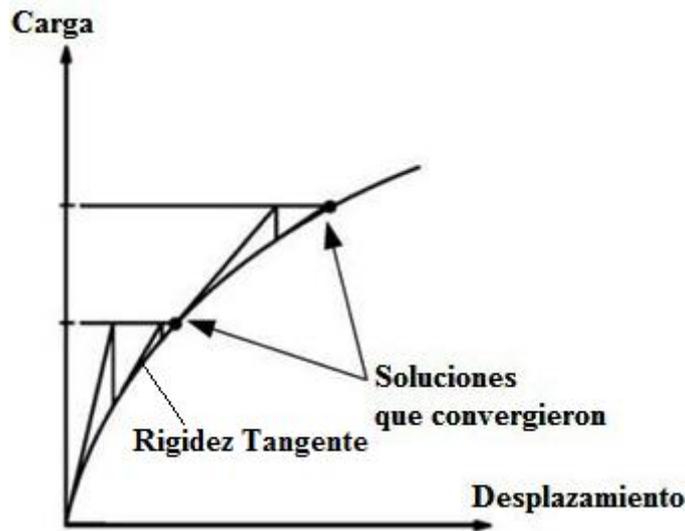


Figura 4.9: Método iterativo de Newton – Raphson (2 incrementos de carga) (ANSYS Inc., 2009).

En cada iteración de un incremento de carga, el método de Newton – Raphson evalúa el vector de fuerzas residuales, que es la diferencia entre las fuerzas internas (fuerzas correspondientes a las tensiones de los elementos) y las cargas aplicadas (cargas externas), a partir del cual se procede a controlar la convergencia.

Si los criterios de convergencia no son satisfechos, se reevalúa el vector de fuerzas residuales y se actualiza la matriz de rigidez, lo que conduce a obtener una nueva solución. Este proceso iterativo continúa hasta que el problema converja.

En esta tesis, uno de los principales problemas que tuvo que salvarse fue la falta de convergencia, debiéndose esto a la geometría de los modelos, condiciones de borde y cargas aplicadas. Los modelos generados tienen en promedio 7254 elementos y al menos 7500 nodos (con tres grados de libertad por nodo). Las condiciones de borde consistieron en la restricción de los grados de libertad de un número muy reducido de nodos (a lo sumo el 0.8% del total de los nodos), en función al tipo de apoyo de las estructuras ensayadas.

Las cargas aplicadas fueron elevadas, pues buscaban el colapso de las estructuras; y a su vez fueron aplicadas en áreas reducidas (cargas de punzonamiento).

Por lo indicado, se puede apreciar que ANSYS tuvo que generar matrices de rigidez muy grandes y afrontar las dificultades numéricas que conllevan la aplicación de cargas elevadas en áreas reducidas, pues esto se constituye en un problema numéricamente mal condicionado.

Para este fin, se instruyó a ANSYS aplicar técnicas numéricas complementarias al método de Newton – Raphson, con el fin de lograr la convergencia del problema. Estas técnicas fueron la búsqueda lineal (*line search*), la opción de predicción - corrección (*predictor – corrector option*), la definición automática del paso de carga (*automatic load steps*) y la aplicación del método de la bisección.

Con esto en mente, se estableció que el criterio de convergencia se base en la fuerza, dada su conveniencia en este tipo de problemas (Zhang, 2004). Estableciéndose como tolerancia un valor de 0.5/1000, que se complementó con la aplicación de la carga en intervalos muy pequeños, como ser de al menos 1/1000 (ver figura 4.10).

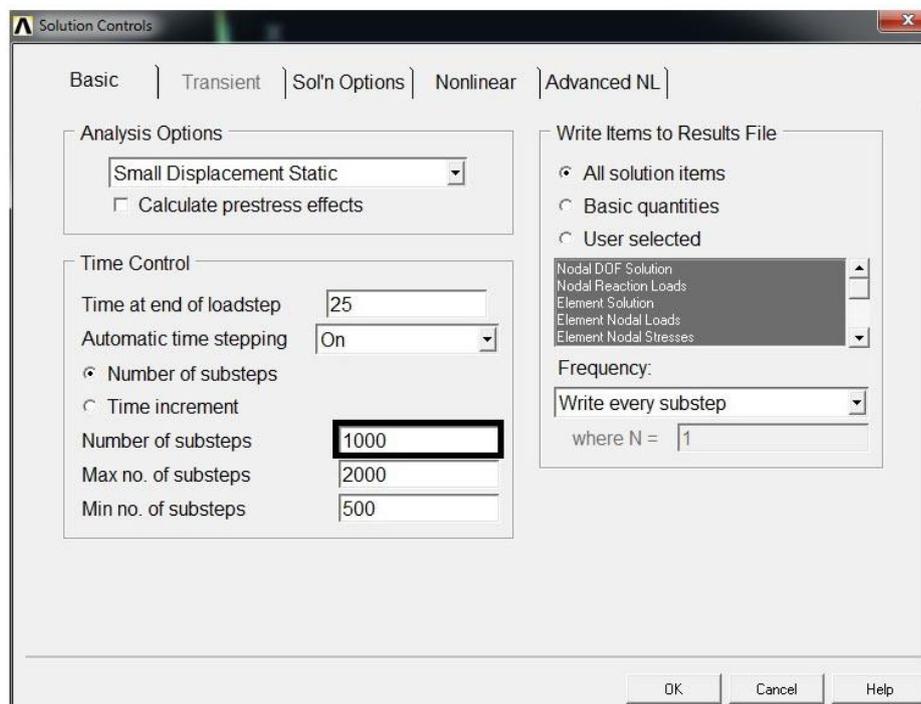


Figura 4.10: Definición de los pasos de aplicación de las cargas para los modelos generados.

CAPITULO 5

MODELOS DE ELEMENTOS FINITOS GENERADOS

5.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se describen los modelos de elementos finitos que fueron generados, haciendo énfasis en su finalidad, sus propiedades elásticas, geometría, tipo de refuerzo, condiciones de borde y cargas que les fueron impuestas.

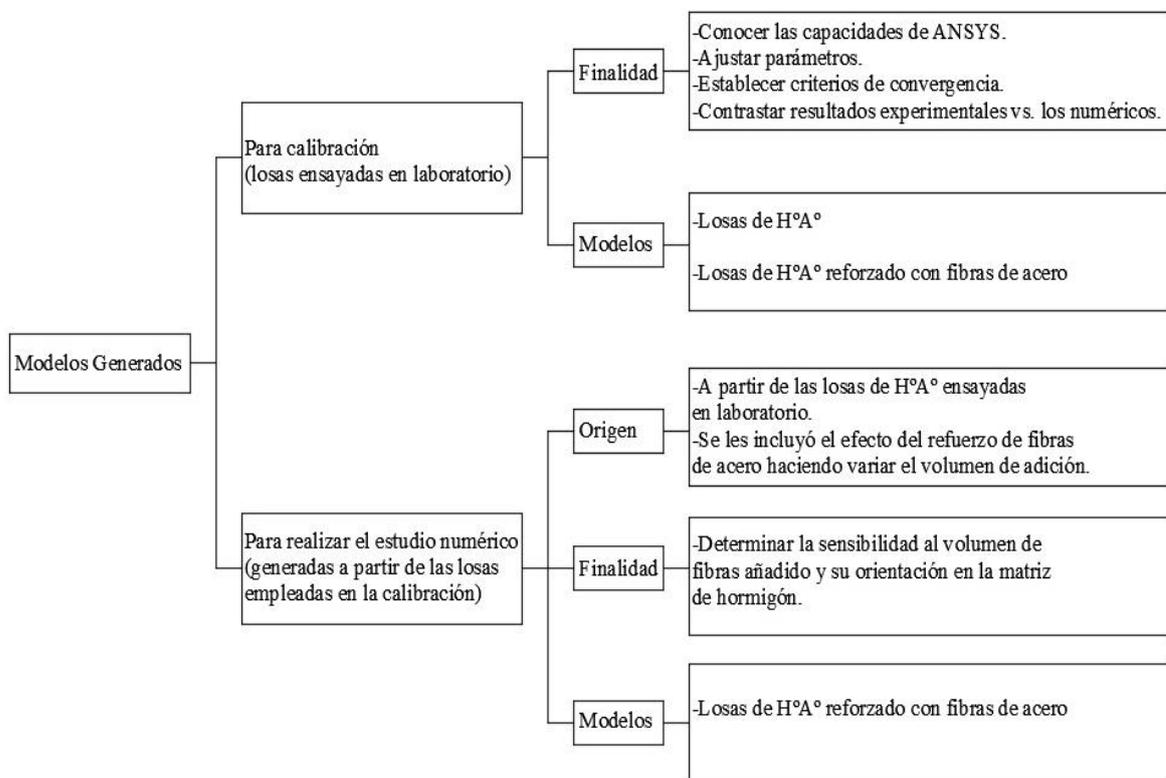


Figura 5.1: Esquema que resume la generación de modelos de elementos finitos llevada a cabo.

En este trabajo se emplearon 43 modelos de elementos finitos, que están divididos en dos grupos de acuerdo con la función que cumplen; siendo los mismos para calibración y para realizar el estudio numérico.

Como se indica en la figura 5.1, los modelos para calibración están basados en losas de hormigón armado y de hormigón armado reforzado con fibras de acero (con ganchos en sus extremos), que fueron ensayadas en laboratorio por otros investigadores con la finalidad de estudiar la falla por punzonamiento.

La realización de estos modelos permitió conocer cuan adecuado resulta el empleo de ANSYS en esta tesis, que debilidades presenta, saber si es capaz de obtener resultados similares a los obtenidos experimentalmente, ajustar parámetros que son de naturaleza empírica; como ser los *Open shear transfer coefficient* y *Closed shear transfer coefficient* y finalmente ajustar los criterios de convergencia necesarios para obtener la solución a los problemas. En este grupo se cuenta con 7 modelos (ver tablas 5.1 y 5.2).

Una vez que los resultados obtenidos fueron satisfactorios, se procedió a generar los modelos para el estudio numérico. Estos modelos están basados en la geometría, propiedades elásticas, condiciones de borde, cargas impuestas y armadura por tracción con la que cuentan los modelos para calibración. Tienen como variante la adición de fibras de acero (con ganchos en sus extremos) realizada de forma tal, que permite determinar su sensibilidad a los volúmenes añadidos y a su distribución en la matriz de hormigón. Estos modelos suman un número de 36 losas (ver tablas 5.7, 5.8 y 5.9).

5.2. MODELOS GENERADOS PARA CALIBRACIÓN

5.2.1. Losas de hormigón armado

Se ensayaron en el instituto de estructuras de la Universidad Nacional de Tucumán (U.N.T.), tres losas de hormigón armado de forma octogonal (ver figura 5.2), con la finalidad de estudiar experimentalmente el punzonamiento (Isla, 2008 y Villegas, 2009).

Estas losas estuvieron sujetas a la losa reactiva del laboratorio por medio de pernos de acero (ver figura 5.3), que se constituyeron en apoyos que restringían los desplazamientos verticales de las mismas. Las cargas impuestas, fueron aplicadas por medio de un actuador hidráulico al vástago de las columnas (de sección transversal circular), el mismo que se encontraba debajo de las losas, por cual debe incluirse en el análisis el peso propio de las mismas. Cabe destacar que la fricción entre el actuador hidráulico y el vástago de las columnas impedía el desplazamiento horizontal de las losas.

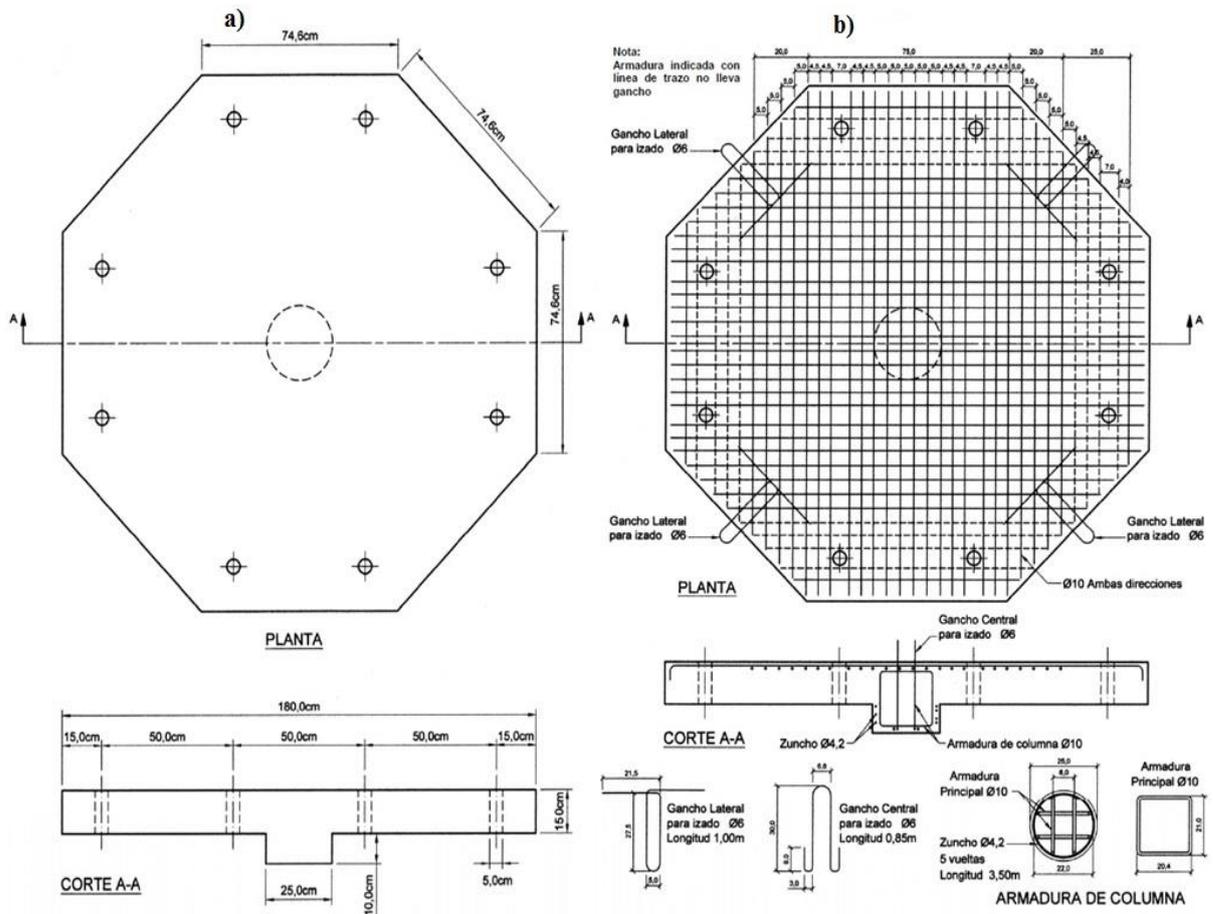


Figura 5.2: Losas ensayadas a) Geometría b) Armadura para la losa LT3 (Isla, 2008).



Figura 5.3: Montaje de las losas para su ensayo experimental (Isla, 2008).

El detalle de armado y las propiedades mecánicas más relevantes de estas losas, son indicados en la tabla 5.1.

Tabla 5.1. Detalle del armado y de las propiedades mecánicas de las losas de hormigón de armado

Losa	Espesor [cm]	Altura útil [cm]	Armadura	f'_c [MPa] (1)	f_t [MPa] (2)	E_c [MPa] (3)	f_y [MPa] (4)	E_s [GPa] (5)
LT1	15	12.5	Ø8c/10 cm	30	1.5	30000	420	210
LT2	15	12.5	Ø10c/10 cm	30	1.5	30000	420	210
LT3	15	12.5	Ø10c/5 cm	30	1.5	30000	420	210

(1) Resistencia cilíndrica a compresión del hormigón.

(2) Resistencia uniaxial a tracción del hormigón.

(3) Módulo de Young del hormigón.

(4) Límite de fluencia del acero de refuerzo.

(5) Módulo de Young del acero de refuerzo.

Cabe destacar que para facilitar el trabajo de modelación numérica, los valores de las resistencias cilíndricas a compresión, uniaxiales a tracción y los módulos de Young del hormigón de las losas LT1, LT2 y LT3 (columnas 1, 2 y 3 de la tabla 5.1) fueron asumidos como iguales.

En el apartado 3.2.1 del capítulo 3, se describieron los modelos teóricos que pueden ser empleados para la generación de la rama en compresión de la curva tensión – deformación del hormigón simple, que es uno de los elementos necesarios para modelar este material en ANSYS.

La utilización de esos modelos no permitió obtener un buen ajuste entre los resultados experimentales y los obtenidos numéricamente empleando ANSYS, por lo cual se decidió no continuar con su uso.

Para salvar esta dificultad, se generaron modelos de elementos finitos capaces de reproducir los ensayos a compresión y a tracción uniaxial al que son sujetas las probetas de hormigón, y a partir de los mismos, se obtuvieron las ramas en compresión y en tracción de las curvas tensión – deformación para el hormigón simple, las mismas que se presentan en la figura 5.4 y son las que se emplearon para la generación de los modelos LT1, LT2 y LT3 (ver tabla 5.1).

Mayores detalles sobre la generación de los modelos de elementos finitos que reproducen los ensayos a compresión y a tracción uniaxial a partir de los cuales se generaron las curvas mostradas en la figura 5.4, son presentados en el anexo 3.

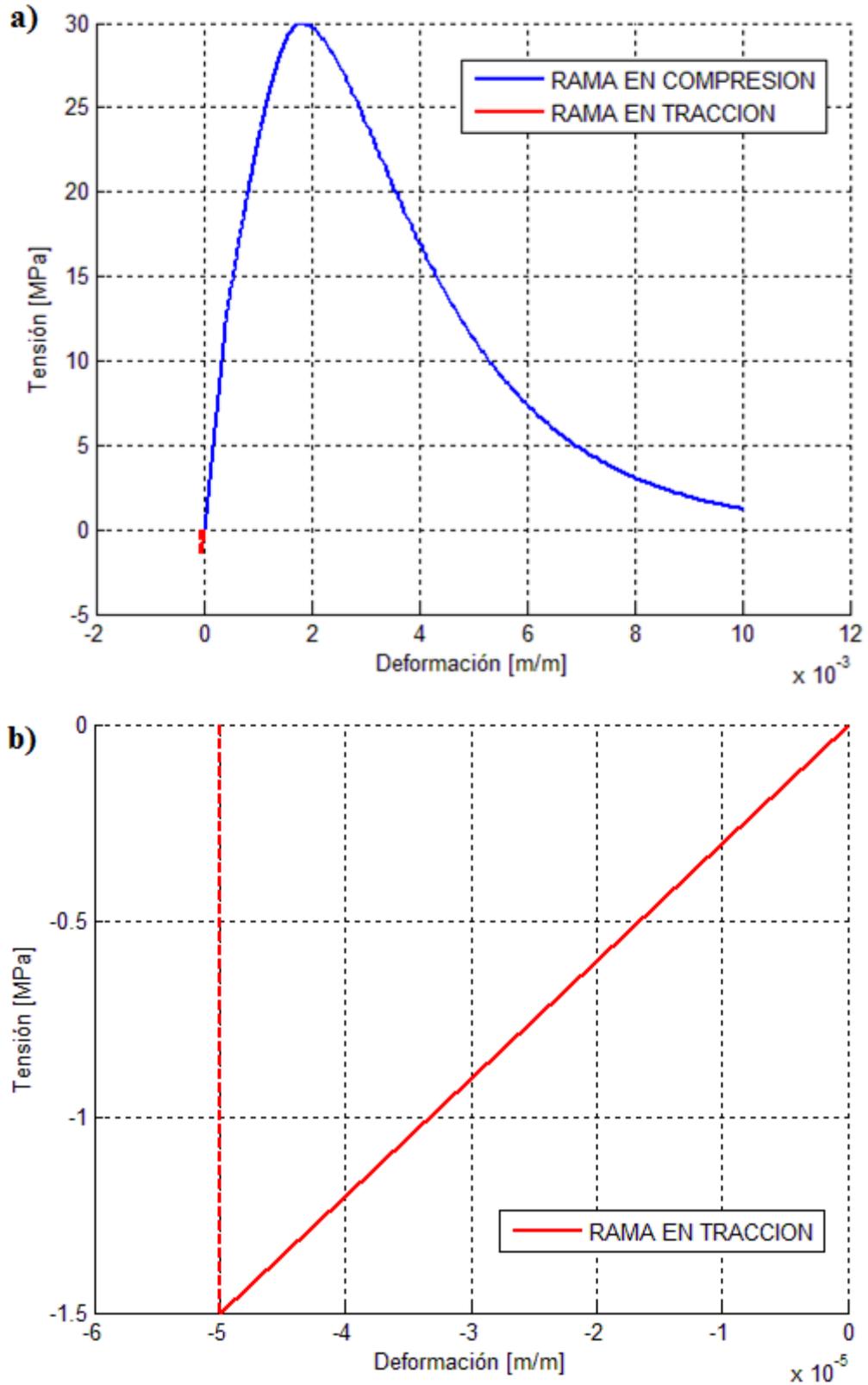


Figura 5.4: a) Curva tensión – deformación empleada para la generación de los modelos de las losas LT1, LT2 y LT3 b) Ampliación de la rama en tracción.

Como se aprecia en la figura 5.2, las losas indicadas en la tabla 5.1 son doblemente simétricas; lo cual permite generar los modelos a partir de una cuarta parte del total de las mismas. Una vez definida la geometría, se aplicaron las condiciones de borde y las cargas correspondientes.

La malla de elementos finitos está conformada por elementos SOLID65 de 2.5 x 2.5 x 2.5 cm y por elementos LINK180 de 2.5 cm de longitud. Se prescindió de las columnas circulares empotradas a las losas pues ocasionaban problemas en la discretización de las mallas.

Por este motivo las cargas fueron aplicadas en forma de desplazamientos impuestos en los nodos que se encuentran en el área cuadrada (equivalente al área circular de las columnas) comprendida por la unión losa – columna.

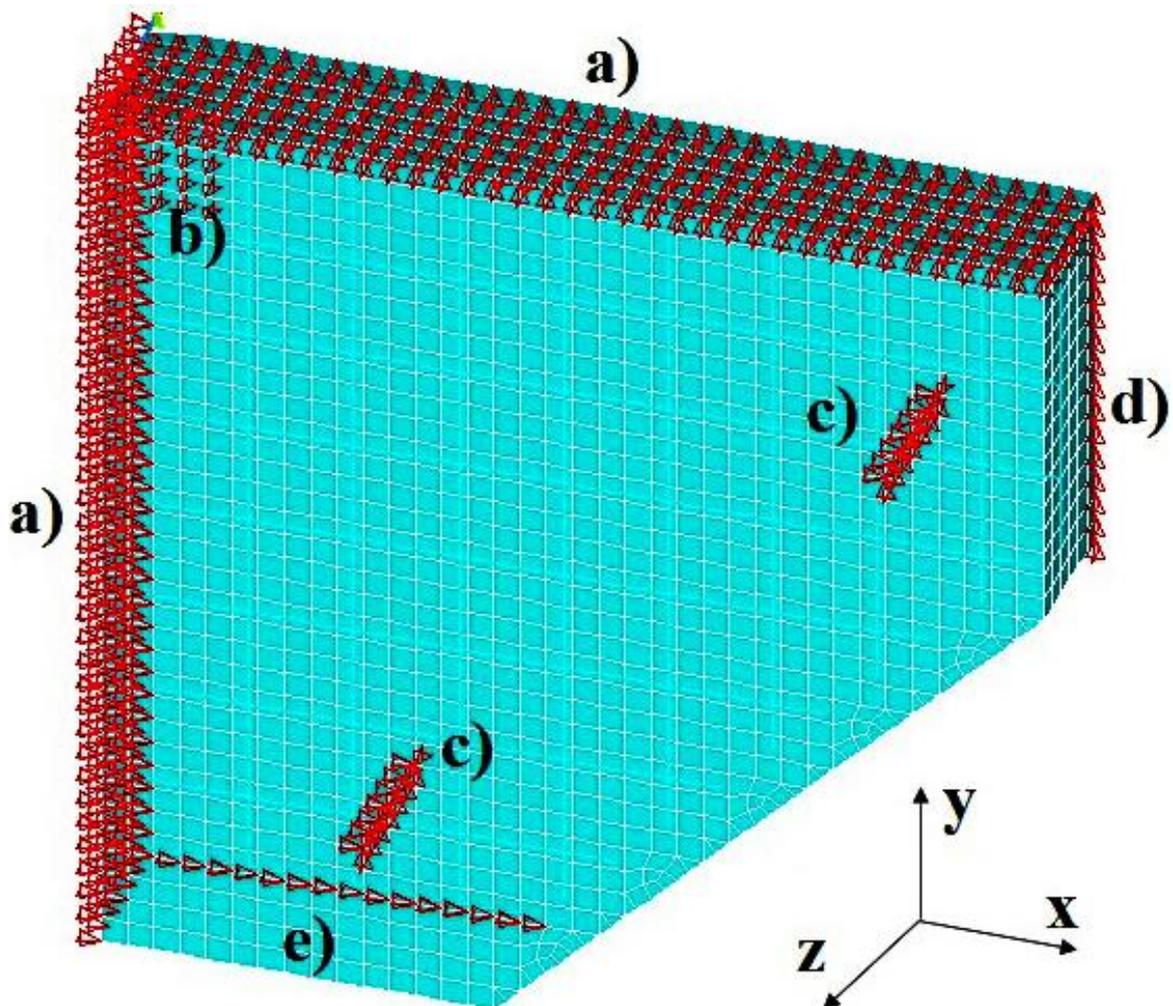


Figura 5.5: Definición de la geometría, condiciones de borde y cargas impuestas para la generación de los modelos LT1, LT2 y LT3 a) Definición de simetría b) Desplazamiento aplicado en Z c) Restricción de grados de libertad en X, Y y Z que emula a los pernos de sujeción d) Restricción de desplazamiento en Y e) Restricción de desplazamiento en X.

La definición de las condiciones de borde indicadas por c), d) y e) en la figura 5.5, no fue sencilla. Los registros de los ensayos realizados, indican que los pernos de sujeción impedían el desplazamiento vertical (en la dirección Z) de las losas y son incluidos en los modelos por medio de apoyos fijos “d)” que restringen los desplazamientos en X, Y y Z de los nodos donde son aplicados.

Los modelos de elementos finitos generados considerando únicamente las condiciones de borde “a)”, “b)” y “c)” no lograban la convergencia esperada pues se producía la falla por aplastamiento del hormigón en algunos nodos de “c)”.

Para salvar este inconveniente, se ensayaron muchas alternativas de condiciones de borde que hiciesen a los modelos de elementos finitos generados, lo más próximos a los ensayos experimentales, por esta razón se adicionaron las condiciones de borde “d)” (restricción de desplazamientos en Y) y “e)” (restricción de desplazamientos en X) con lo cual se logró resultados satisfactorios.

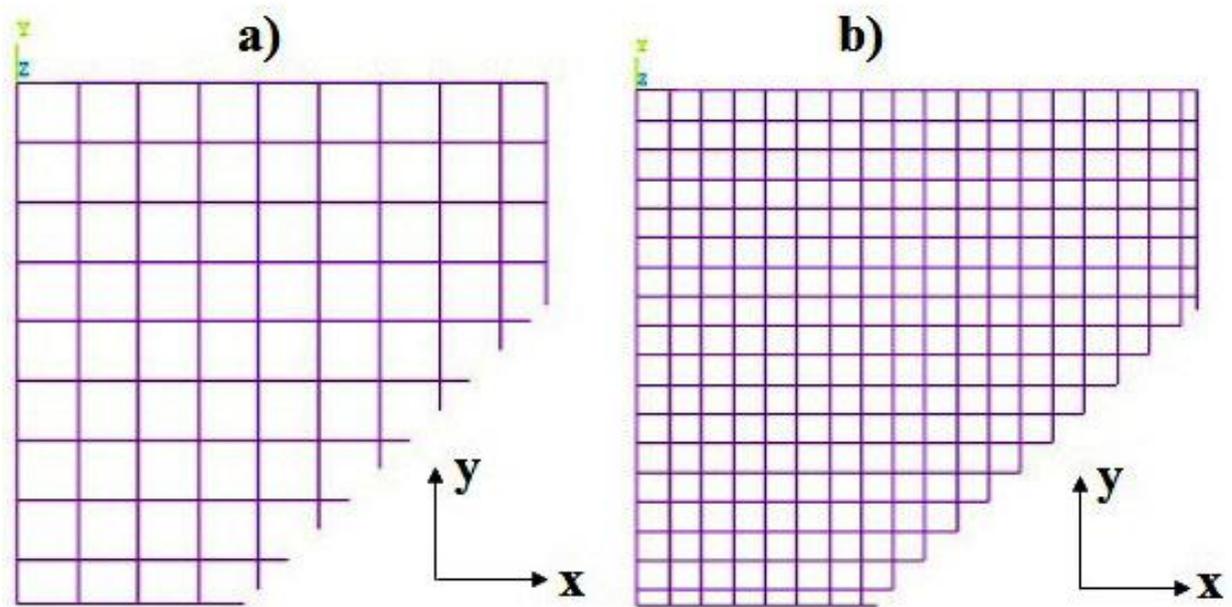


Figura 5.6: Generación de la malla de elementos finitos para la armadura de refuerzo

a) Armadura para LT1, $\emptyset 10c/10\text{ cm}$ b) Armadura para la losa LT3, $\emptyset 10c/5\text{ cm}$

En la figura 5.6 se muestran las mallas de elementos finitos para las armaduras de refuerzo por tracción $\emptyset 10c/10\text{ cm}$ y $\emptyset 10c/5\text{ cm}$, haciendo notar la coincidencia que debe existir entre los nodos de los elementos del hormigón (SOLID65) y los del acero de refuerzo (LINK180) con la finalidad de evitar el problema del *bond – slip* o la falta de adherencia entre el acero y el hormigón en la modelación numérica.

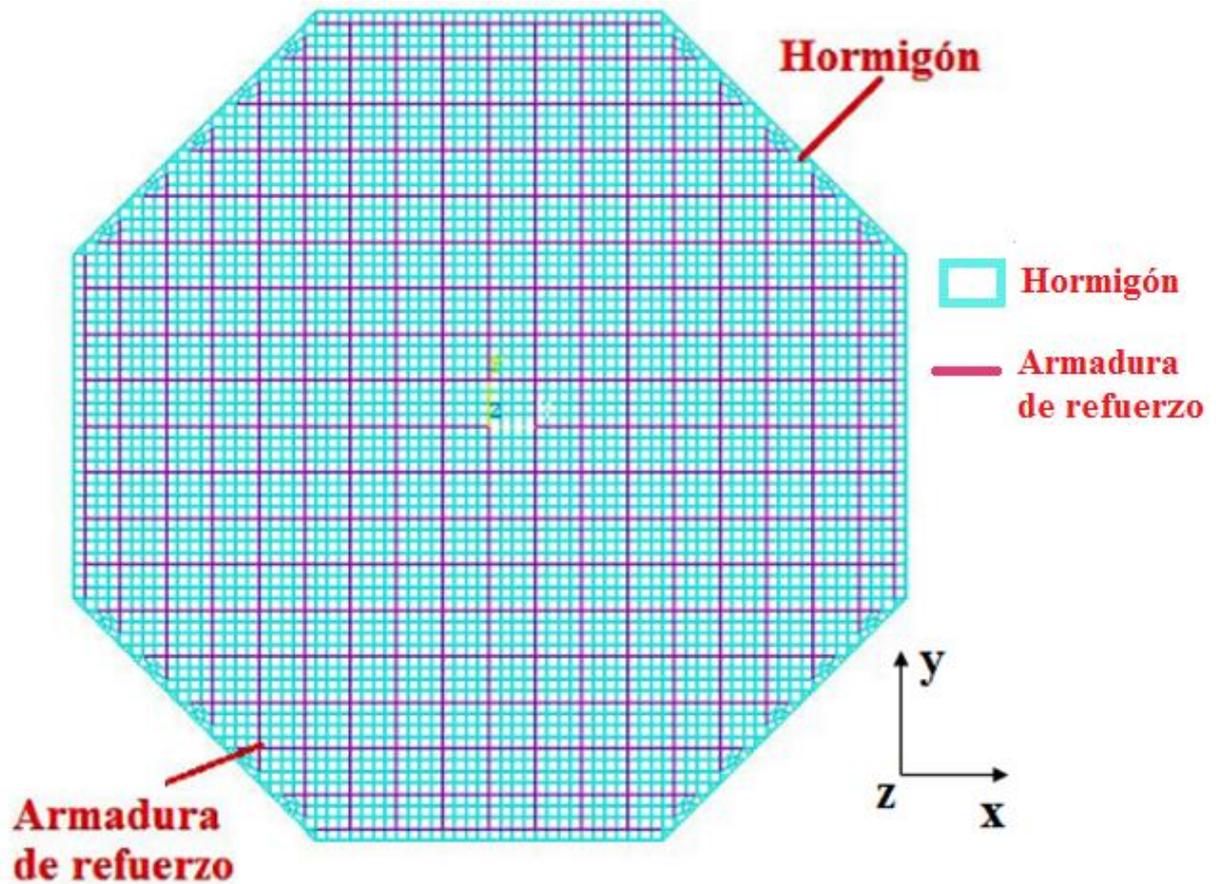


Figura 5.7: Modelo tridimensional de las losas de hormigón armado.

En la figura 5.7, se observa la geometría completa (hormigón y acero de refuerzo) para la losa LT1.

5.2.2. Losas de hormigón armado reforzado con fibras de acero

Dado el enfoque numérico – computacional de esta tesis, serán empleados los resultados experimentales obtenidos por otros investigadores como ser Cheng y Parra (2010) e Higashiyama *et al* (2011), quienes ensayaron experimentalmente losas de hormigón armado reforzado con fibras de acero. Cheng y Parra (2010) ensayaron un total de 10 losas, de las cuales seleccionamos una para ser reproducida, a su vez Higashiyama *et al* (2011) ensayaron en laboratorio 14 losas de las cuales seleccionamos tres. El criterio seguido para la selección de las losas fue contar con especímenes de diferentes características mecánicas, geométricas y de refuerzo sin caer en repeticiones ni en resultados poco indicativos.

La losa seleccionada del trabajo de Cheng y Parra (2010) a la cual se denominó LC15, es cuadrada de 1.50 metros de lado, 15 centímetros de espesor y tiene una columna cuadrada de 15 centímetros de lado empotrada a su base.

En la figura 5.8 se aprecia la geometría y la armadura de refuerzo por tracción de la losa LC15 siendo la misma 9 barras de 13 milímetros de diámetro, a su vez en la figura 5.9 se muestra el montaje del ensayo de laboratorio al que fue sujeta esta losa. Cabe destacar que en el ensayo realizado por Cheng y Parra (2010) la carga fue aplicada a la columna por medio de un actuador hidráulico que estaba sujeto a un pórtico de carga. La losa se apoyaba sobre una banda de neopreno de 5 centímetros de ancho y 13 milímetros de espesor, que emulaba un apoyo fijo.

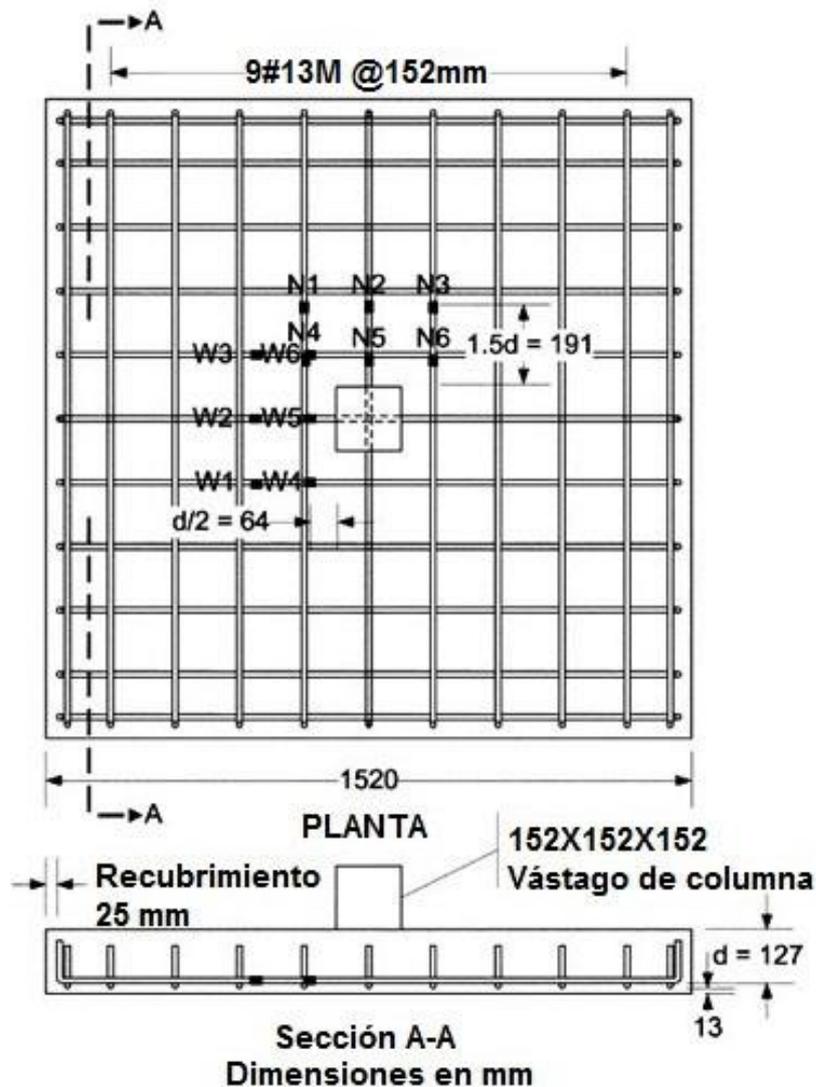


Figura 5.8: Geometría y detalle de armadura por tracción correspondiente a la losa LC15 (Cheng y Parra, 2010).

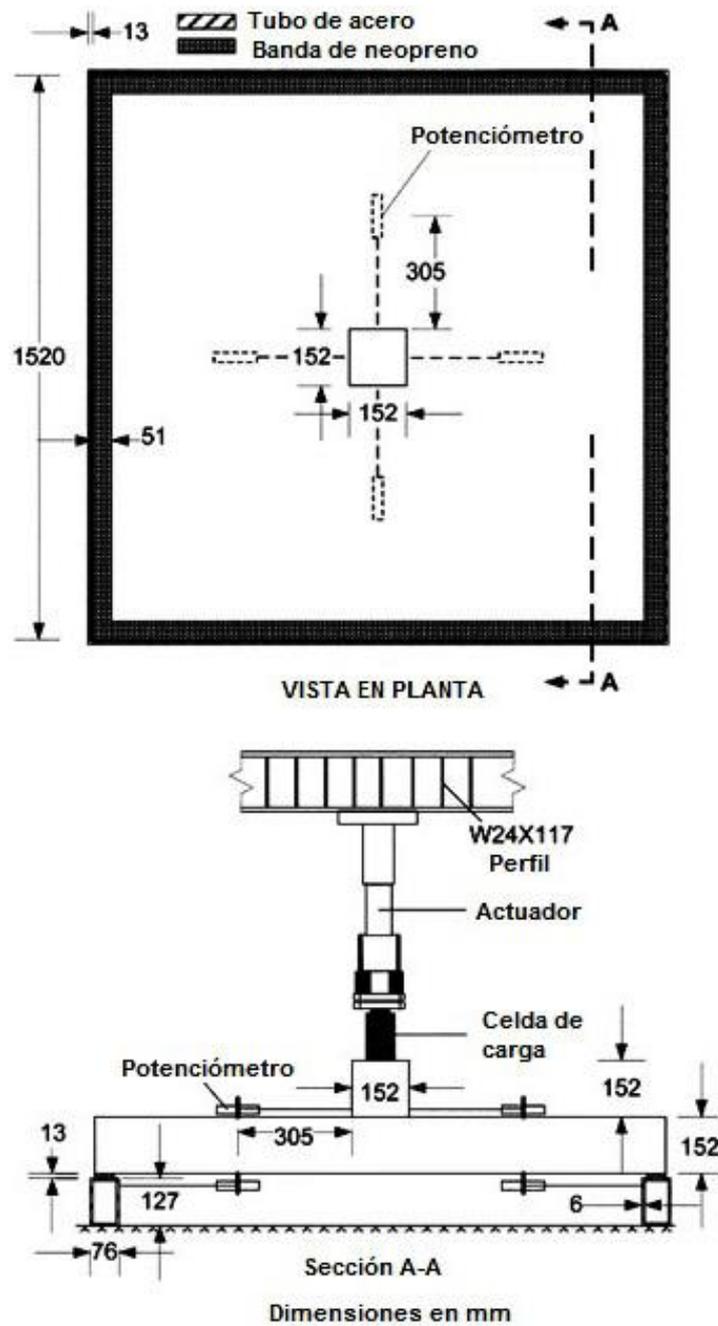


Figura 5.9: Montaje de laboratorio losa LC15 (Cheng y Parra, 2010)

Las losas extraídas del trabajo de Higashiyama *et al* (2011) son de forma cuadrada de 1.2 metros de lado, siendo sus espesores 10, 14 y 18 centímetros. A estas losas se las denominó LC10, LC14 y LC18; cabe destacar que no tenían columnas empotradas a sus bases.

En la figura 5.10 se muestra la geometría y refuerzo por tracción de la losa LC10, mientras que en la figura 5.11 se muestra el montaje del ensayo de laboratorio al que fueron sujetas.

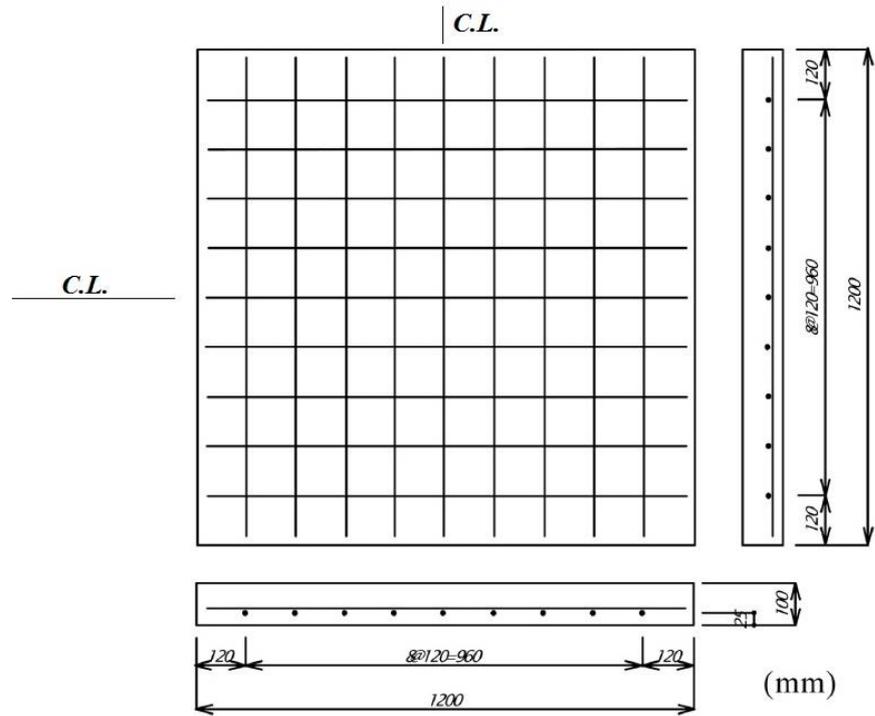


Figura 5.10: Geometría y detalle de armadura por tracción correspondiente a la losa LC10 (Higashiyama *et al*, 2011).

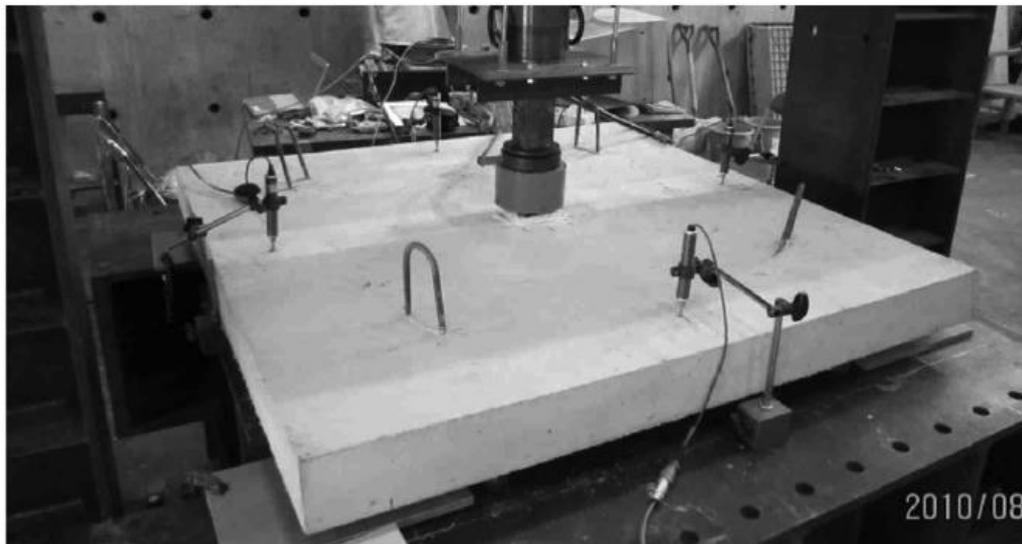


Figura 5.11: Ensayo de la laboratorio losa LC10 (Higashiyama *et al*, 2011).

Con referencia al montaje del ensayo de laboratorio que se muestra en la figura 5.11, todas las losas ensayadas fueron simplemente apoyadas, obteniéndose una luz libre de 1 metro a cada lado. El desplazamiento vertical de las esquinas de las losas no fue impedido, razón por la cual no se las recortó; no habiéndose notado su influencia en la resistencia al punzonamiento

(Higashiyama *et al*, 2011). Las cargas fueron aplicadas en el centro de las losas por medio de un actuador hidráulico que ejercía un empuje constante sobre un área cuadrada de 10 x 10 cm.

El desplazamiento vertical del centro de la losa y los asentamientos de los apoyos fueron medidos por medio de transductores lineales de desplazamiento (LVDT's) (Higashiyama *et al*, 2011).

En la tabla 5.2 se presenta el resumen del refuerzo y de las propiedades mecánicas de las losas LC10, LC14, LC15 y LC18.

Tabla 5.2. Detalle del armado y de las propiedades mecánicas de las losas de hormigón armado reforzado con fibras de acero LC10, LC14, LC15 y LC18 (Higashiyama *et al*, 2011 y Cheng y Parra, 2010)

Losa	Espesor [cm]	Altura útil [cm]	Refuerzo por tracción	V_f % (1)	f'_c [MPa] (2)	f_t [MPa] (3)	E_c [MPa] (4)	f_y [MPa] (5)	E_s [GPa] (6)
LC10	10	7.5	Ø9.53c/12 cm	0.67	24.6	1.45	22600	377	210
LC14	14	11.5	Ø9.53c/12 cm	0.67	24.6	1.45	22600	377	210
LC15	15	12.5	Ø13c/15 cm	1.00	25.4	1.5	22680	420	210
LC18	18	15.5	Ø9.53c/12 cm	0.67	24.6	1.45	22600	377	210

(1) Volumen de fibras de acero añadido.

(2) Resistencia cilíndrica a compresión del hormigón.

(3) Resistencia uniaxial a tracción del hormigón.

(4) Módulo de Young del hormigón.

(5) Límite de fluencia del acero de refuerzo.

(6) Módulo de Young del acero de refuerzo.

En la tabla 5.3 se indican las características más relevantes de las fibras de acero empleadas.

Tabla 5.3. Características de las fibras de acero utilizadas.

Losa	Tipo de fibra	Longitud [mm]	Diámetro [mm]	f_{yf} [MPa] (1)	E_{sf} [GPa] (2)
LC10	Con ganchos en los extremos	30	0.62	1119	210
LC14	Con ganchos en los extremos	30	0.62	1119	210
LC15	Con ganchos en los extremos	30	0.55	1100	210
LC18	Con ganchos en los extremos	30	0.62	1119	210

(1) Límite de fluencia de las fibras de acero.

(2) Módulo de Young de las fibras de acero.

En el apartado 3.4.3 del capítulo 3, se describieron dos modelos a partir de los cuales pueden ser generadas las ramas en compresión de las curvas tensión – deformación para un hormigón reforzado con fibras de acero. Ambos modelos no tuvieron un buen desempeño al momento de generar los modelos de elementos finitos de las losas indicadas en la tabla 5.2.

Dada esta situación, se empleó el modelo desarrollado por Isla (2014) para estudiar el comportamiento del hormigón reforzado con fibras de acero; el cual está implementado en un programa computacional de elementos finitos de código abierto que es empleado en el Instituto de Estructuras de la Universidad Nacional de Tucumán (U.N.T.).

Por medio de este modelo se reprodujeron los ensayos a compresión y a tracción uniaxial al que son sujetas las probetas de hormigón reforzadas con fibras y a partir de los mismos se obtuvieron las ramas en compresión y en tracción de las curvas tensión – deformación que se presentan en las figuras 5.12 y 5.13. Estas curvas son las que se emplearon para la generación de los modelos LC10, LC14, LC15 y LC18.

Mayores detalles sobre la generación de los modelos de elementos finitos que reproducen los ensayos a compresión y a tracción uniaxial a partir de los cuales se generan las curvas mostradas en las figuras 5.12 y 5.13, son presentados en el anexo 3.

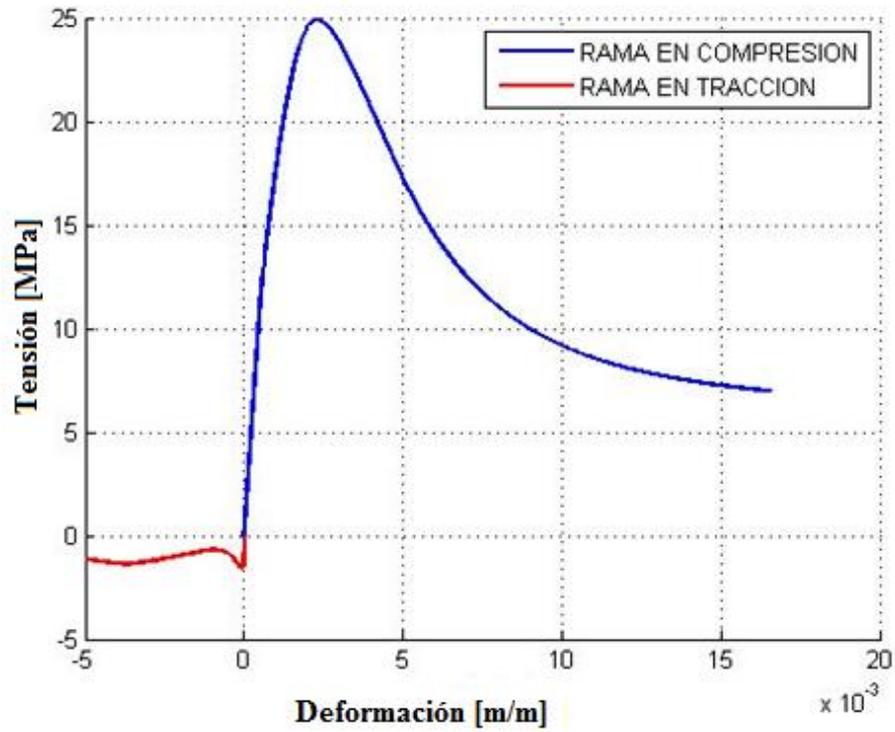


Figura 5.12: Ramas en compresión y en tracción de la curva tensión – deformación empleada para los modelos de las losas LC10, LC14 y LC18.

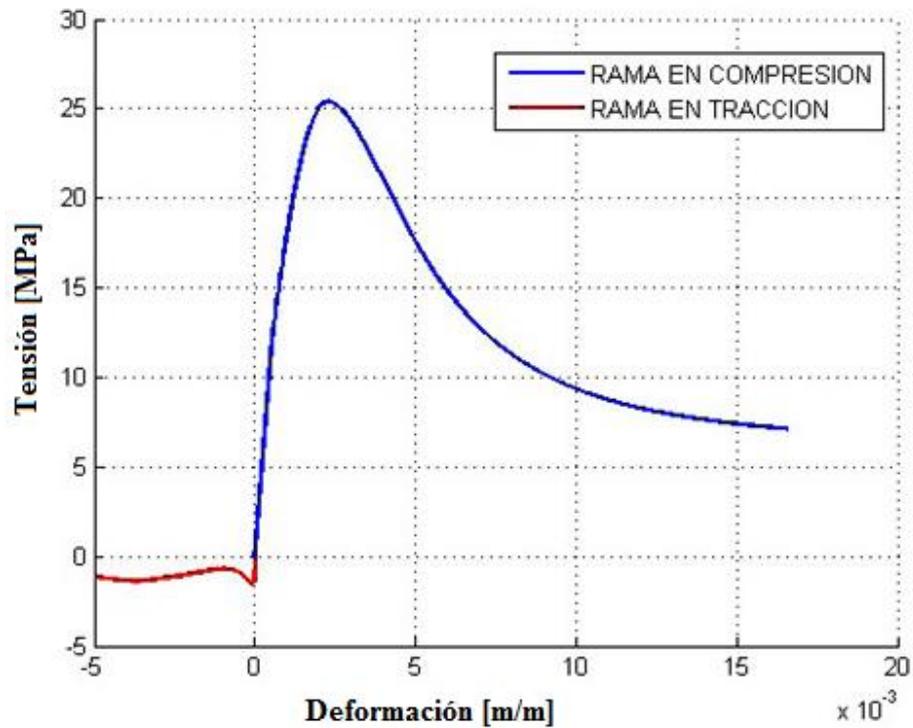


Figura 5.13: Ramas en compresión y en tracción de la curva tensión – deformación empleada para el modelo de la losa LC15.

Considerando que las losas indicadas en la tabla 5.2 son doblemente simétricas, sus respectivos modelos de elementos finitos fueron generados a partir de una cuarta parte del total de la geometría. Los modelos para estas cuatro losas fueron conformados por elementos finitos SOLID65 de 2.5 centímetros de lado, habiendo sido determinado este tamaño de malla en base a un análisis comparativo, en el cual se ensayaron diversos tamaños de malla, desde mallas gruesas hasta muy finas (5 mm de lado); llegando a contrastar los resultados obtenidos con el costo computacional requerido para obtener las respuestas y se optó por este tamaño ya que permite obtener resultados adecuados, generar las mallas de la armadura de refuerzo por tracción que está limitada por el espaciamiento de las barras y aplicar las cargas nodales que emulan los empujes de los actuadores hidráulicos.

En la figuras 5.14 y 5.15 se muestra la malla de elementos finitos (tipo) empleada para las losas LC10, LC14 y LC18.

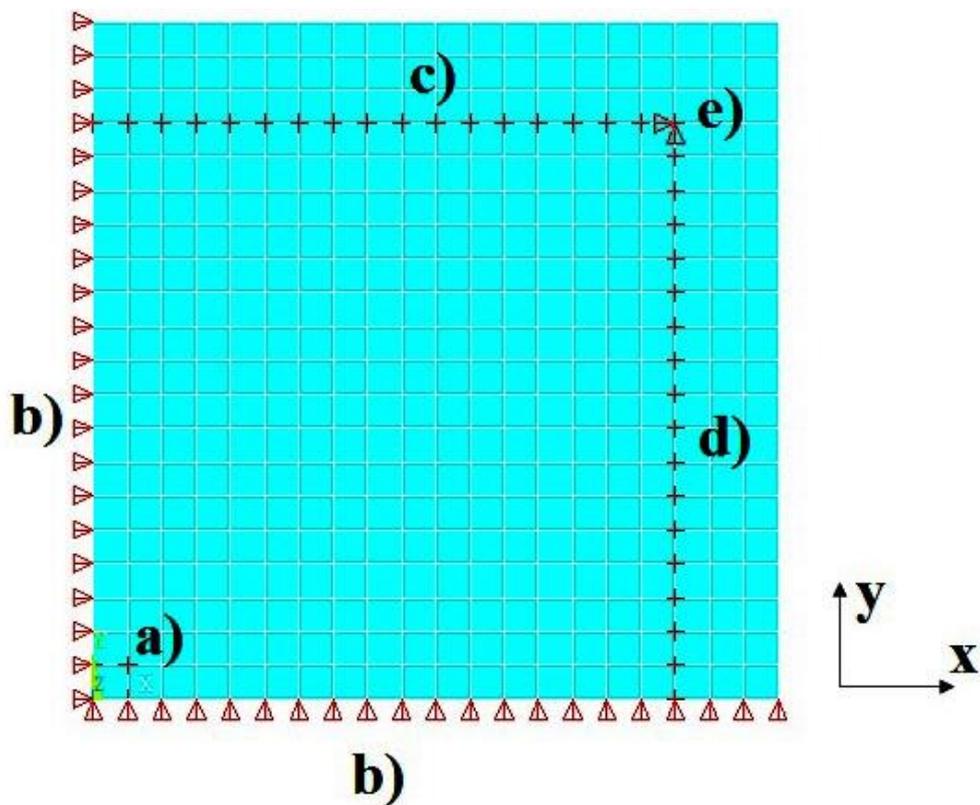


Figura 5.14: Geometría y condiciones de borde para los modelos de elementos finitos de las losas LC10, LC14 y LC18.

En la figura 5.14, se aprecia una vista en planta de la definición de la geometría, condiciones de borde y cargas impuestas para la generación de los modelos LC10, LC14 y LC18, “a)”

representa los nodos en los cuales se impuso desplazamientos en Z que cumplen la función de emular el empuje constante aplicado por el actuador hidráulico a las losas, “b)” representa la definición de las condiciones de simetría, “c)” indica la restricción de grados de libertad en X y Z (apoyos), “d)” indica la restricción de grados de libertad en Y y Z (apoyos), “e)” es un nodo de esquina donde se restringen los grados de libertad en X, Y y Z.

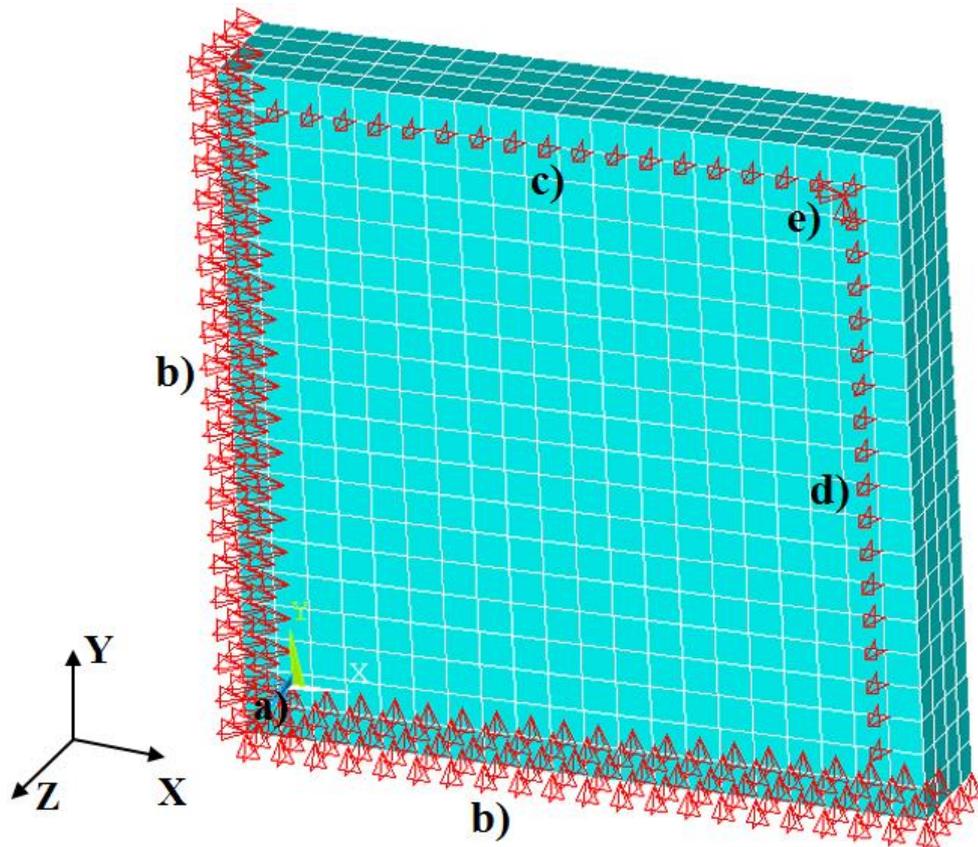


Figura 5.15: Vista espacial de la definición de la geometría, condiciones de borde y cargas impuestas para la generación de los modelos LC10, LC14 y LC18.

Debe destacarse que las losas LC10, LC14 y LC18, además de tener barras de acero conformado como refuerzo; se les adicionaron fibras de acero distribuidas en toda la matriz de hormigón.

ANSYS representa las fibras de acero adicionadas a la matriz de hormigón, de acuerdo a la orientación definida en los *real constant* del elemento SOLID65 (ver figura 4.5).

De esta forma, las fibras de acero aparecen representadas en las figuras 5.16 y 5.17 como una especie de ejes coordenados ortogonales de colores rojo, azul y verde.

Cabe destacar que el volumen de fibras adicionado V_f (ver tabla 5.2), fue distribuido de forma igualitaria a lo largo de los ejes X, Y y Z de los modelos de elementos finitos realizados, pues

Higashiyama *et al* (2011) no indican que la distribución de las fibras haya sido contraria a lo asumido.

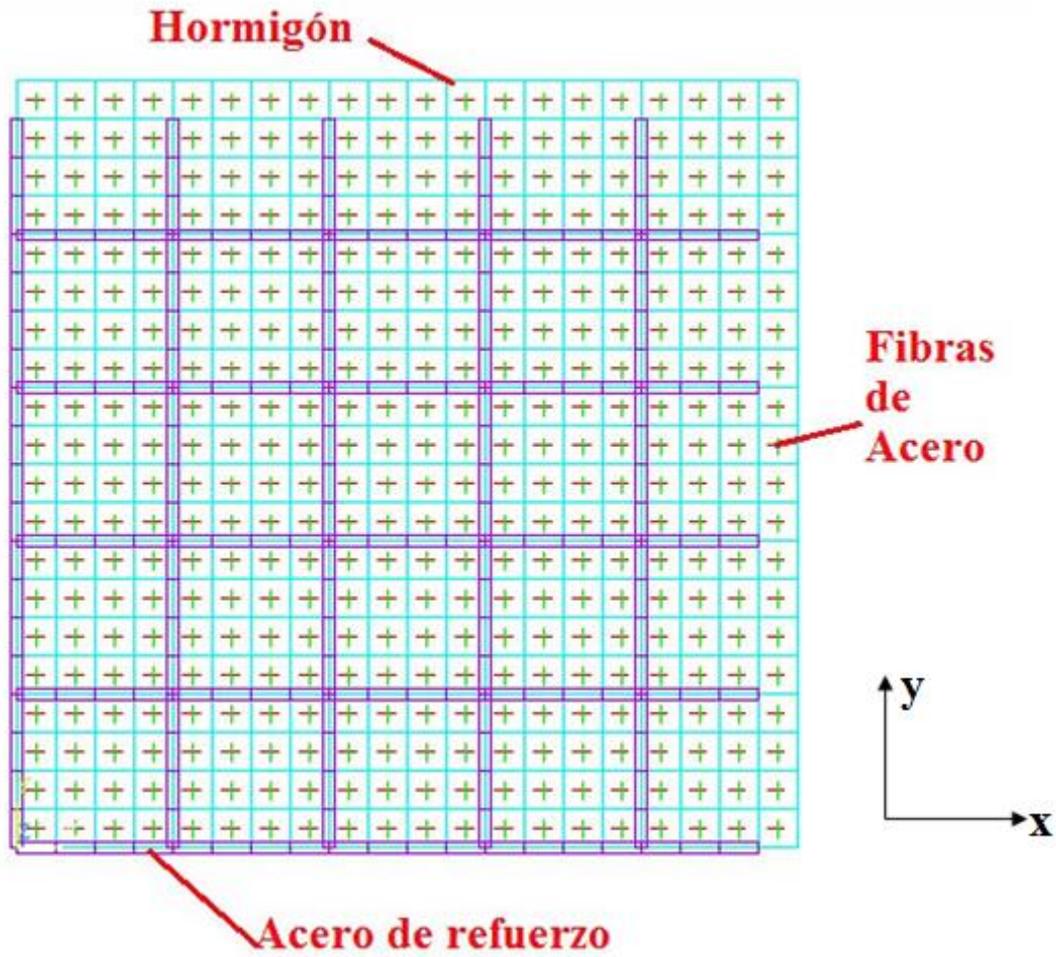


Figura 5.16: Vista en planta del detalle de la geometría y del refuerzo para la generación de los modelos LC10, LC14 y LC18.

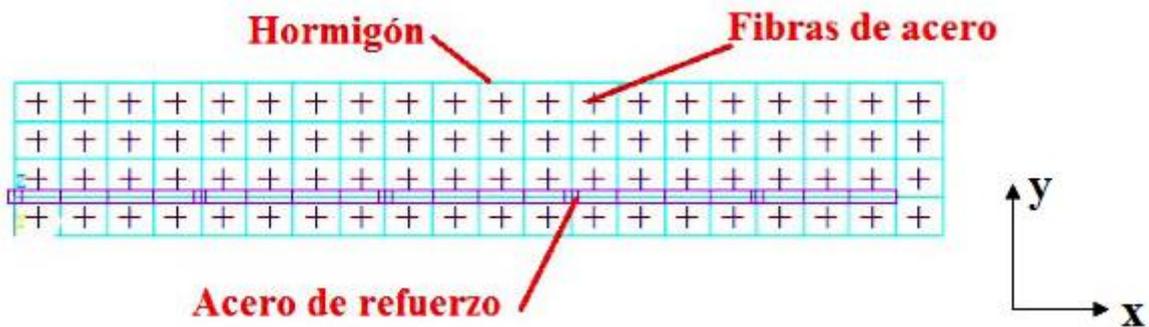


Figura 5.17: Vista frontal del detalle de la geometría y del refuerzo para la generación de los modelos LC10, LC14 y LC18.

En las figuras 5.18 y 5.19, se muestra la malla de elementos finitos empleada para la generación de la losa LC15. Siguiendo el mismo razonamiento empleado para las losas LC10, LC14 y LC18; la malla de elementos finitos de la losa LC15 está conformada por elementos finitos SOLID65 de 2.5 centímetros de lado, que permite obtener resultados adecuados, generar las mallas de la armadura de refuerzo por tracción que está limitada por el espaciamiento de las barras y aplicar las cargas nodales que emulan los empujes de los actuadores hidráulicos.

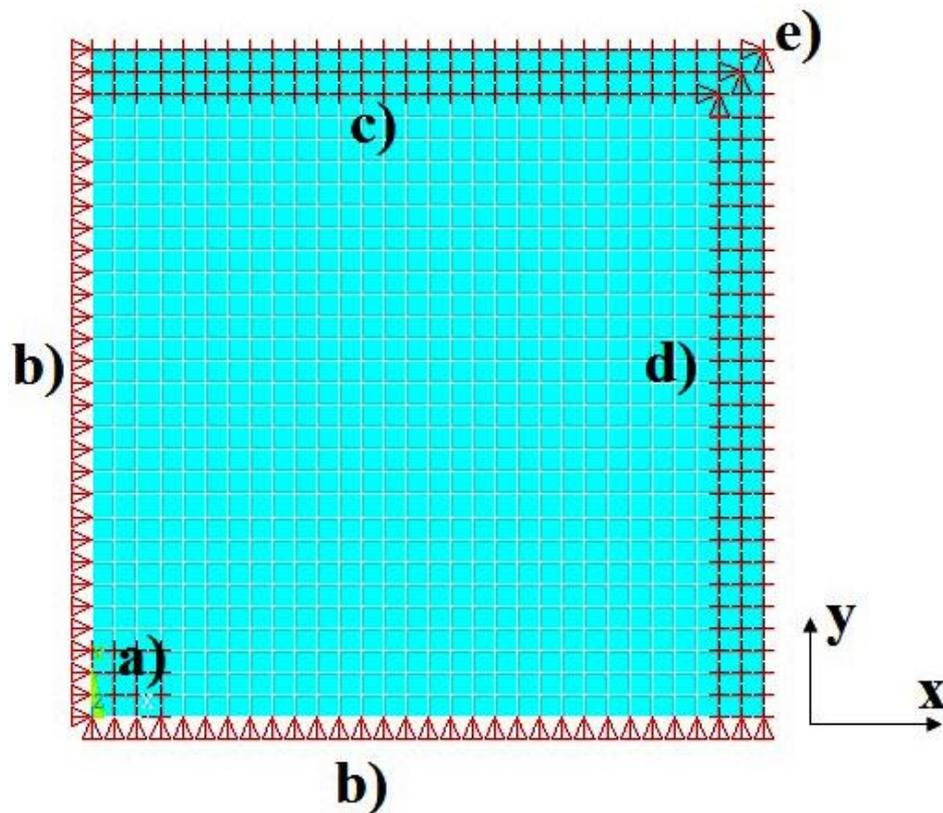


Figura 5.18: Geometría, condiciones de borde y cargas impuestas para la generación del modelo LC15.

En la figura 5.18, se aprecia una vista en planta de la definición de la geometría, condiciones de borde y cargas impuestas para la generación del modelo LC15; “a)” representa los nodos en los cuales se impuso desplazamientos en Z que cumplen la función de emular el empuje constante aplicado por el actuador hidráulico a las losas, “b)” representa la definición de las condiciones de simetría, “c)” indica la restricción de grados de libertad en X y Z (apoyos), “d)” indica la restricción de grados de libertad en Y y Z (apoyos), “e)” son nodos de esquina donde se restringen los grados de libertad en X, Y y Z.

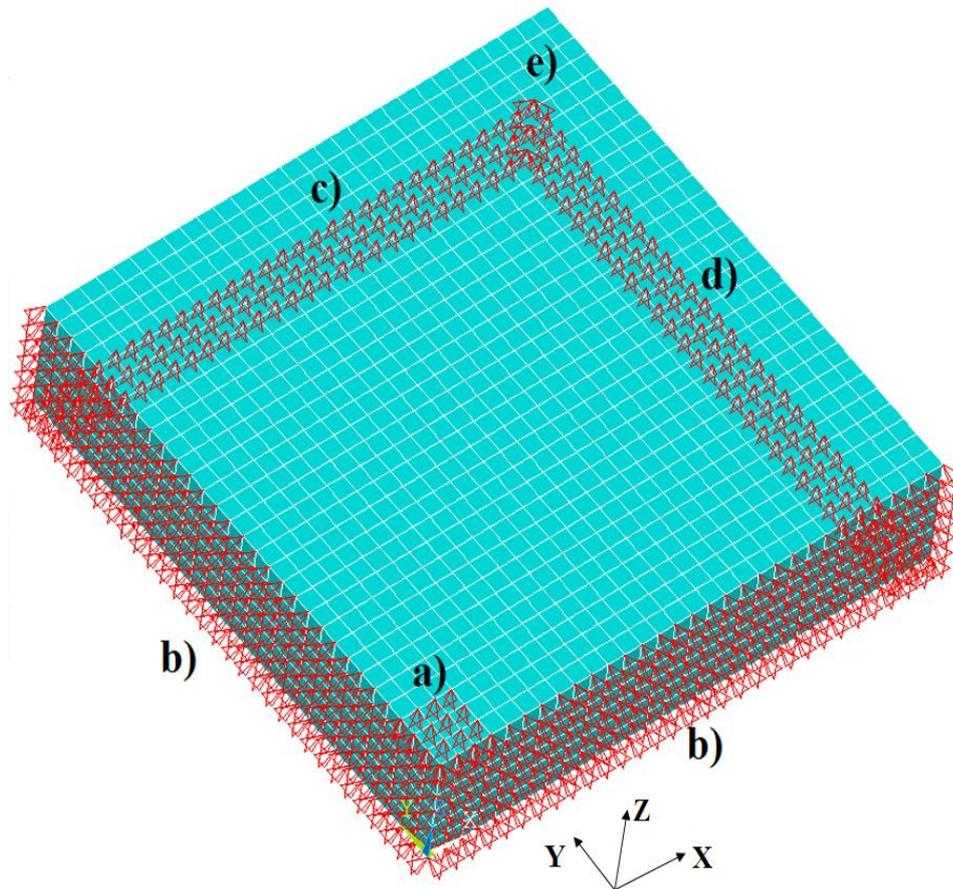


Figura 5.19: Vista de espacial de la definición de la geometría, condiciones de borde y cargas impuestas para la generación del modelo LC15.

5.3. MODELOS PARA ESTUDIO NUMÉRICO

5.3.1. Losas de hormigón armado reforzado con fibras de acero

Estos modelos fueron generados a partir de las losas de hormigón armado LT1, LT2 y LT3 modeladas en ANSYS. A su vez, por medio del modelo de Huang V.Z. (1995) se adicionó a las mismas el efecto del refuerzo de fibras de acero considerando diferentes expresiones para determinar la resistencia residual a tracción del HRFA; como ser la expresión (3.46) propuesta por Huang V.Z. (1995) y la (3.47) propuesta a su vez por la DAfStB (2012). Se considera también la variación del volumen de fibras añadido y su distribución en los tres ejes ortogonales X, Y y Z (ver figura 5.20).

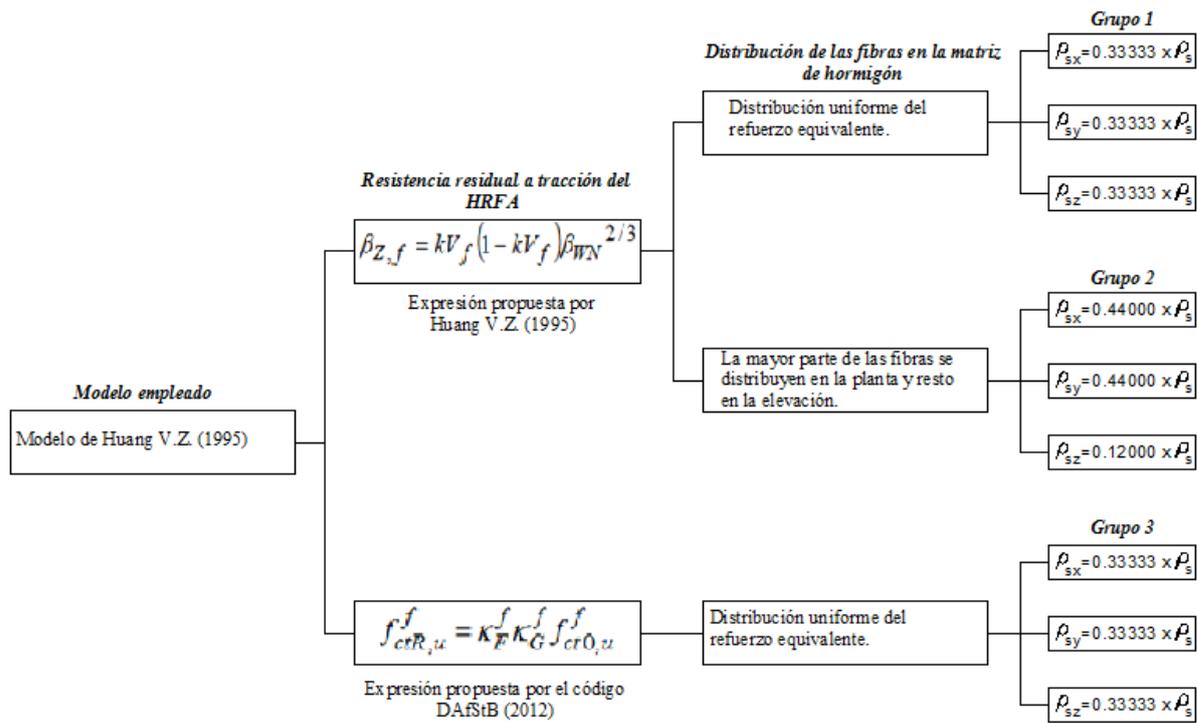


Figura 5.20: Consideraciones para los grupos de modelos elementos finitos empleados para realizar el estudio numérico.

De acuerdo con la figura 5.20, en los grupos 1 y 3 se considera igual cantidad de fibras en las direcciones X, Y y Z, siendo esta situación posible cuando el proceso de compactación del hormigón reforzado con fibras es realizado de forma adecuada. Esta suposición concuerda con lo establecido en el modelo de Huang V.Z. (1995) explicado en el apartado 3.4.2.

En el grupo 2, la distribución del volumen de fibras es realizada bajo la hipótesis que la mayor orientación de las fibras vertidas en un volumen de hormigón, son las direcciones X e Y (correspondientes a la base del encofrado que contiene al hormigón), asignándose a cada dirección un 44% del volumen total de las fibras (ver anexo 3); mientras que un porcentaje menor se orienta en la dirección Z (elevación del encofrado), correspondiendo un 12% del volumen total de las fibras. La hipótesis de la orientación de las fibras aplicada en el grupo 2, concuerda con lo observado por Gettu *et al* (2005). A su vez, esta hipótesis puede corresponder al caso en que la compactación realizada al volumen de hormigón genere un alineamiento de las fibras preferentemente horizontal (direcciones ortogonales X e Y) como en el caso de especímenes prismáticos compactados por medio de la mesa vibratoria.

Las ramas en compresión y en tracción de las curvas tensión – deformación del hormigón reforzado con fibras de acero, empleadas para los modelos indicados en la figura 5.20, son presentadas en las figuras 5.21 y 5.22 respectivamente. Mayores detalles sobre la obtención de estas curvas son proporcionados en el Anexo 3.

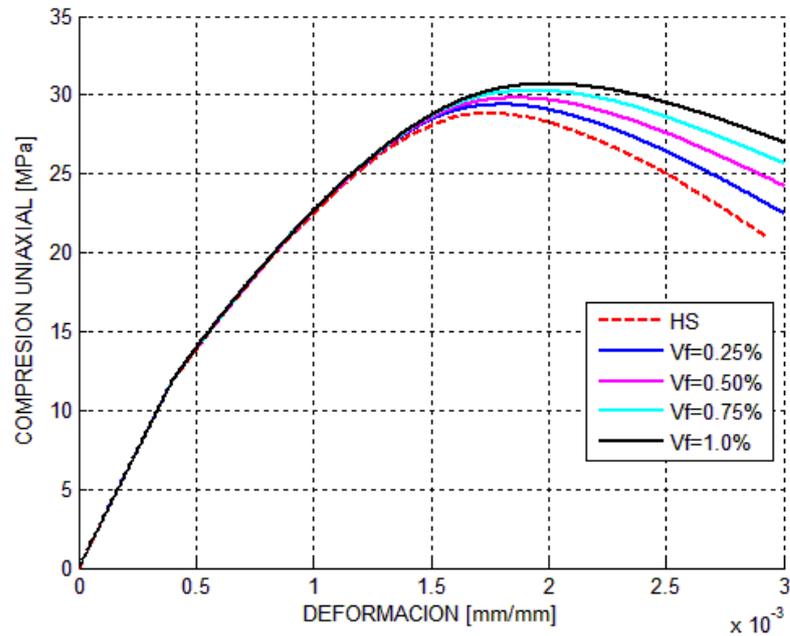


Figura 5.21: Rama en compresión de las curvas tensión – deformación generadas para el hormigón reforzado con fibras de acero considerando diferentes porcentajes de adición de fibras (ver anexo 3).

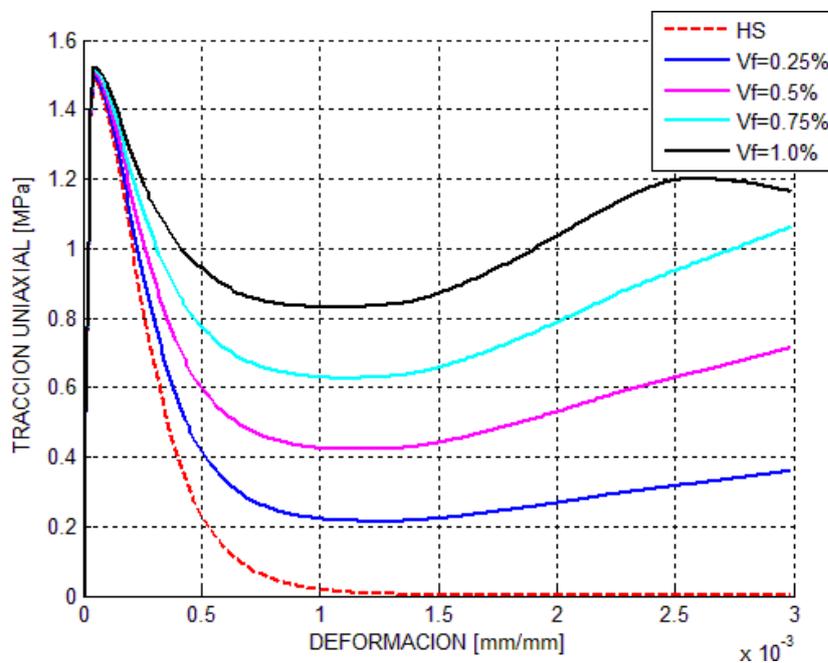


Figura 5.22: Rama en tracción de las curvas tensión – deformación generadas para el hormigón reforzado con fibras de acero considerando diferentes porcentajes de adición de fibras (ver anexo 3).

Las características geométricas y mecánicas de las fibras de acero que se emplearon para la generación de los modelos de los grupos 1, 2 y 3; son mostradas en la tabla 5.4.

Tabla 5.4. Características de las fibras de acero utilizadas en los modelos generados

Tipo	Longitud [mm]	Diámetro [mm]	f_{yf} [MPa] (1)	E_{sf} [GPa] (2)
Con ganchos en los extremos	50	1.0	1110	210

(1) Límite de fluencia de las fibras de acero.

(2) Módulo elástico de las fibras de acero.

En las tablas 5.5 y 5.6 que se muestran a continuación son determinados los refuerzos dispersos equivalentes $\bar{\rho}_s$ que emulan el refuerzo de fibras de acero en los modelos de elementos finitos empleados para realizar el estudio numérico.

Tabla 5.5. Determinación del refuerzo disperso equivalente $\bar{\rho}_s$, determinando la resistencia residual a tracción del HRFA por medio de la expresión (3.46) propuesta por Huang V.Z. (1995)

V_f [Kg/m ³]	V_f [%]	$\beta_{Z,F}$ [MPa]	ϵ'_R	E_f [MPa]	$\bar{\beta}_s$ [MPa]	$\bar{\rho}_s$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
20	0.25	0.344	0.0002	21E4	42	0.00818
40	0.50	0.667	0.0002	21E4	42	0.0159
60	0.75	0.969	0.0002	21E4	42	0.0231
80	1.0	1.249	0.0002	21E4	42	0.0298

(1) Valor asumido.

(2) Valor obtenido por medio de la ec. (3.40).

(3) Resistencia residual a tracción del HRFA obtenida por medio de la ec. (3.46).

(4) Deformación igual a la de primera fisuración del hormigón (Núñez López, 2011), (Ribeiro *et al*, 2008) y (Ribeiro y Serna, 2009).

(5) Modulo elástico de las fibras de acero.

(6) Límite elástico de las fibras de acero determinado para una deformación igual a la de primera fisura del hormigón, se obtiene a partir del siguiente cálculo: (4)*(5)=(6)

(7) Refuerzo disperso equivalente que emula el refuerzo de las fibras de acero, es obtenido por medio de la ecuación (3.50), (7) = (3)/(6).

Tabla 5.6. Determinación del refuerzo disperso equivalente $\bar{\rho}_s$, determinando la resistencia residual a tracción del HRFA por medio de la expresión (3.47) propuesta por la DAfStB (2012)

V_f [Kg/m ³]	V_f [%]	$\beta_{Z,F}$ [MPa]	ϵ'_R	E_f [MPa]	$\bar{\beta}_s$ [MPa]	$\bar{\rho}_s$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
20	0.25	0.119	0.0002	21E4	42	0.00283
40	0.50	0.277	0.0002	21E4	42	0.00566
60	0.75	0.356	0.0002	21E4	42	0.00849
80	1.0	0.4753	0.0002	21E4	42	0.0113

- (1) Valor asumido.
- (2) Valor obtenido por medio de la ec. (3.40).
- (3) Resistencia residual a tracción del HRFA obtenida por medio de la ec. (3.47), DAfStB (2012) la denomina $f_{ctR,u}^f$, pero se usó la notación $B_{z,f}$ para ser coherentes con la ecuación (3.50).
- (4) Deformación igual a la de primera fisuración del hormigón (Núñez López, 2011), (Ribeiro *et al*, 2008) y (Ribeiro y Serna, 2009).
- (5) Modulo elástico de las fibras de acero.
- (6) Límite elástico de las fibras de acero determinado para una deformación igual a la de primera fisura del hormigón, se obtiene a partir del siguiente cálculo: (4)*(5)=(6)
- (7) Refuerzo disperso equivalente que emula el refuerzo de las fibras de acero, es obtenido por medio de la ecuación (3.50), (7) = (3)/(6).

De esta forma se generaron 36 modelos de losas de hormigón armado reforzado con fibras de acero pertenecientes a los grupos 1, 2 y 3 (ve figura 5.20), los cuales se detallan en las tablas 5.7, 5.8 y 5.9.

Tabla 5.7. Modelos de losas de hormigón armado reforzado con fibras de acero pertenecientes al grupo 1.

Losas	As	f'_c [MPa]	f_t [MPa]	V_f %	$\bar{\rho}_S$	Distribución de las fibras		
						$\bar{\rho}_{SX}$	$\bar{\rho}_{SY}$	$\bar{\rho}_{SZ}$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
HRFA1-20-1	$\emptyset 8c/10cm$	29.39	1.50	0.25	0.00818	2.728e-3	2.728e-3	2.728e-3
HRFA1-40-1	$\emptyset 8c/10cm$	29.80	1.507	0.50	0.0159	5.292e-3	5.292e-3	5.292e-3
HRFA1-60-1	$\emptyset 8c/10cm$	30.27	1.516	0.75	0.0231	7.696e-3	7.696e-3	7.696e-3
HRFA1-80-1	$\emptyset 8c/10cm$	30.68	1.525	1.00	0.0298	9.918e-3	9.918e-3	9.918e-3
HRFA2-20-1	$\emptyset 10c/10cm$	29.39	1.50	0.25	0.00818	2.728e-3	2.728e-3	2.728e-3
HRFA2-40-1	$\emptyset 10c/10cm$	29.80	1.507	0.50	0.0159	5.292e-3	5.292e-3	5.292e-3
HRFA2-60-1	$\emptyset 10c/10cm$	30.27	1.516	0.75	0.0231	7.696e-3	7.696e-3	7.696e-3
HRFA2-80-1	$\emptyset 10c/10cm$	30.68	1.525	1.00	0.0298	9.918e-3	9.918e-3	9.918e-3
HRFA3-20-1	$\emptyset 10c/5cm$	29.39	1.50	0.25	0.00818	2.728e-3	2.728e-3	2.728e-3
HRFA3-40-1	$\emptyset 10c/5cm$	29.80	1.507	0.50	0.0159	5.292e-3	5.292e-3	5.292e-3
HRFA3-60-1	$\emptyset 10c/5cm$	30.27	1.516	0.75	0.0231	7.696e-3	7.696e-3	7.696e-3
HRFA3-80-1	$\emptyset 10c/5cm$	30.68	1.525	1.00	0.0298	9.918e-3	9.918e-3	9.918e-3

(1) Denominación del modelo, por ejemplo HRFA1-20-1 significa: Hormigón reforzado con fibras de acero, 1 se asigna a $\emptyset 8c/10 cm$, 2 se asigna a $\emptyset 10c/10 cm$ y 3 se asigna a $\emptyset 10c/5 cm$. El 20 significa 20 Kg/m³ de adición de fibras y finalmente el -1, indica grupo "1" respecto a lo indicado en la figura 5.20.

(2) Armadura de refuerzo por tracción asignada en función a los modelos LT1, LT2 y LT3.

(3) Resistencia uniaxial a compresión del HRFA.

(4) Resistencia uniaxial a tracción del HRFA.

(5) Volumen de fibras adicionado en porcentaje, ver la ecuación (3.40).

(6) Refuerzo disperso equivalente, obtenido de la columna 7 de la tabla 5.5.

(7), (8) y (9) Refuerzo disperso equivalente en las direcciones X, Y y Z.

Tabla 5.8. Modelos de losas de hormigón armado reforzado con fibras de acero pertenecientes al grupo 2.

Losas	As	f'_c [MPa]	f_t [MPa]	V_f %	$\bar{\rho}_S$	Distribución de las fibras		
						$\bar{\rho}_{SX}$	$\bar{\rho}_{SY}$	$\bar{\rho}_{SZ}$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
HRFA1-20-2	$\emptyset 8c/10cm$	29.39	1.50	0.25	0.00818	3.60e-3	3.60e-3	9.819e-4
HRFA1-40-2	$\emptyset 8c/10cm$	29.80	1.507	0.50	0.0159	6.985e-3	6.985e-3	1.905e-3
HRFA1-60-2	$\emptyset 8c/10cm$	30.27	1.516	0.75	0.0231	0.0101e-3	0.0101e-3	2.770e-3
HRFA1-80-2	$\emptyset 8c/10cm$	30.68	1.525	1.00	0.0298	0.0131e-3	0.0131e-3	3.570e-3
HRFA2-20-2	$\emptyset 10c/10cm$	29.39	1.50	0.25	0.00818	3.60e-3	3.60e-3	9.819e-4
HRFA2-40-2	$\emptyset 10c/10cm$	29.80	1.507	0.50	0.0159	6.985e-3	6.985e-3	1.905e-3
HRFA2-60-2	$\emptyset 10c/10cm$	30.27	1.516	0.75	0.0231	0.0101e-3	0.0101e-3	2.770e-3
HRFA2-80-2	$\emptyset 10c/10cm$	30.68	1.525	1.00	0.0298	0.0131e-3	0.0131e-3	3.570e-3
HRFA3-20-2	$\emptyset 10c/5cm$	29.39	1.50	0.25	0.00818	3.60e-3	3.60e-3	9.819e-4
HRFA3-40-2	$\emptyset 10c/5cm$	29.80	1.507	0.50	0.0159	6.985e-3	6.985e-3	1.905e-3
HRFA3-60-2	$\emptyset 10c/5cm$	30.27	1.516	0.75	0.0231	0.0101e-3	0.0101e-3	2.770e-3
HRFA3-80-2	$\emptyset 10c/5cm$	30.68	1.525	1.00	0.0298	0.0131e-3	0.0131e-3	3.570e-3

(1) Denominación del modelo, por ejemplo HRFA1-20-1 significa: Hormigón reforzado con fibras de acero, 1 se asigna a $\emptyset 8c/10 cm$, 2 se asigna a $\emptyset 10c/10 cm$ y 3 se asigna a $\emptyset 10c/5 cm$. El 20 significa 20 Kg/m³ de adición de fibras y finalmente el -1, indica grupo "1" respecto a lo indicado en la figura 5.20.

(2) Armadura de refuerzo por tracción asignada en función a los modelos LT1, LT2 y LT3.

(3) Resistencia uniaxial a compresión del HRFA.

(4) Resistencia uniaxial a tracción del HRFA.

(5) Volumen de fibras adicionado en porcentaje, ver la ecuación (3.40).

(6) Refuerzo disperso equivalente, obtenido de la columna 7 de la tabla 5.5.

(7), (8) y (9) Refuerzo disperso equivalente en las direcciones X, Y y Z.

Tabla 5.9. Modelos de losas de hormigón armado reforzado con fibras de acero pertenecientes al grupo 3.

Losas	As	f'_c [MPa]	f_t [MPa]	V_f %	$\bar{\rho}_S$	Distribución de las fibras		
						$\bar{\rho}_{SX}$	$\bar{\rho}_{SY}$	$\bar{\rho}_{SZ}$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
HRFA1-20-3	$\emptyset 8c/10cm$	29.39	1.50	0.25	0.00283	9.43e-4	9.43e-4	9.43e-4
HRFA1-40-3	$\emptyset 8c/10cm$	29.80	1.507	0.50	0.00566	1.886e-3	1.886e-3	1.886e-3
HRFA1-60-3	$\emptyset 8c/10cm$	30.27	1.516	0.75	0.00849	2.829e-3	2.829e-3	2.829e-3
HRFA1-80-3	$\emptyset 8c/10cm$	30.68	1.525	1.00	0.0113	3.773e-3	3.773e-3	3.773e-3
HRFA2-20-3	$\emptyset 10c/10cm$	29.39	1.50	0.25	0.00283	9.43e-4	9.43e-4	9.43e-4
HRFA2-40-3	$\emptyset 10c/10cm$	29.80	1.507	0.50	0.00566	1.886e-3	1.886e-3	1.886e-3
HRFA2-60-3	$\emptyset 10c/10cm$	30.27	1.516	0.75	0.00849	2.829e-3	2.829e-3	2.829e-3
HRFA2-80-3	$\emptyset 10c/10cm$	30.68	1.525	1.00	0.0113	3.773e-3	3.773e-3	3.773e-3
HRFA3-20-3	$\emptyset 10c/5cm$	29.39	1.50	0.25	0.00283	9.43e-4	9.43e-4	9.43e-4
HRFA3-40-3	$\emptyset 10c/5cm$	29.80	1.507	0.50	0.00566	1.886e-3	1.886e-3	1.886e-3
HRFA3-60-3	$\emptyset 10c/5cm$	30.27	1.516	0.75	0.00849	2.829e-3	2.829e-3	2.829e-3
HRFA3-80-3	$\emptyset 10c/5cm$	30.68	1.525	1.00	0.0113	3.773e-3	3.773e-3	3.773e-3

(1) Denominación del modelo, por ejemplo HRFA1-20-1 significa: Hormigón reforzado con fibras de acero, 1 se asigna a $\emptyset 8c/10 cm$, 2 se asigna a $\emptyset 10c/10 cm$ y 3 se asigna a $\emptyset 10c/5 cm$. El 20 significa 20 Kg/m³ de adición de fibras y finalmente el -1, indica grupo "1" respecto a lo indicado en la figura 5.20.

(2) Armadura de refuerzo por tracción asignada en función a los modelos LT1, LT2 y LT3.

(3) Resistencia uniaxial a compresión del HRFA.

(4) Resistencia uniaxial a tracción del HRFA.

(5) Volumen de fibras adicionado en porcentaje, ver la ecuación (3.40).

(6) Refuerzo disperso equivalente, obtenido de la columna 7 de la tabla 5.6.

(7), (8) y (9) Refuerzo disperso equivalente en las direcciones X, Y y Z.

Los valores de la resistencia residual a tracción del HRFA $\beta_{Z,F}$ y del refuerzo disperso equivalente $\bar{\rho}_s$, presentados en la tabla 5.5; son bastante mayores a los de la tabla 5.6.

Esto se debe principalmente a las expresiones empleadas en ambas tablas para hallar el valor de $\beta_{Z,F}$. En lo que respecta al valor de $\bar{\rho}_s$, la diferencia se hace más marcada y la utilización de estos valores dará lugar a significativas diferencias en el comportamiento de los modelos y de las cargas de punzonamiento que se obtendrán a partir de los mismos.

Esta situación será salvada por medio de la definición del límite elástico de las fibras de acero incorporadas en los modelos, a las cuales se les asigna un comportamiento elastoplástico perfecto y el criterio de falla de Von Mises. De esta forma a los modelos de los grupos 1 y 2, cuya $\beta_{Z,F}$ fue determinada por medio de la expresión (3.46) propuesta por Huang V.Z. (1995); el límite elástico será igual al límite elástico de las fibras de acero determinado para una deformación igual a la de primera fisura del hormigón ($\bar{\beta}_s$), tal como se deduce de la figura 3.21.

En contrapartida, a los modelos del grupo 3 se les asigna un límite elástico igual al indicado en la tabla 5.4, pero afectado por la consideración de la fuerza de arrancamiento de las fibras embebidas en la matriz de hormigón (ver anexo 2).

Mayores detalles referentes a este análisis, son presentados en el apartado 6.2.2, en el cual se presentan los resultados obtenidos para las losas de calibración.

CAPITULO 6

RESULTADOS OBTENIDOS

6.1. INTRODUCCIÓN

A partir de los modelos de elementos finitos descritos en el apartado 5.2 del capítulo 5, en este trabajo se plantea la necesidad de ajustar y calibrar los mismos para su implementación numérica computacional, a través de estudios experimentales ya realizados sobre losas de H^oA^o (Isla, 2008 y Villegas, 2009) y de hormigón armado reforzado con fibras de acero (Higashiyama *et al*, 2011 y Cheng y Parra, 2010); actividad que se plasma en el apartado 6.2.

Como objetivo último de este estudio numérico computacional, se prevé la generación de los modelos indicados en las tablas 5.7, 5.8 y 5.9, para proceder a su análisis de sensibilidad frente al uso de fibras de acero y dar cumplimiento a los objetivos planteados en el capítulo 1.

Esta tarea se desarrolla en el apartado 6.3.

Los resultados correspondientes a cada modelo son presentados en forma de curvas carga – desplazamiento, a partir de las cuales se determinan las respectivas cargas de punzonamiento. La presentación de resultados en forma de curvas carga – desplazamiento busca tener coherencia con los resultados obtenidos por otros investigadores, dedicados al estudio del punzonamiento en losas de hormigón armado reforzado con fibras de acero; quienes realizaron sus experiencias por medios experimentales y/o numéricos.

6.2. RESULTADOS OBTENIDOS PARA AJUSTE Y/O CALIBRACIÓN

6.2.1. Losas de hormigón armado

Los resultados obtenidos de los modelos LT1, LT2 y LT3 (ver tabla 5.1), son presentados en las figuras 6.1, 6.2 y 6.3. En estas figuras se superponen los resultados experimentales (curvas en azul) con los numéricos (curvas en rojo) con la finalidad de contrastarlos.

Las cargas de punzonamiento correspondientes a cada modelo son determinadas a partir de estas curvas y corresponden a la carga máxima que pueden soportar las mismas hasta el instante en que se produzca su colapso.

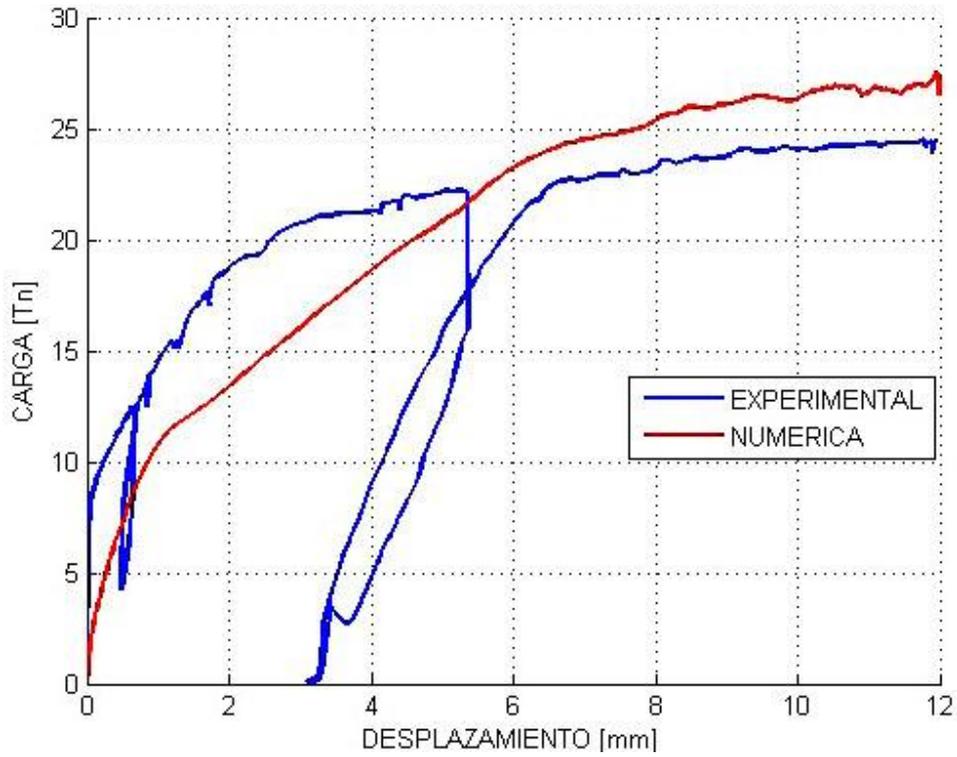


Figura 6.1: Curvas carga – desplazamiento obtenidas para la losa LT1.

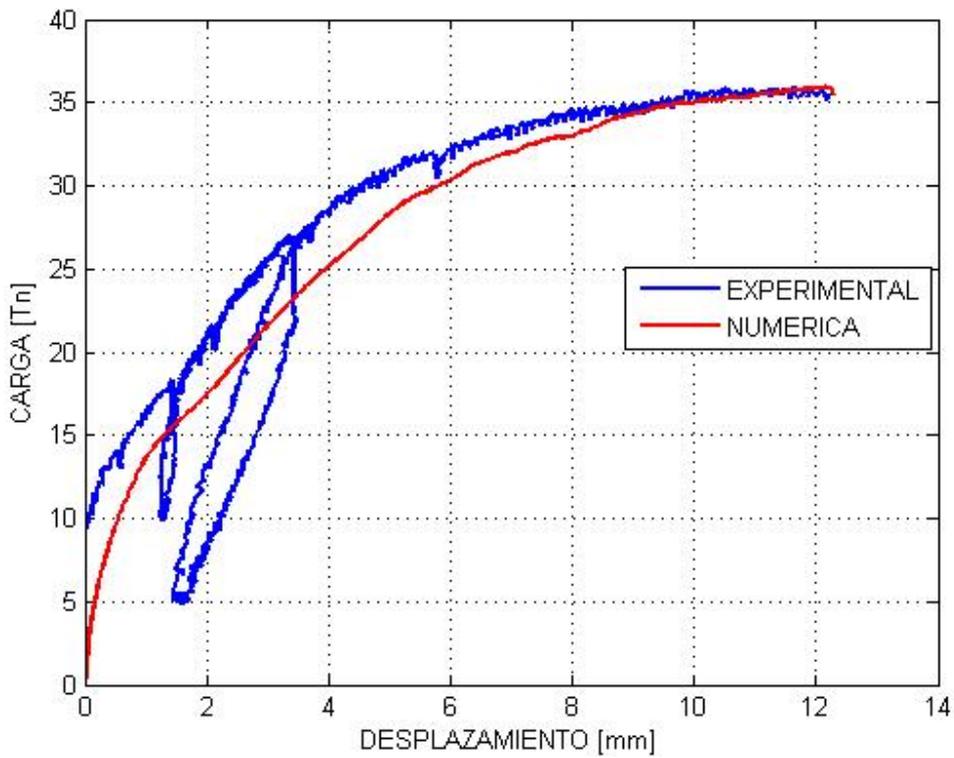


Figura 6.2: Curvas carga – desplazamiento obtenidas para la losa LT2.

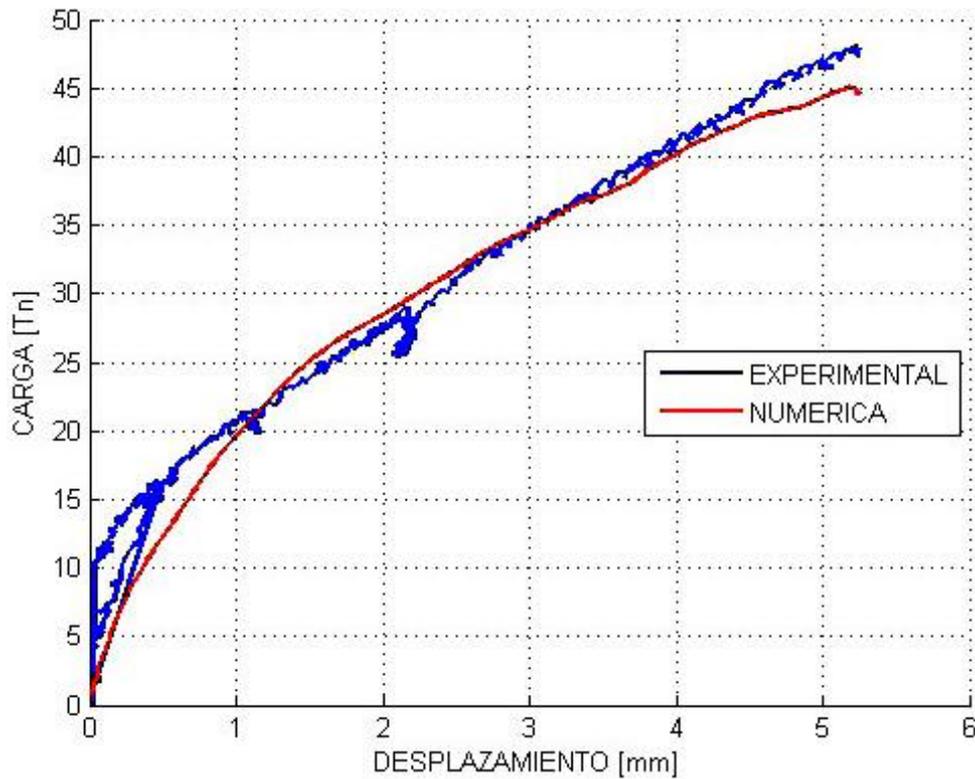


Figura 6.3: Curvas carga – desplazamiento obtenidas para la losa LT3.

El resumen de las cargas de punzonamiento determinadas para estas losas, es presentado en la tabla 6.1, en la cual se incluyen las respectivas cargas de punzonamiento determinadas analíticamente.

Tabla 6.1. Cargas últimas de punzonamiento para las losas LT1, LT2 y LT3.

Losa	Carga Experimental [Tn] (1)	Carga Numérica [Tn] (2)	Diferencia [%] (3)	Modelo Menétrey [Tn] (4)	ACI-318 (2005) [Tn] (5)	EC-2 (2005) [Tn] (6)
LT1	25.00	27.58	+10.30	16.40	20.65	24.13
LT2	35.00	35.91	+2.60	23.80	21.59	28.84
LT3	47.00	45.00	-4.20	39.20	24.15	41.65

(1) Carga de punzonamiento experimental (Ísla, 2008 y Villegas, 2009).

(2) Carga de punzonamiento numérica.

(3) Error relativo porcentual entre los resultados experimentales y los numéricos, $\frac{(2)-(1)}{(1)} \cdot 100$

(4) Carga de punzonamiento obtenida analíticamente por medio del modelo de Menétrey (Villegas, 2009).

(5) Carga de punzonamiento obtenida analíticamente por medio del código ACI-318 (2005) (Villegas, 2009).

(6) Carga de punzonamiento obtenida analíticamente por medio del código EC-2 (2005) (Villegas, 2009).

De acuerdo con la tabla 6.1 la diferencia entre los resultados experimentales (columna 1) y los numéricos (columna 2), tiene un exceso del 10.3% (losa LT1) y a su vez una diferencia en defecto del 4.2% (losa LT3)

Tabla 6.2. Diferencias entre las cargas de punzonamiento experimentales y las obtenidas analíticamente para las losas LT1, LT2 y LT3.

Losa	Carga Experimental [Tn] (1)	Modelo Menétrey [Tn] (2)	ACI-318 (2005) [Tn] (3)	EC-2 (2005) [Tn] (4)	Dif. [%] (5)	Dif. [%] (6)	Dif. [%] (7)
LT1	25.00	16.40	20.65	24.13	+52.40	+21.10	+3.60
LT2	35.00	23.80	21.59	28.84	+47.10	+62.10	+21.40
LT3	47.00	39.20	24.15	41.65	+19.90	+94.10	+12.80

(5) Error relativo porcentual entre los resultados experimentales y los analíticos, $\{[(1)-(2)]/(2)\} * 100$

(6) Error relativo porcentual entre los resultados experimentales y los analíticos, $\{[(1)-(3)]/(3)\} * 100$

(7) Error relativo porcentual entre los resultados experimentales y los analíticos, $\{[(1)-(4)]/(4)\} * 100$

A su vez las cargas de punzonamiento obtenidas analíticamente (columnas 4, 5 y 6) de la tabla 6.1 son considerablemente menores a las experimentales (columna 1, tabla 6.1). En este sentido en la tabla 6.2 se indican las diferencias porcentuales entre las cargas de punzonamiento experimentales y las analíticas donde se ponen de manifiesto las limitaciones y/o consideraciones que realiza cada modelo analítico que hace sus predicciones conservadoras.

El modelo ACI-318 (2005) (columna 3, tabla 6.2) no toma en cuenta el aporte realizado por la armadura por tracción de las losas, resaltándose esta falencia en la predicción realizada para la losa LT3 cuya carga experimental es casi el doble de la predicha por este modelo.

Los modelos de Menétrey (columna 2, tabla 6.2) y del Eurocódigo EC-2 (2005) (columna 4, tabla 6.2) si toman en cuenta el aporte realizado por la armadura por tracción de las losas, pero aun así sus predicciones no son tan aproximadas a las cargas experimentales como lo son las obtenidas numéricamente.

En las figuras 6.4, 6.5 y 6.6 se muestra una comparación entre los patrones de agrietamiento obtenidos experimentalmente y numéricamente por medio de ANSYS. Los incisos “b” de estas figuras corresponden a los resultados numéricos, siendo importante indicar que ANSYS despliega círculos en los planos donde se produjo agrietamiento y octaedros donde se produjo aplastamiento pudiendo obtenerse estos resultados para cada punto de integración o para los

centros de gravedad de los elementos finitos que conforman los modelos. La primera grieta en cada punto de integración o centro de gravedad es representada por círculos de color rojo, mientras que la segunda y la tercera grieta son representadas por círculos verdes y azules respectivamente.

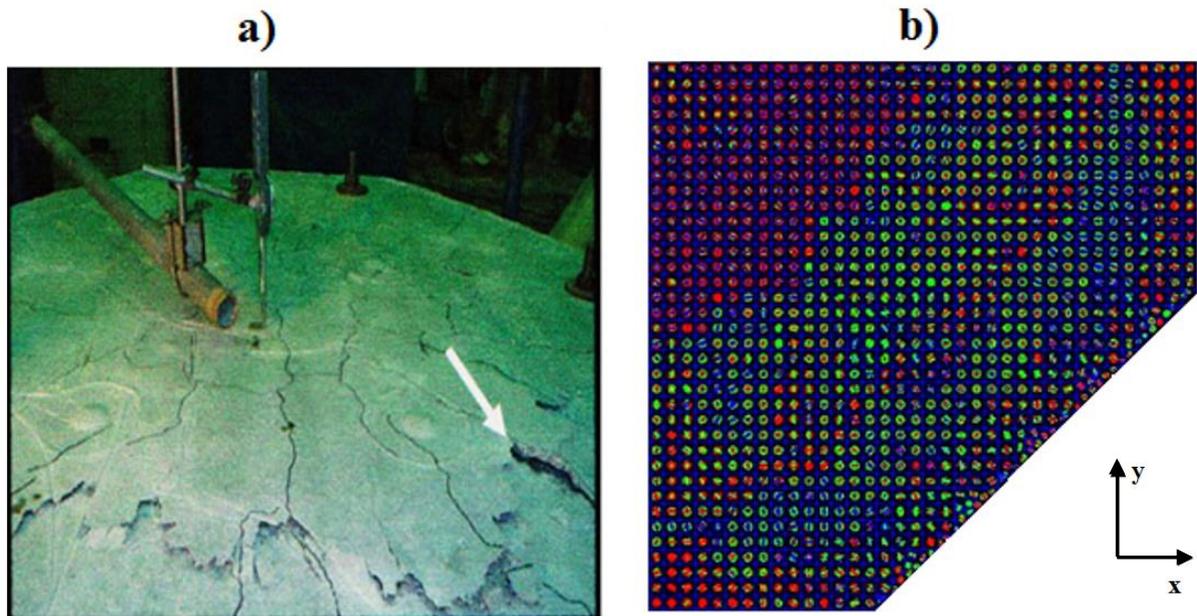


Figura 6.4: Patrón de agrietamiento para la losa LT1 a) Resultado experimental b) Resultado numérico.

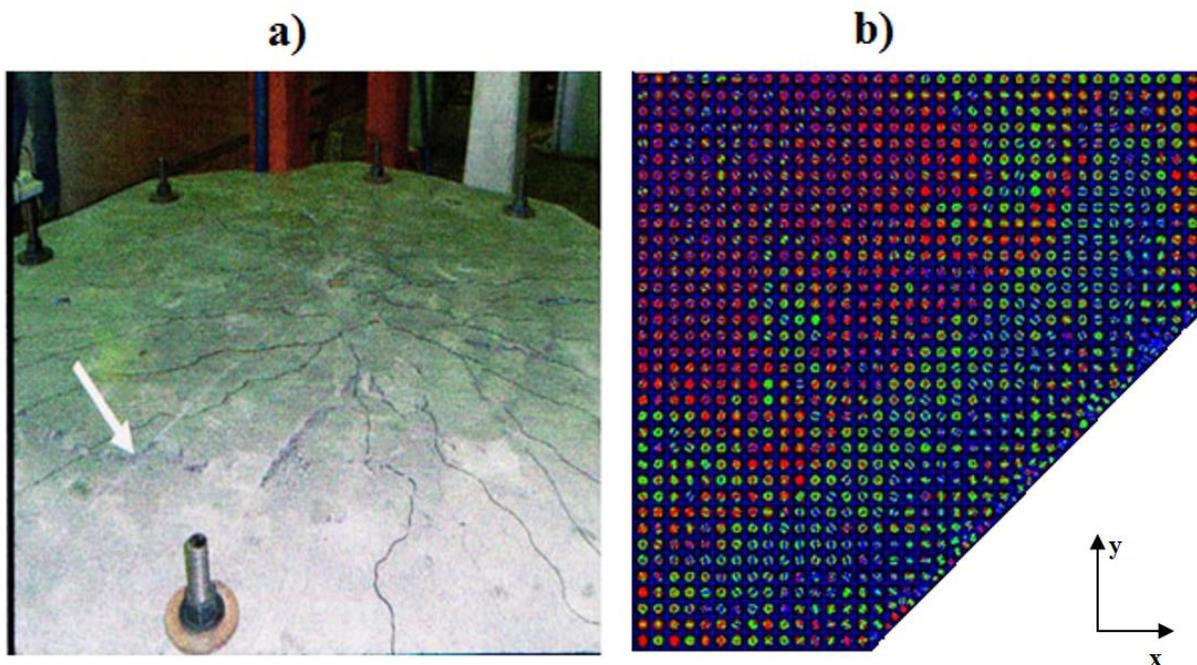


Figura 6.5: Patrón de agrietamiento para la losa LT2 a) Resultado experimental b) Resultado numérico.

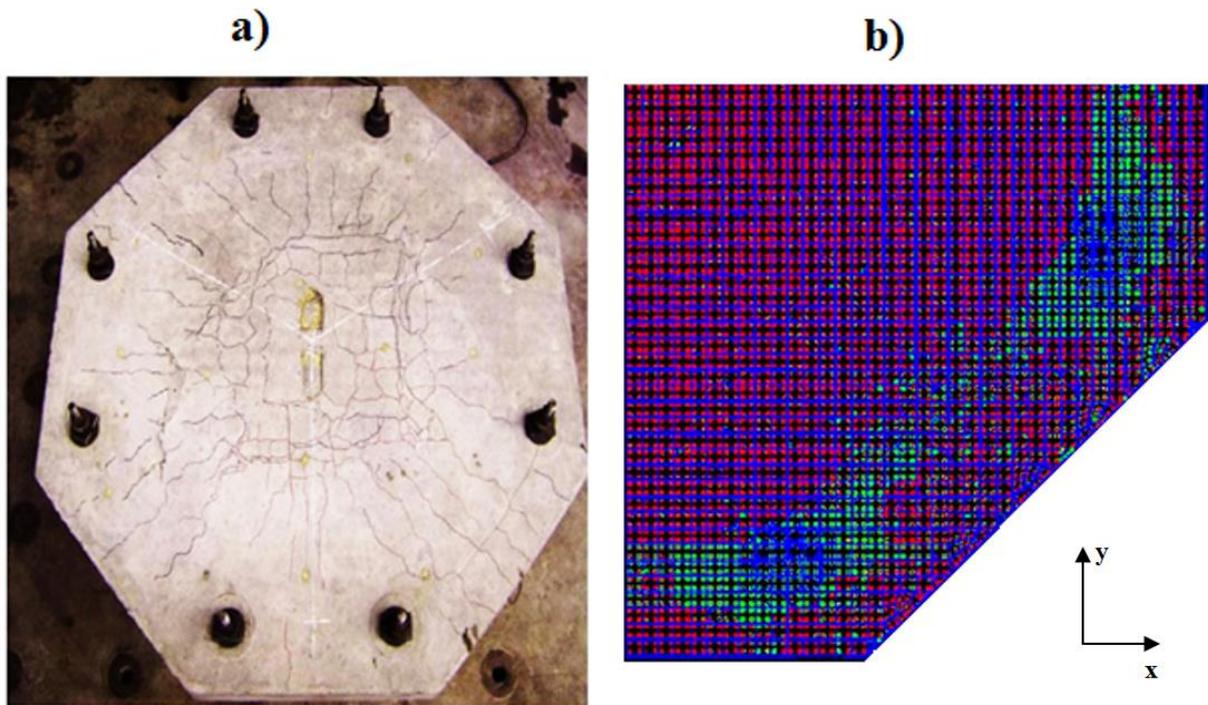


Figura 6.6: Patrón de agrietamiento para la losa LT3 a) Resultado experimental b) Resultado numérico.

6.2.2. Losas de hormigón armado reforzado con fibras de acero

Los resultados que se presentan a continuación son obtenidos a partir de la implementación numérica computacional de las losas LC10, LC14, LC15 y LC18 presentadas en el apartado 5.2.2 del capítulo 5. Las variables a analizar en los modelos de las losas ya mencionadas serán el valor del refuerzo disperso ρ_s , el del refuerzo disperso equivalente $\bar{\rho}_s$ (ver ecuación 3.50) y el límite elástico de las fibras de acero f_y ; que se incorporarán a cada uno de ellos.

Para cada una de las losas LC10, LC14, LC15 y LC18, se generarán cuatro modelos de elementos finitos de acuerdo con las modalidades “a”, “b”, “c” y “d” que se indican a continuación. De esta forma se obtendrán las curvas carga – desplazamiento indicadas en las figuras 6.7, 6.8, 6.9 y 6.10; y consiguientemente las cargas de punzonamiento que se presentan en la tabla 6.4.

Modalidad a: Las fibras de acero serán incorporadas como un refuerzo disperso ρ_s (columna 2, tabla 6.3), igualmente distribuido en tres direcciones ortogonales; al cual se asigna un comportamiento elastoplástico perfecto con un límite de fluencia de 1119 MPa para las losas LC10, LC14 y LC18. Para la losa LC15 se considera un límite de fluencia de 1100 MPa

(columna 1, tabla 6.3). Se hace notar que los límites de fluencia asignados, corresponden a los indicados tanto por Higashiyama *et al* (2011), como por Cheng y Parra (2010).

Modalidad b: Las fibras de acero serán incorporadas como un refuerzo disperso ρ_s (columna 4, tabla 6.3), igualmente distribuido en tres direcciones ortogonales; al cual se asigna un comportamiento elastoplástico perfecto con un límite de fluencia de 800 MPa (para las cuatro losas) (columna 3, tabla 6.3).

La consideración de 800 MPa como límite de fluencia del refuerzo disperso, en lugar de 1119 MPa (para las losas LC10, LC14 y LC18) o 1100 MPa (para la losa LC15); surge de considerar la fuerza de arrancamiento de las fibras en la matriz de hormigón (ver Anexo 2). Al momento de producirse el agrietamiento de la matriz y al servir las fibras como puente que evita la apertura de las fisuras, las mismas primero se deslizan de la matriz, luego se plastifican, pudiendo en algunos casos llegar a cortarse.

Modalidad c: Las fibras de acero serán incorporadas como un refuerzo disperso equivalente $\bar{\rho}_s$, igualmente distribuido en tres direcciones ortogonales; el cual es obtenido por medio del modelo de Huang (ecuación 3.50) (columna 6, tabla 6.3) y la aplicación de la fórmula empírica expresada por la ecuación (3.46). Se asigna a las fibras de acero un comportamiento elastoplástico perfecto; en el cual el límite de fluencia es determinado para una deformación igual a la de primera fisuración del hormigón ($2E-4$) (Núñez López, 2011), (Ribeiro *et al*, 2009) y (Ribeiro y Serna, 2009) (columna 5, tabla 6.3) (ver los 2 últimos párrafos del capítulo 5).

Modalidad d: Las fibras de acero serán incorporadas como un refuerzo disperso equivalente $\bar{\rho}_s$, igualmente distribuido en tres direcciones ortogonales que es obtenido por medio del modelo de Huang (ecuación 3.50); con la diferencia de que la resistencia residual a tracción del HRFA es obtenida por medio de la expresión propuesta por la DAfStB (ecuación 3.47) (columna 8, tabla 6.3). Se asigna a las fibras de acero un comportamiento elastoplástico perfecto y un límite de fluencia de 800 [MPa] para tener en cuenta la fuerza de arrancamiento (ver Anexo 2) (ver los 2 últimos párrafos del capítulo 5).

En las figuras 6.7, 6.8, 6.9 y 6.10 se muestran los resultados obtenidos para las losas LC10, LC14, LC18 y LC15 considerando cada una de las modalidades mencionadas precedentemente.

En estas figuras las curvas $\sigma - \epsilon$ corresponden al hormigón simple y fueron determinadas por medio de los modelos de elementos finitos realizados, en los que se consideró que el volumen de fibras añadido es cero ($V_f = 0 \%$).

El refuerzo introducido en ANSYS para el emular la adición de fibras de acero en cada una de las modalidades descritas precedentemente, es presentado en la tabla 6.3.

Tabla 6.3. Resumen del refuerzo de fibras de acero, para las losas LC10, LC14, LC15 y LC18; conforme a las modalidades “a”, “b”, “c” y “d”.

Losa	Vf	Modalidad “a”		Modalidad “b”		Modalidad “c”		Modalidad “d”	
		f_{yf} [MPa]	ρ_s	f_{po} [MPa]	ρ_s	$\bar{\beta}_s$ [MPa]	$\bar{\rho}_s$	f_{po} [MPa]	$\bar{\rho}_s$
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
LC10	0.67%	1119	0.0067	800	0.0067	42	0.0176	800	0.0067753
LC14	0.67%	1119	0.0067	800	0.0067	42	0.0176	800	0.0067753
LC15	1.00%	1110	0.0100	800	0.0100	42	0.0281	800	0.0114918
LC18	0.67%	1119	0.0067	800	0.0067	42	0.0176	800	0.0067753

(1) Límite de fluencia de las fibras de acero.

(2) Refuerzo disperso determinado a partir de V_f .

(3,7) Umbral de deslizamiento de las fibras, considerando la fuerza de arrancamiento entre la matriz y las fibras (ver Anexo 2).

(4) Refuerzo disperso determinado a partir de V_f .

(5) Límite elástico de las fibras de acero, determinado para una deformación igual a la de primera fisura del hormigón ($\epsilon'_R = 0.0002$).

(6) Refuerzo disperso equivalente, determinado por medio de la ecuación (3.50); la resistencia residual a tracción del HRFA fue determinada por medio de la ecuación (3.46).

(8) Refuerzo disperso equivalente, determinado por medio de la ecuación (3.50); la resistencia residual a tracción del HRFA fue determinada por medio de la ecuación (3.47).

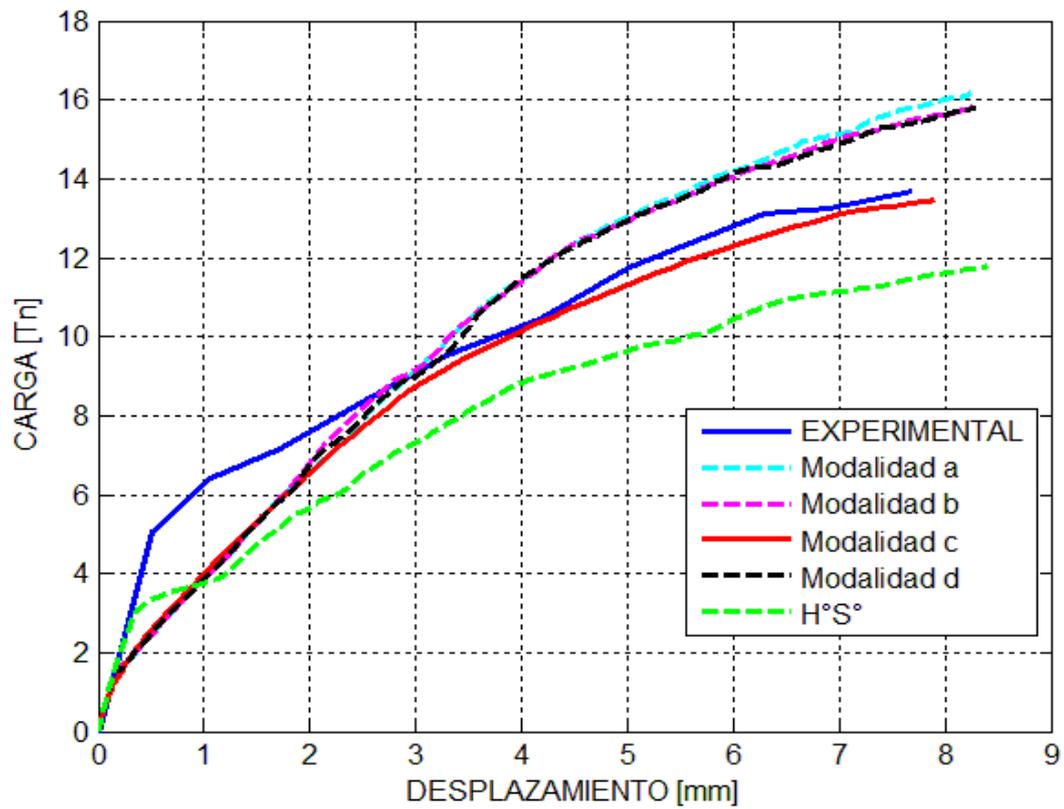


Figura 6.7: Resultados obtenidos para la losa LC10, la curva “— EXPERIMENTAL” fue obtenida por Higashiyama *et al* (2011).

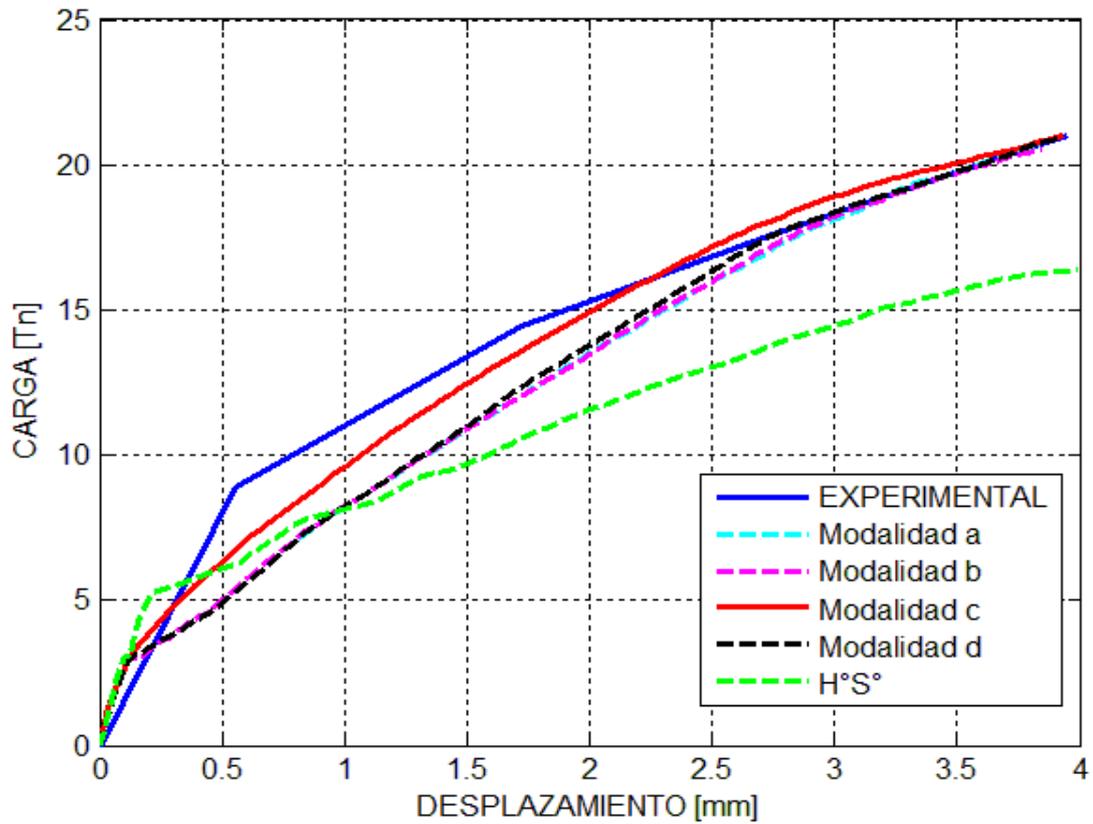


Figura 6.8: Resultados obtenidos para la losa LC14, la curva “— EXPERIMENTAL” fue obtenida por Higashiyama *et al* (2011).

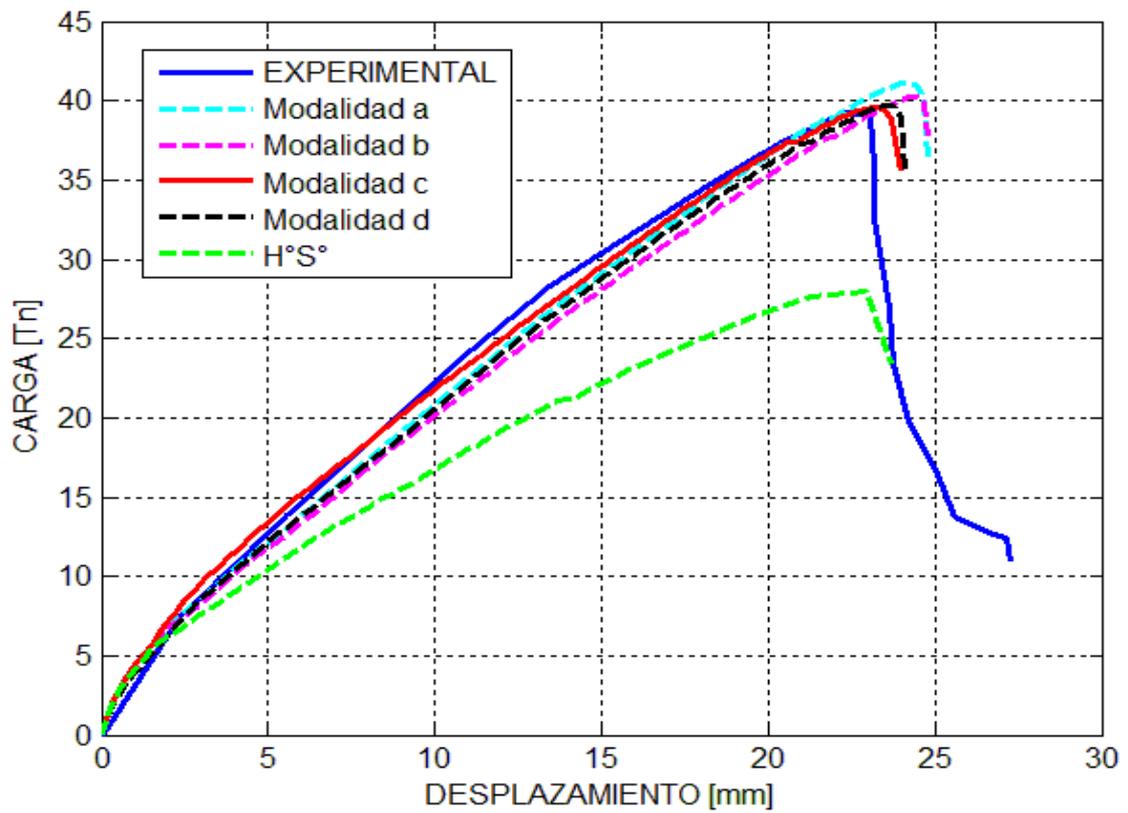


Figura 6.9: Resultados obtenidos para la losa LC15, la curva “— EXPERIMENTAL” fue obtenida por Cheng y Parra (2010).

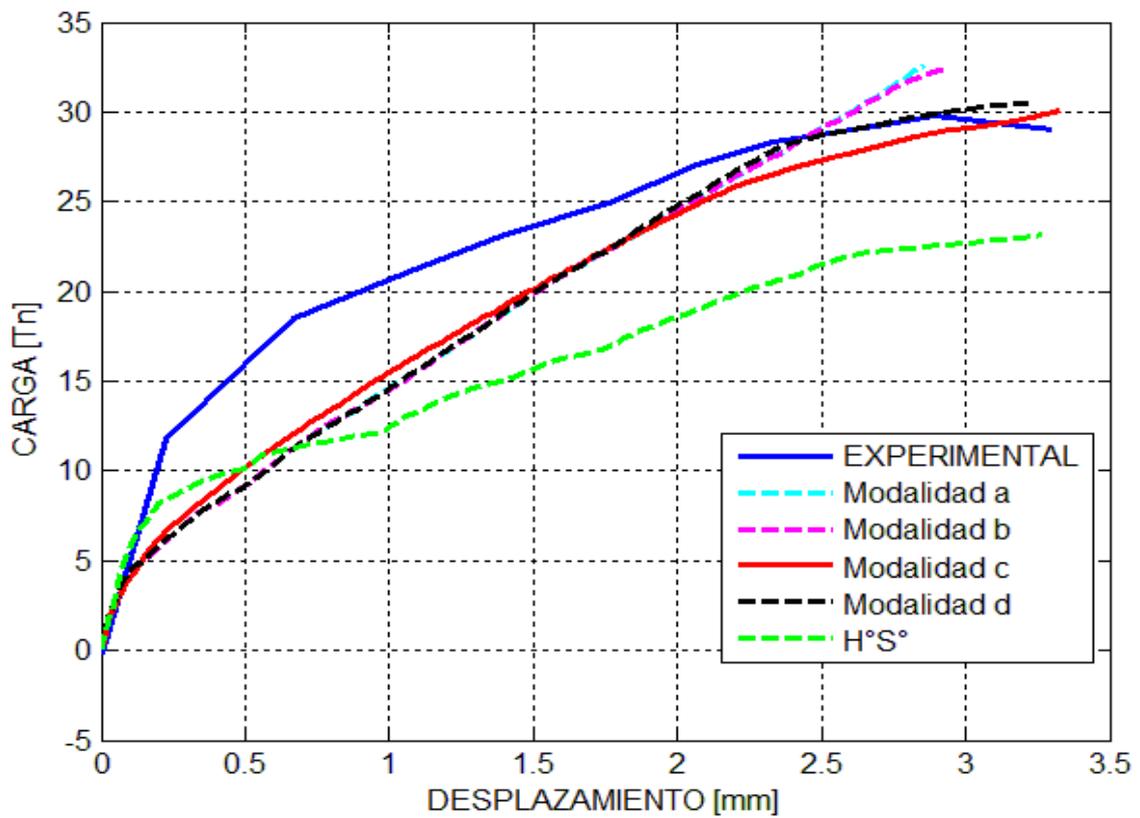


Figura 6.10: Resultados obtenidos para la losa LC18, la curva “— EXPERIMENTAL” fue obtenida por Higashiyama *et al* (2011).

En la tabla 6.3 se puede apreciar que los refuerzos dispersos equivalentes obtenidos de acuerdo a la “modalidad c”, son mayores a los de las otras modalidades; este hecho está compensado por la asignación de un límite de fluencia de 42 MPa a las fibras de acero. Este límite de fluencia es obtenido para una deformación igual a la de primera fisura del hormigón $\varepsilon'_R = 0.0002$, tal como lo establece el modelo de Huang V.Z. (1995) (ver figura 3.21).

Es de destacar la similitud existente entre los refuerzos dispersos equivalentes $\bar{\rho}_s$ de la “modalidad d” y los refuerzos dispersos ρ_s de las modalidades “a” y “b”, debiéndose a la determinación de la resistencia residual a tracción por medio de la ecuación (3.47) en la “modalidad d”.

En la tabla 6.4 son presentadas las cargas de punzonamiento obtenidas a partir de las figuras 6.7, 6.8, 6.9 y 6.10.

Tabla 6.4. Resumen de las cargas de punzonamiento obtenidas para las losas LC10, LC14, LC15 y LC18.

Losa	Carga Experim. (1)	Modalidad “a” (2)	Modalidad “b” (3)	Modalidad “c” (4)	Modalidad “d” (5)
	P_{exp} [Tn]	P_{pun} [Tn]	P_{pun} [Tn]	P_{pun} [Tn]	P_{pun} [Tn]
LC10	13.75	16.17	15.84	13.46	15.79
LC14	21.02	20.75	20.54	20.98	20.94
LC15	39.25	41.13	40.22	39.61	39.70
LC18	29.76	32.63	32.42	30.07	30.50

(1) Carga determinada experimentalmente por Higashiyama *et al* (2011) en el caso de LC10, LC14 y LC18; y por Cheng y Parra (2010) para LC15.

En la tabla 6.5, se presenta el resumen del error relativo porcentual entre las cargas de punzonamiento experimentales y las obtenidas numéricamente para LC10, LC14, LC15 y LC18 de acuerdo con las modalidades “a”, “b”, “c” y “d”.

Tabla 6.5. Resumen del error relativo porcentual entre las cargas de punzonamiento experimentales y las obtenidas numéricamente para cada modalidad.

Losa	Carga Experim.	Modalidad “a”	Modalidad “b”	Modalidad “c”	Modalidad “d”
	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
	P _{exp} [Tn]	[%]	[%]	[%]	[%]
LC10	13.75	+17.6	+15.2	-2.1	+14.8
LC14	21.02	-1.3	-2.3	-0.2	-0.4
LC15	39.25	+4.8	+2.5	+0.9	+1.1
LC18	29.76	+9.6	+8.9	+1.0	+2.5

(6) Carga de punzonamiento experimental.

(7) Error relativo porcentual de los resultados experimentales y numéricos, $\frac{\{(2)-(1)\}}{(1)} \cdot 100$ (columnas de la tabla 6.4).

(8) Error relativo porcentual de los resultados experimentales y numéricos, $\frac{\{(3)-(1)\}}{(1)} \cdot 100$ (columnas de la tabla 6.4).

(9) Error relativo porcentual de los resultados experimentales y numéricos, $\frac{\{(4)-(1)\}}{(1)} \cdot 100$ (columnas de la tabla 6.4).

(10) Error relativo porcentual de los resultados experimentales y numéricos, $\frac{\{(5)-(1)\}}{(1)} \cdot 100$ (columnas de la tabla 6.4).

Por medio de los resultados mostrados en las figuras 6.7, 6.8, 6.9 y 6.10; se puede apreciar que las curvas de la “modalidad c” se ajustan mejor a los resultados experimentales obtenidos por Cheng y Parra (2010) e Higashiyama *et al* (2011) (curvas  EXPERIMENTAL).

A su vez, las curvas de la “modalidad a” como así también las de la “modalidad b” no se ajustan totalmente a las curvas “experimental” de sus correspondientes figuras.

Cabe destacar que las curvas de la “modalidad d” son bastante similares a las curvas de la “modalidad b” y a las de la “modalidad c”, excepto en el caso de la figura 6.10; donde estas últimas producen cargas de punzonamiento bastante mayores.

El resumen presentado en las tablas 6.4 y 6.5, permite apreciar que las cargas de punzonamiento obtenidas aplicando la “modalidad c” (columna 4, tabla 6.4 y columna 4, tabla 6.5) son las más próximas a las cargas obtenidas experimentalmente (columna 1, tabla 6.4 y columna 1, tabla 6.5); siendo la diferencia que existe entre estos resultados menor al 3%.

Los resultados obtenidos por medio de la “modalidad d” (columna 5, tabla 6.4 y columna 5, tabla 6.5) son los que le siguen en bondad de ajuste a los de la “modalidad c”, llegando a

alcanzar el error relativo porcentual entre los resultados numérico computacionales y los experimentales un 14.8%.

Con referencia a los resultados obtenidos por medio de las modalidades “a” y “b”, los mismos no tienen tan buen ajuste a los resultados experimentales como los obtenidos por medio de las modalidades “c” y “d”. En las modalidades “a” y “b” no se toma en cuenta el tipo ni la forma de la fibra adicionada, ni tampoco se toma en cuenta el aporte de la matriz de hormigón en la resistencia del conjunto; pues simplemente se introducen las fibras de forma similar a una cuantía de refuerzo distribuido (*smearred*). La implementación de las modalidades “a” y “b” sirve para apreciar la relación existente entre el volumen del refuerzo disperso ρ_s que emula la adición de fibras de acero y el límite de fluencia de las mismas. El considerar un límite de fluencia igual a 800 MPa, en función a la fuerza de arrancamiento de las fibras (modalidad b); permite obtener resultados mucho mejores que los obtenidos con 1100 MPa o 1119 MPa (modalidad a), siendo estos últimos excesivos.

En contraposición los resultados de las modalidades “c” y “d” son más adecuados a los fines que se persigue en esta tesis, pues permiten tomar en cuenta además del volumen de fibras añadido, su forma y la fuerza de arrancamiento de las mismas en la matriz de hormigón.

6.3. RESULTADOS OBTENIDOS DE LOS MODELOS EMPLEADOS PARA REALIZAR EL ESTUDIO NUMÉRICO

Estos resultados son obtenidos a partir de los modelos que se indican en las tablas 5.7, 5.8 y 5.9; que son presentados en forma de curvas carga – desplazamiento tal como se realizó para los resultados mostrados previamente.

Las mencionadas curvas carga – desplazamiento son elaboradas para diferentes contenidos de fibras de acero, siendo la denominación empleada la siguiente:

Curvas  H°A° NUM : Correspondientes a un volumen de fibras adicionado $V_f = 0\%$.

Curvas  Vf=0.25% : Correspondientes a un volumen de fibras adicionado $V_f = 0.25\%$.

Curvas  Vf=0.5% : Correspondientes a un volumen de fibras adicionado $V_f = 0.5\%$.

Curvas  Vf=0.75% : Correspondientes a un volumen de fibras adicionado $V_f = 0.75\%$.

Curvas  Vf=1.0% : Correspondientes a un volumen de fibras adicionado $V_f = 1\%$.

6.3.1. Losas de hormigón armado reforzado con fibras de acero - grupo 1

Los resultados de este grupo de losas son mostrados en las figuras 6.11 a 6.13, el resumen de las cargas de punzonamiento obtenidas a partir de las mismas es mostrado en la tabla 6.6.

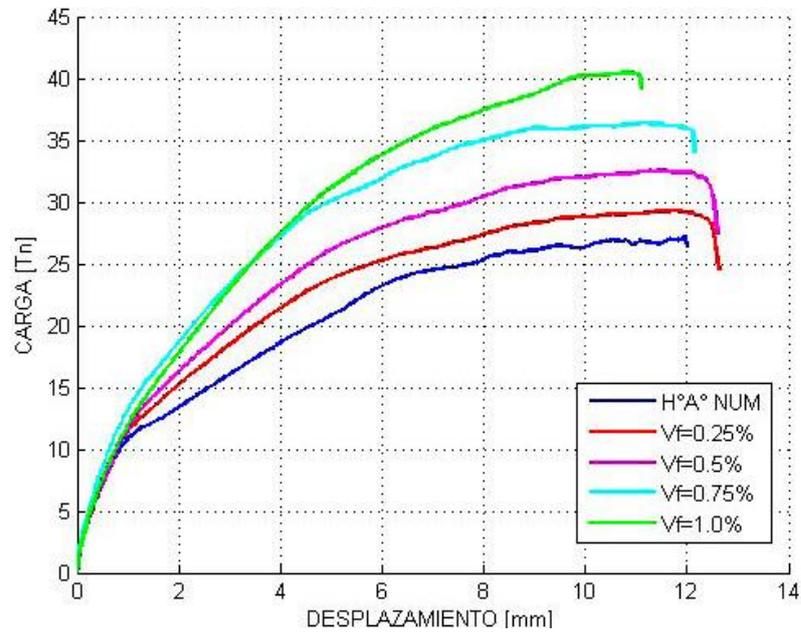


Figura 6.11: Resultados obtenidos para las losas HRFA1-20-1, HRFA1-40-1, HRFA1-60-1, HRFA1-80-1 pertenecientes al grupo1.

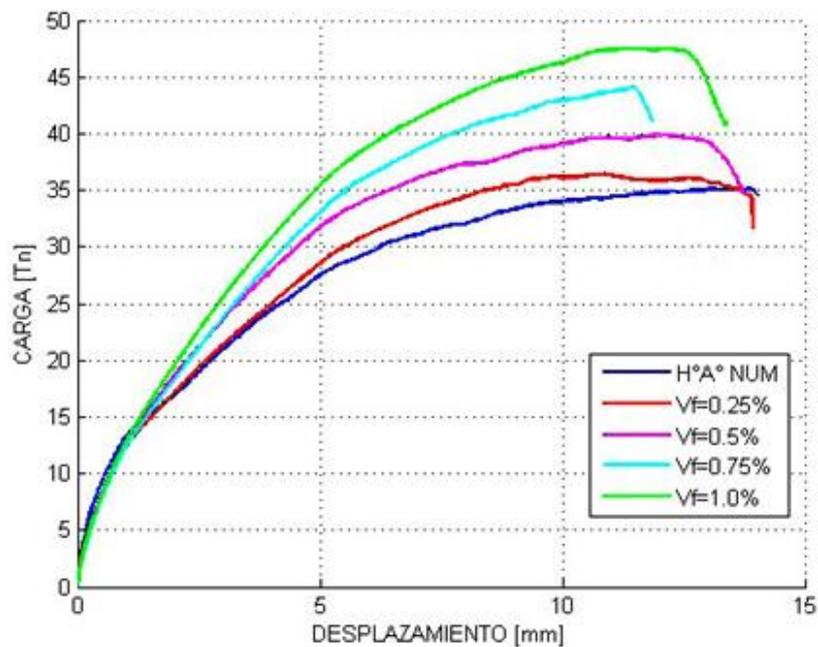


Figura 6.12: Resultados obtenidos para las losas HRFA2-20-1, HRFA2-40-1, HRFA2-60-1, HRFA2-80-1 pertenecientes al grupo1.

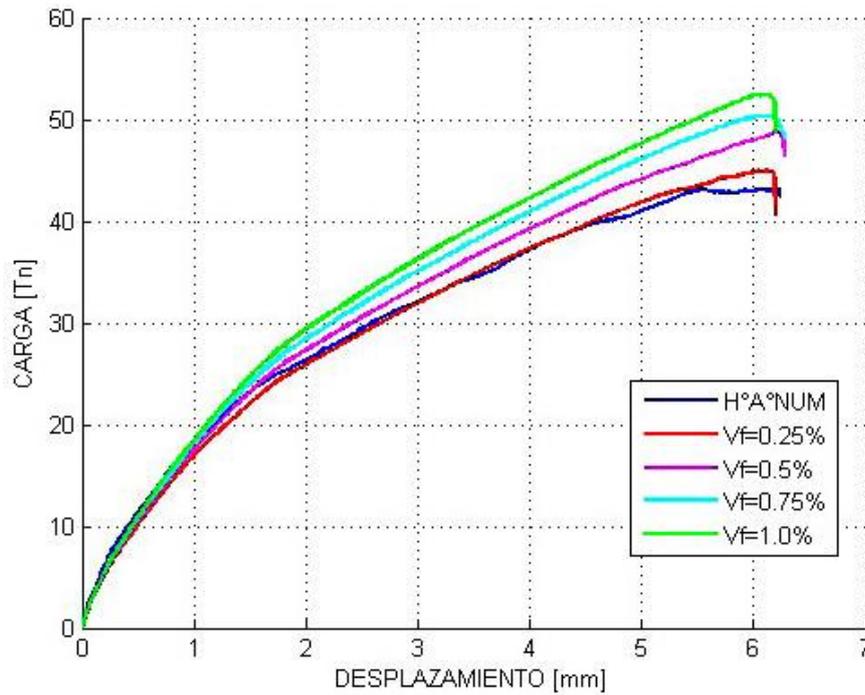


Figura 6.13: Resultados obtenidos para las losas HRFA3-20-1, HRFA3-40-1, HRFA3-60-1, HRFA3-80-1 pertenecientes al grupo 1.

Tabla 6.6. Resumen de la cargas de punzonamiento obtenidas a partir de las figuras 6.11 a 6.13

Losa	Carga Pun. [Tn] (1)	Losa	Carga Pun. [Tn] (2)	Losa	Carga Pun. [Tn] (3)
HRFA1-20-1	29.29	HRFA2-20-1	36.41	HRFA3-20-1	45.00
HRFA1-40-1	32.55	HRFA2-40-1	39.79	HRFA3-40-1	48.72
HRFA1-60-1	36.41	HRFA2-60-1	44.11	HRFA3-60-1	50.37
HRFA1-80-1	40.46	HRFA2-80-1	47.46	HRFA3-80-1	53.48

6.3.2. Losas de hormigón armado reforzado con fibras de acero - grupo 2

Para los modelos del grupo 2, sus curvas carga - desplazamiento son mostradas en las figuras 6.14 a 6.16; el resumen de las cargas de punzonamiento obtenidas a partir de las mismas es presentado en la tabla 6.7.

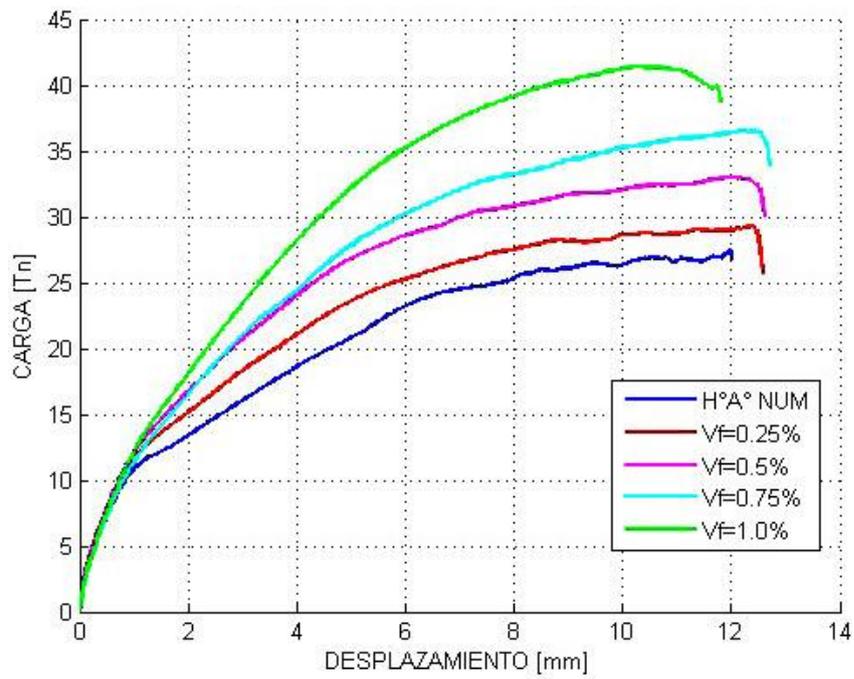


Figura 6.14: Resultados obtenidos para las losas HRFA1-20-2, HRFA1-40-2, HRFA1-60-2, HRFA1-80-2 pertenecientes al grupo2.

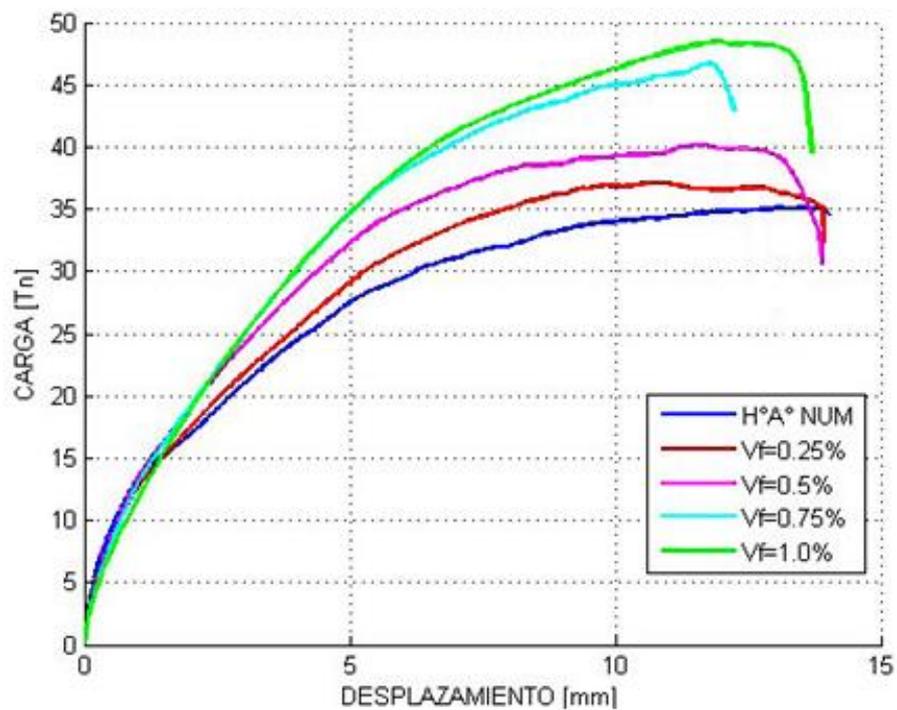


Figura 6.15: Resultados obtenidos para las losas HRFA2-20-2, HRFA2-40-2, HRFA2-60-2, HRFA2-80-2 pertenecientes al grupo2.

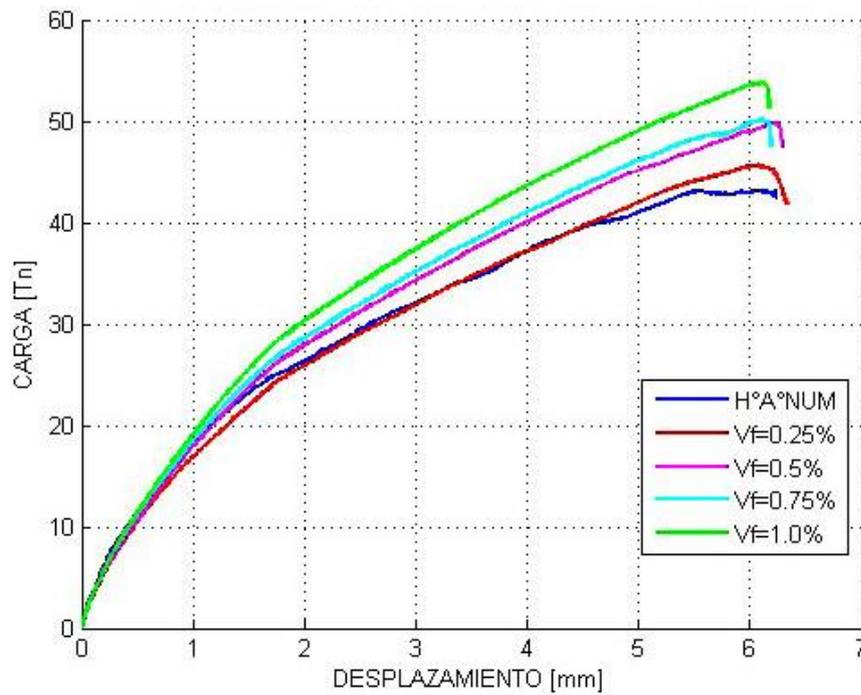


Figura 6.16: Resultados obtenidos para las losas HRFA3-20-2, HRFA3-40-2, HRFA3-60-2, HRFA2-80-2 pertenecientes al grupo2.

Tabla 6.7. Resumen de la cargas de punzonamiento obtenidas a partir de las figuras 6.14 a 6.16

Losa	Carga Pun. [Tn] (1)	Losa	Carga Pun. [Tn] (2)	Losa	Carga Pun. [Tn] (3)
HRFA1-20-2	29.30	HRFA2-20-2	37.13	HRFA3-20-2	45.62
HRFA1-40-2	33.00	HRFA2-40-2	40.15	HRFA3-40-2	49.74
HRFA1-60-2	36.55	HRFA2-60-2	46.65	HRFA3-60-2	50.05
HRFA1-80-2	41.40	HRFA2-80-2	48.49	HRFA3-80-2	53.78

6.3.3. Losas de hormigón armado reforzado con fibras de acero - grupo 3

Los resultados de este grupo de losas son mostrados en las figuras 6.17 a 6.19, el resumen de las cargas de punzonamiento obtenidas a partir de las mismas es mostrado en la tabla 6.8.

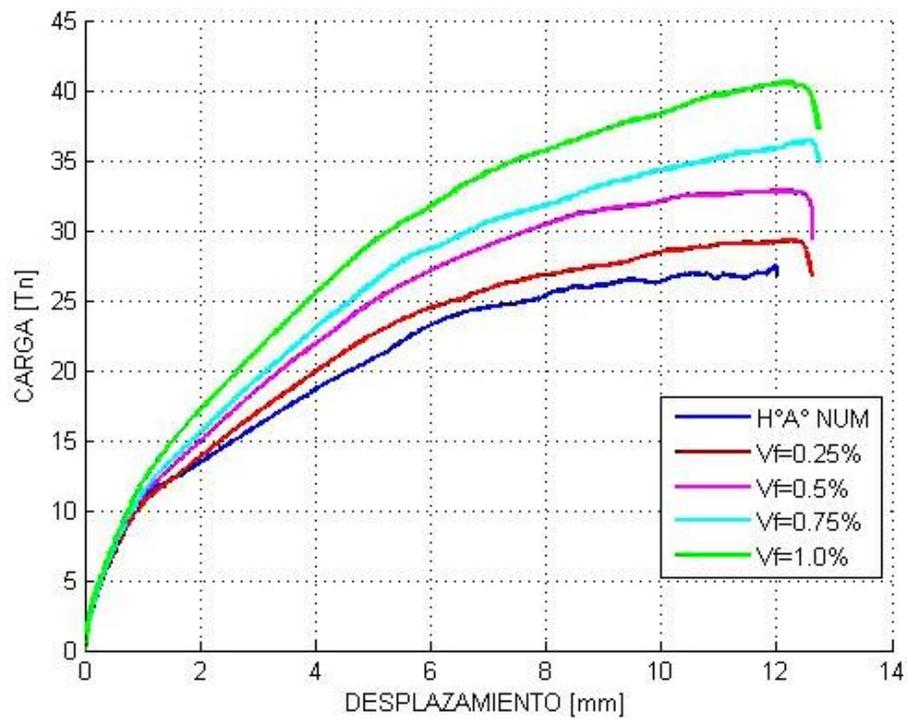


Figura 6.17: Resultados obtenidos para las losas HRFA1-20-3, HRFA1-40-3, HRFA1-60-3, HRFA1-80-3 pertenecientes al grupo3.

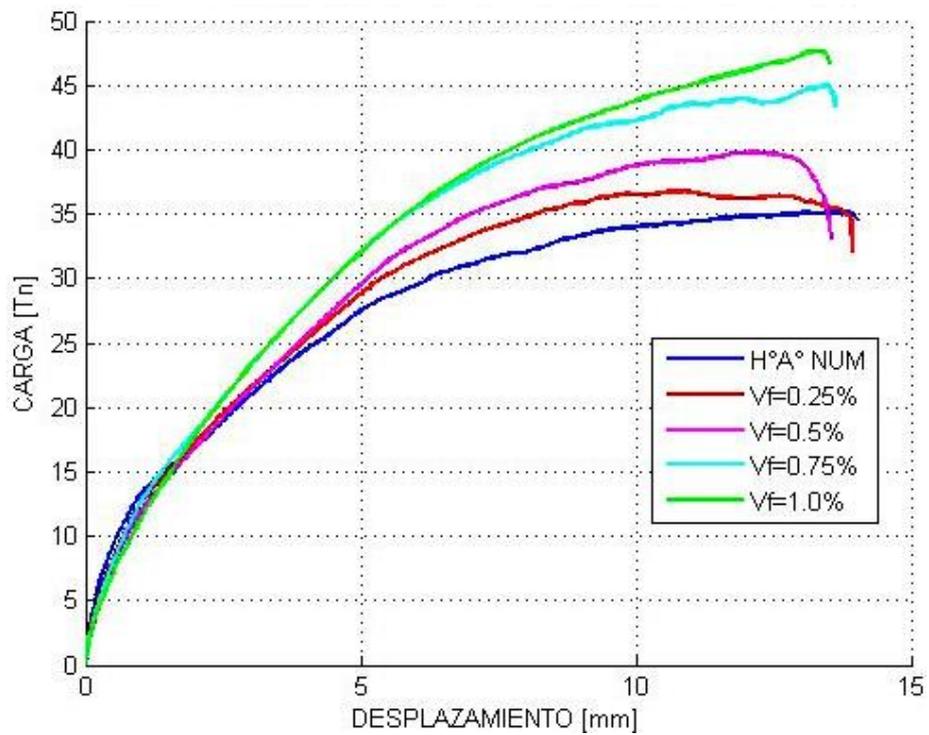


Figura 6.18: Resultados obtenidos para las losas HRFA2-20-3, HRFA2-40-3, HRFA2-60-3, HRFA2-80-3 pertenecientes al grupo3.

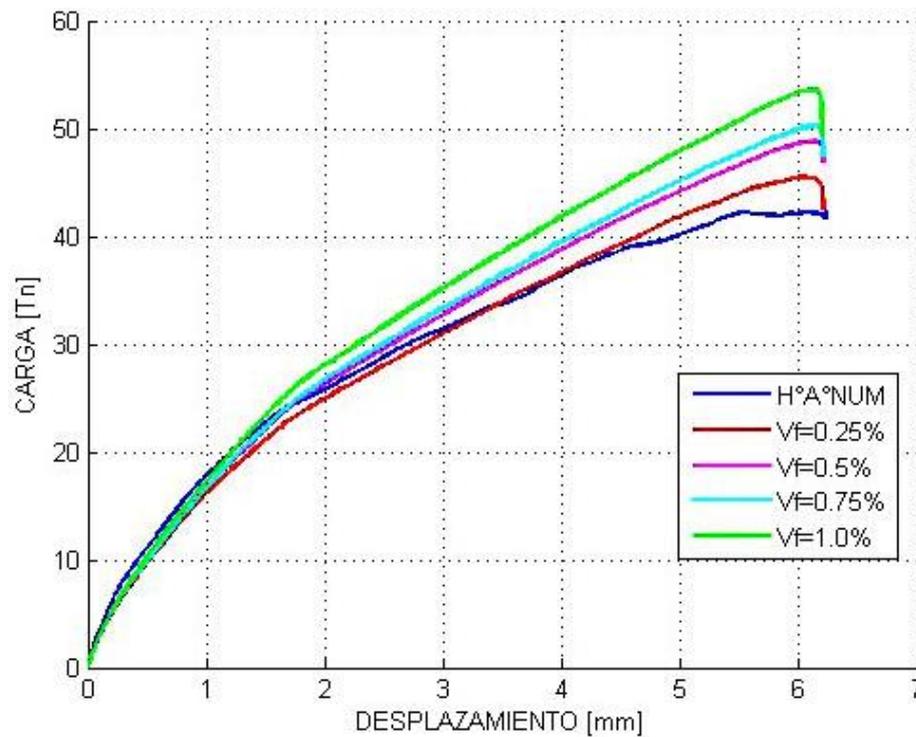


Figura 6.19: Resultados obtenidos para las losas HRFA3-20-3, HRFA3-40-3, HRFA3-60-3, HRFA2-80-3 pertenecientes al grupo3.

Tabla 6.8. Resumen de la cargas de punzonamiento obtenidas a partir de las figuras 6.17 a 6.19

Losa	Carga Pun. [Tn] (1)	Losa	Carga Pun. [Tn] (2)	Losa	Carga Pun. [Tn] (3)
HRFA1-20-3	29.29	HRFA2-20-3	36.77	HRFA3-20-3	45.48
HRFA1-40-3	32.81	HRFA2-40-3	39.80	HRFA3-40-3	48.85
HRFA1-60-3	36.43	HRFA2-60-3	44.98	HRFA3-60-3	50.38
HRFA1-80-3	40.56	HRFA2-80-3	47.62	HRFA3-80-3	53.64

6.4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DEL ESTUDIO NUMÉRICO

Las curvas carga – desplazamiento mostradas en las figuras 6.11 a 6.19, nos permiten apreciar el comportamiento de los modelos desde una carga igual a cero, hasta la carga máxima que produce su colapso (carga de punzonamiento). Este comportamiento será llamado “comportamiento pre-pico”.

El programa computacional de elementos finitos ANSYS caracteriza al hormigón por medio del elemento SOLID65 como un material frágil, lo cual no nos permite apreciar el comportamiento posterior al “pico”.

Cuando los modelos alcanzan la carga de punzonamiento, las curvas de las figuras 6.11 a 6.19 presentan caídas abruptas ya que ANSYS detiene el análisis que realiza, debido a la pérdida de la convergencia ocasionada principalmente por que los esfuerzos en el hormigón superan las resistencias a compresión y a tracción uniaxial especificadas (mayores detalles sobre la modelación en ANSYS de elementos de hormigón, son presentados en el anexo 1).

El comportamiento pre-pico de las curvas de las figuras 6.11 a 6.19, nos permite apreciar que a medida que se incrementa la adición de fibras; las cargas de punzonamiento también aumentan.

Para realizar un análisis cuantitativo del incremento de las cargas de punzonamiento en función del volumen de fibras adicionado, los resultados presentados en las tablas 6.6, 6.7 y 6.8 son agrupados en las tablas 6.9, 6.10 y 6.11; que incluyen los resultados de los modelos de los grupos 1, 2 y 3 pero correspondientes a la misma distribución de armadura.

Además, las cargas de punzonamiento serán contrastadas con las obtenidas analíticamente por medio de las expresiones presentadas por la sociedad alemana del hormigón DAfStB (2012) (ver anexo 4). Estas expresiones fueron empleadas por Tazaly (2011) para estudiar el punzonamiento en losas de hormigón armado reforzado con fibras de acero, obteniendo resultados satisfactorios.

De esta forma también será posible apreciar la influencia en los resultados, de factores tales como la orientación de las fibras y la resistencia residual a tracción del HRFA obtenida por medio de las expresiones (3.46) y (3.47).

Tabla 6.9. Resumen de las cargas de punzonamiento para los modelos con armadura $\varnothing 8c/10cm$ y comparación con los resultados obtenidos analíticamente.

Vf [%]	Grupo 1 [Tn] (1)	Grupo 2 [Tn] (2)	Grupo 3 [Tn] (3)	DAfStB [Tn] (4)
0.0%	27.58 ^(*)	27.58 ^(*)	27.58 ^(*)	25.81 ^(**)
0.25%	29.30	29.30	29.29	29.23
0.50%	32.55	33.00	32.81	32.65
0.75%	36.41	36.55	36.43	36.06
1.00%	40.46	41.40	40.56	39.48

^(*) Ver tabla 6.1.

^(**) Ver tabla A4.1 (anexo 4).

(1) Resultados de la columna (1) de la tabla 6.5.

(2) Resultados de la columna (1) de la tabla 6.6.

(3) Resultados de la columna (1) de la tabla 6.7.

(4) Resultado analítico, ver tabla A4.2 anexo 4.

Tabla 6.10. Resumen de la cargas de punzonamiento para los modelos con armadura $\varnothing 10/10cm$ y comparación con los resultados obtenidos analíticamente.

Vf [%]	Grupo 1 [Tn] (1)	Grupo 2 [Tn] (2)	Grupo 3 [Tn] (3)	DAfStB [Tn] (4)
0.0%	35.91 ^(*)	35.91 ^(*)	35.91 ^(*)	31.15 ^(**)
0.25%	36.41	37.13	36.77	34.57
0.50%	39.79	40.15	39.80	37.98
0.75%	44.11	46.65	44.98	41.40
1.00%	47.46	48.49	47.62	44.82

^(*) Ver tabla 6.1.

^(**) Ver tabla A4.1 (anexo 4).

(1) Resultados de la columna (2) de la tabla 6.5.

(2) Resultados de la columna (2) de la tabla 6.6.

(3) Resultados de la columna (2) de la tabla 6.7.

(4) Resultado analítico, ver tabla A4.2 anexo 4.

Tabla 6.11. Resumen de la cargas de punzonamiento para los modelos con armadura $\varnothing 10/5cm$ y comparación con los resultados obtenidos analíticamente.

Vf [%]	Grupo 1 [Tn] (1)	Grupo 2 [Tn] (2)	Grupo 3 [Tn] (3)	DAfStB [Tn] (4)
0.0%	45.00 ^(*)	45.00 ^(*)	45.00 ^(*)	39.96 ^(**)
0.25%	45.00	45.62	45.48	43.38
0.50%	48.72	49.74	48.85	46.80
0.75%	50.37	50.05	50.38	50.21
1.00%	53.48	53.78	53.64	53.63

^(*) Ver tabla 6.1.

^(**) Ver tabla A4.1 (anexo 4).

(1) Resultados de la columna (3) de la tabla 6.5.

(2) Resultados de la columna (3) de la tabla 6.6.

(3) Resultados de la columna (3) de la tabla 6.7.

(4) Resultado analítico, ver tabla A4.2 anexo 4.

A continuación, los resultados de las tablas 6.9, 6.10 y 6.11 son presentados en forma gráfica por medio de las figuras 6.20, 6.21 y 6.22.

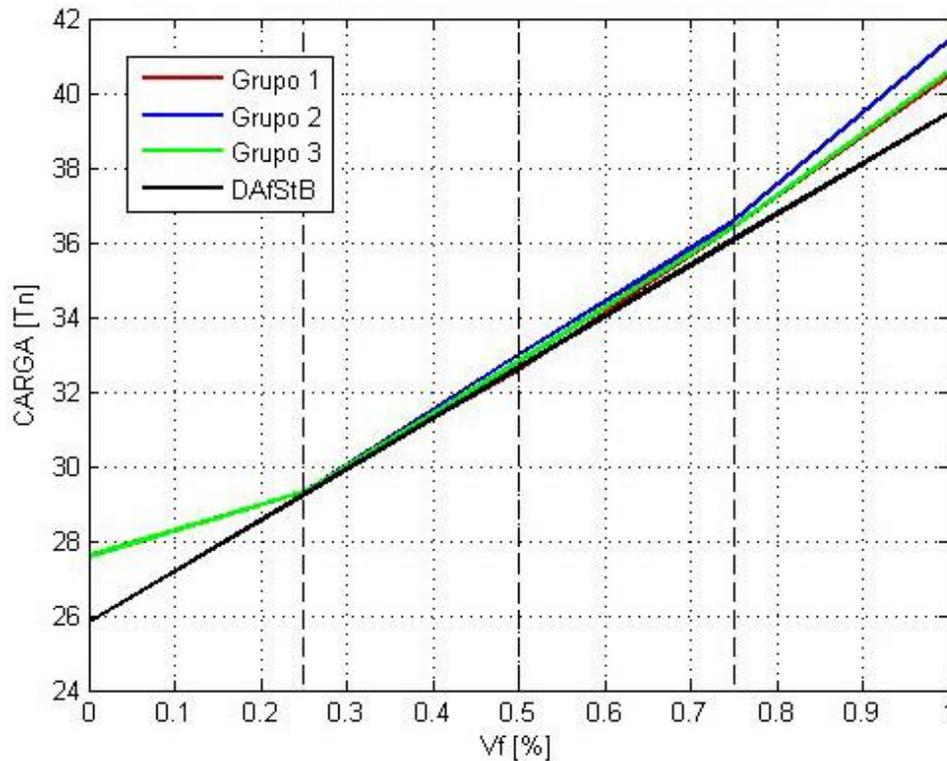


Figura 6.20: Representación gráfica de los resultados de la tabla 6.9.

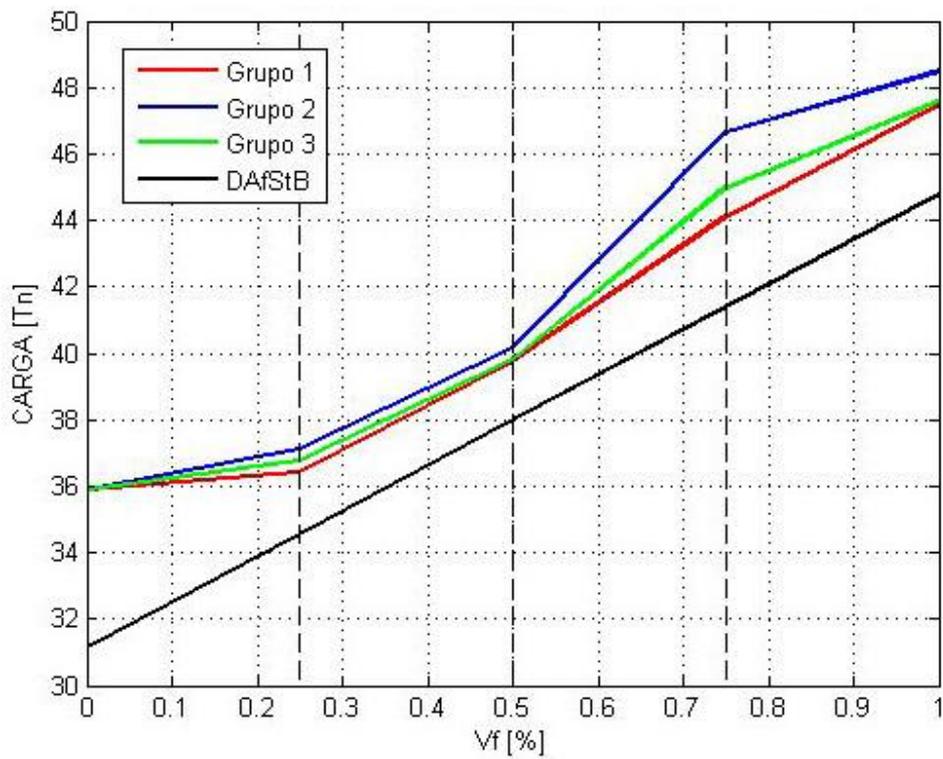


Figura 6.21: Representación gráfica de los resultados de la tabla 6.10.

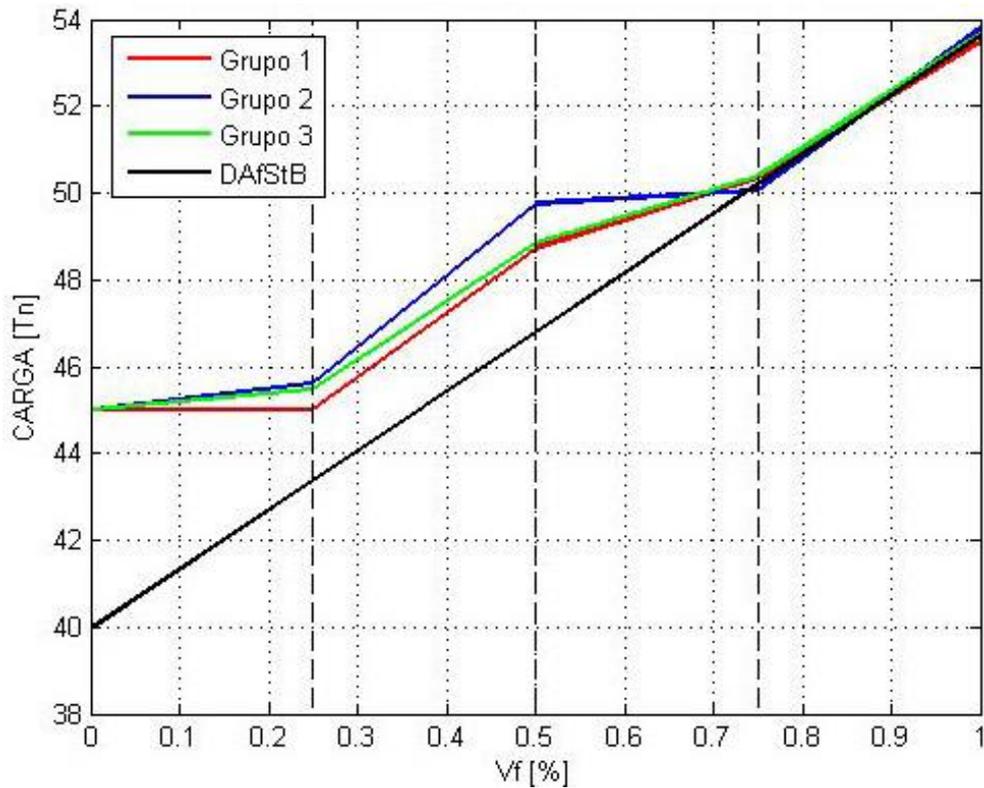


Figura 6.22: Representación gráfica de los resultados de la tabla 6.11.

Considerando que en los grupos 1 y 3 las fibras de acero se orientan en las direcciones X, Y y Z en volúmenes iguales, mientras que en el grupo 2 las fibras se orientan principalmente en las direcciones X e Y (fondo del encofrado que contiene al HRFA) y un volumen menor de fibras en la dirección Z (elevación del encofrado); por intermedio de las tablas 6.9 a 6.11 y de las figuras 6.20 a 6.22 se realizan las siguientes apreciaciones:

- 1.- Los resultados del grupo 2 son ligeramente mayores a los de los otros grupos.
- 2.- Existe bastante similitud entre los resultados del grupo 1 y los del grupo 3.
- 3.- La gran mayoría de los resultados de los grupos 1, 2 y 3 son mayores a los obtenidos analíticamente por medio del reglamento DAfStB, salvo contadas excepciones.

Como ya se mencionó, a medida que se incrementa la adición de fibras; las cargas de punzonamiento aumentan. En ese sentido se presenta en las tablas 6.12 a 6.14 el incremento porcentual en la carga de punzonamiento en función de la adición de fibras de acero y a la armadura de las losas.

Tabla 6.12. Incremento porcentual producido en la carga de punzonamiento, por la adición de fibras de acero en las losas con armadura $\emptyset 8c/10cm$.

Vf [%]	Grupo 1 (*) [%]	Grupo 2 (*) [%]	Grupo 3 (*) [%]	DAfStB (**) [%]
0.25%	+6.2	+6.2	+6.2	+13.2
0.50%	+18.0	+19.7	+18.9	+26.5
0.75%	+32.0	+32.5	+32.1	+39.7
1.00%	+46.7	+50.1	+47.1	+52.9

(*) Comparación realizada respecto a la carga $P=27.58$ [Tn], ver tablas 6.1 y 6.9.

(**) Comparación realizada respecto a la carga $P=25.8125$ [Tn], ver tabla A4.1 del anexo 4.

Tabla 6.13. Incremento producido en la carga de punzonamiento, por la adición de fibras de acero en las losas con armadura $\emptyset 10c/10cm$.

Vf [%]	Grupo 1 (*) [%]	Grupo 2 (*) [%]	Grupo 3 (*) [%]	DAfStB (**) [%]
0.25%	+1.4	+3.4	+2.4	+10.9
0.50%	+10.8	+11.8	+10.8	+21.9
0.75%	+22.8	+29.9	+25.3	+32.9
1.00%	+32.2	+35.0	+32.6	+43.9

(*) Comparación realizada respecto a la carga $P = 35.9103$ [Tn], ver tablas 6.1 y 6.10.

(**) Comparación realizada respecto a la carga $P = 31.1513$ [Tn], ver tabla A4.1 del anexo 4.

Tabla 6.14. Incremento producido en la carga de punzonamiento, por la adición de fibras de acero en las losas con armadura $\emptyset 10c/5cm$.

Vf [%]	Grupo 1 (*) [%]	Grupo 2 (*) [%]	Grupo 3 (*) [%]	DAfStB (**) [%]
0.25%	+0.01	+1.4	+1.1	+8.6
0.50%	+8.3	+10.5	+8.6	+17.1
0.75%	+11.9	+11.2	+11.9	+25.6
1.00%	+18.8	+19.5	+19.2	+34.2

(*) Comparación realizada respecto a la carga $P = 45.00$ [Tn], ver tablas 6.1 y 6.11.

(**) Comparación realizada respecto a la carga $P = 39.9630$ [Tn], ver tabla A4.1 del anexo 4.

El análisis de los resultados presentados en las tablas 6.12 a 6.14, permite apreciar que los mayores incrementos en las cargas de punzonamiento se producen en las losas con armadura $\emptyset 8c/10cm$ y los menores en las provistas de armadura $\emptyset 10c/5cm$.

De estos resultados se puede concluir, que a mayor armadura dispuesta en las losas, menor es el aporte de las fibras de acero para resistir el corte por punzonamiento.

En las figuras 6.23 a 6.25 se grafican los resultados presentados en las tablas 6.12 a 6.14.

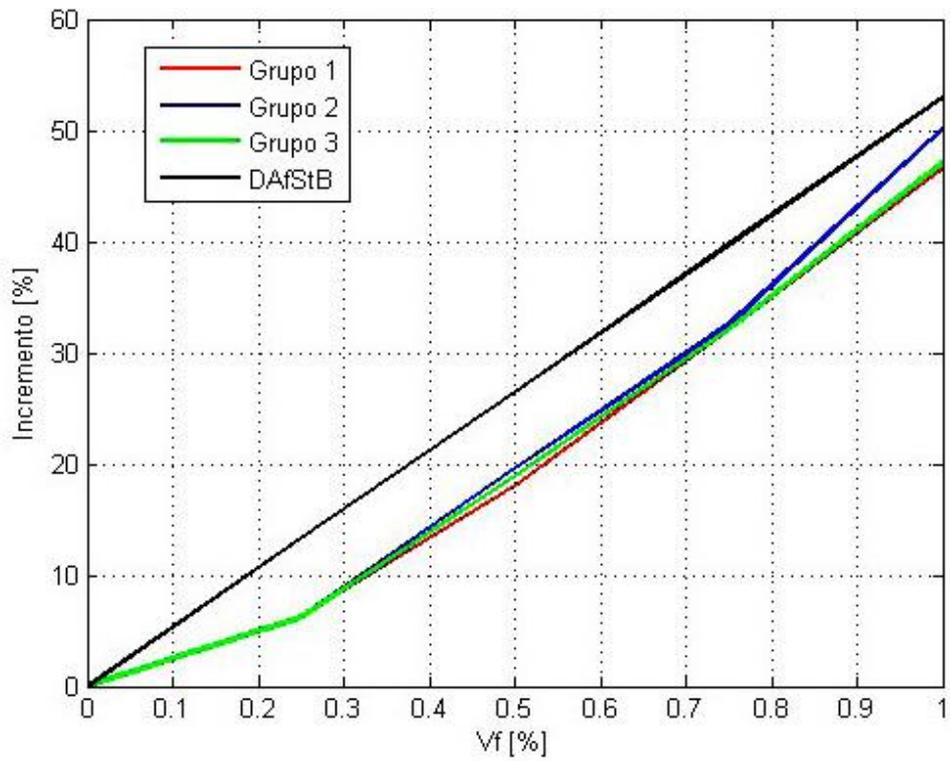


Figura 6.23: Representación gráfica de los resultados de la tabla 6.12.

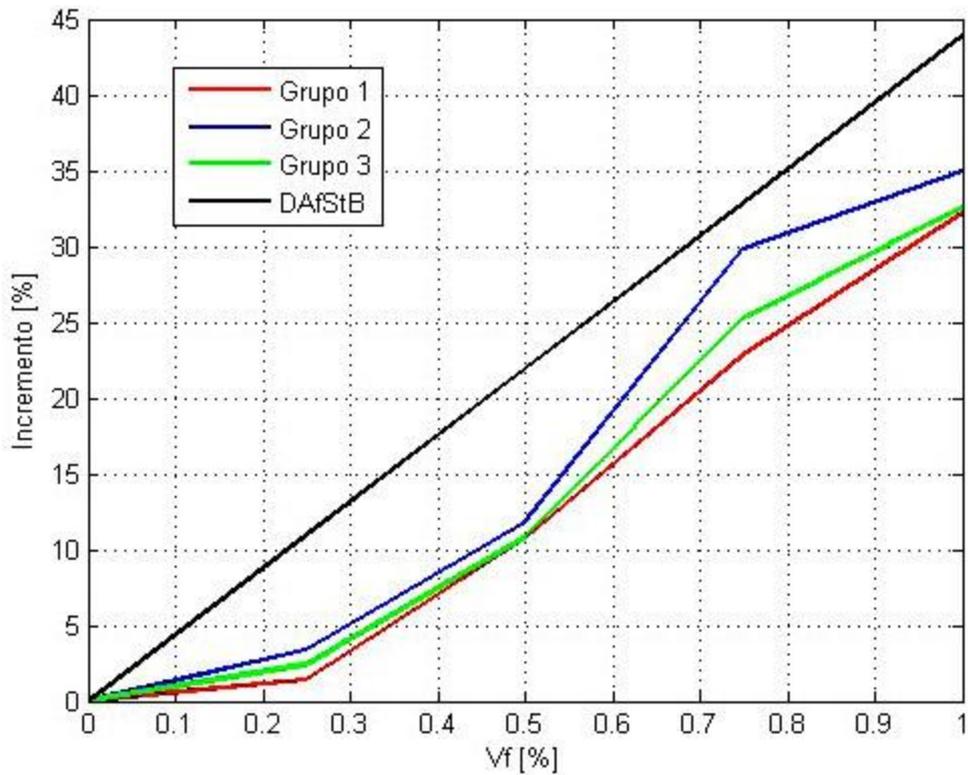


Figura 6.24: Representación gráfica de los resultados de la tabla 6.13.

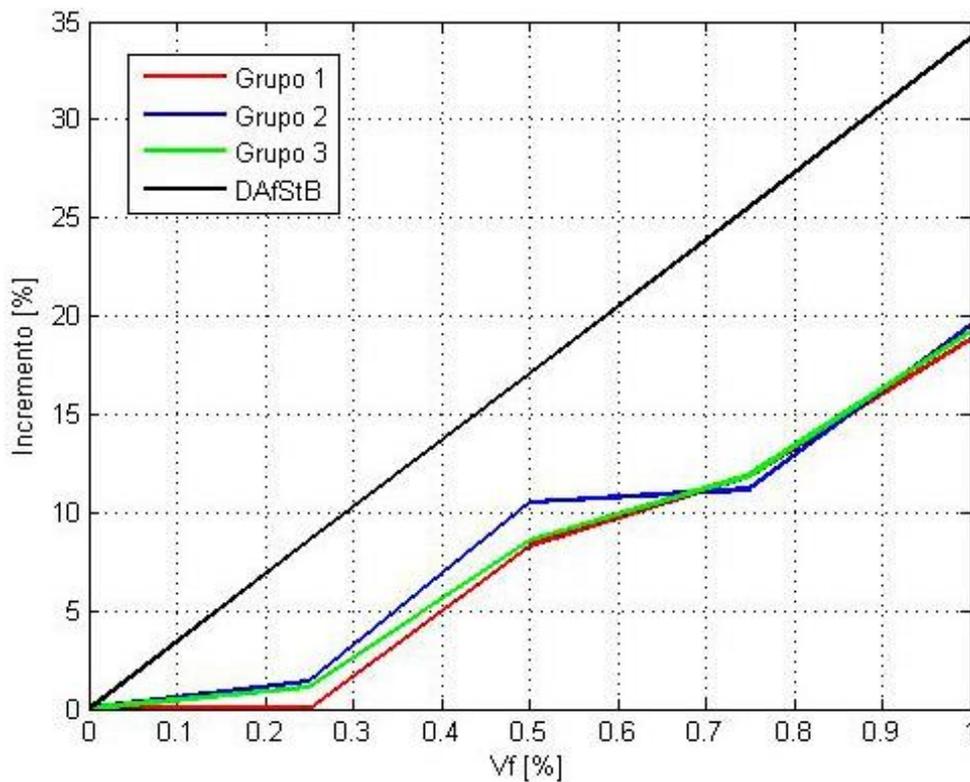


Figura 6.25: Representación gráfica de los resultados de la tabla 6.14.

El análisis de las figuras 6.23 a 6.25, indica lo siguiente:

- Para los resultados obtenidos por medio de DAFStB (2012), existe una aparente linealidad entre el volumen de fibras adicionado y el incremento porcentual en la carga de punzonamiento.
- En lo referente a los resultados de los grupos 1, 2 y 3, no puede indicarse a priori el tipo de relación existente entre el volumen de fibras adicionado y el incremento porcentual en la carga de punzonamiento. Se presenta en la figura 6.26 el diagrama de dispersión de los datos de las tablas 6.12 a 6.14 y el ajuste de los mismos por medio de polinomios de tercer orden, siendo la suma de los cuadrados de los residuos las siguientes:

- $f_{i8c/10cm}$: 1.25×10^{-14}
- $f_{i10c/10cm}$: 2.49×10^{-14}
- $f_{i10c/5cm}$: 8.88×10^{-15}

Estos valores indican que el ajuste realizado es satisfactorio (valores próximos a cero).

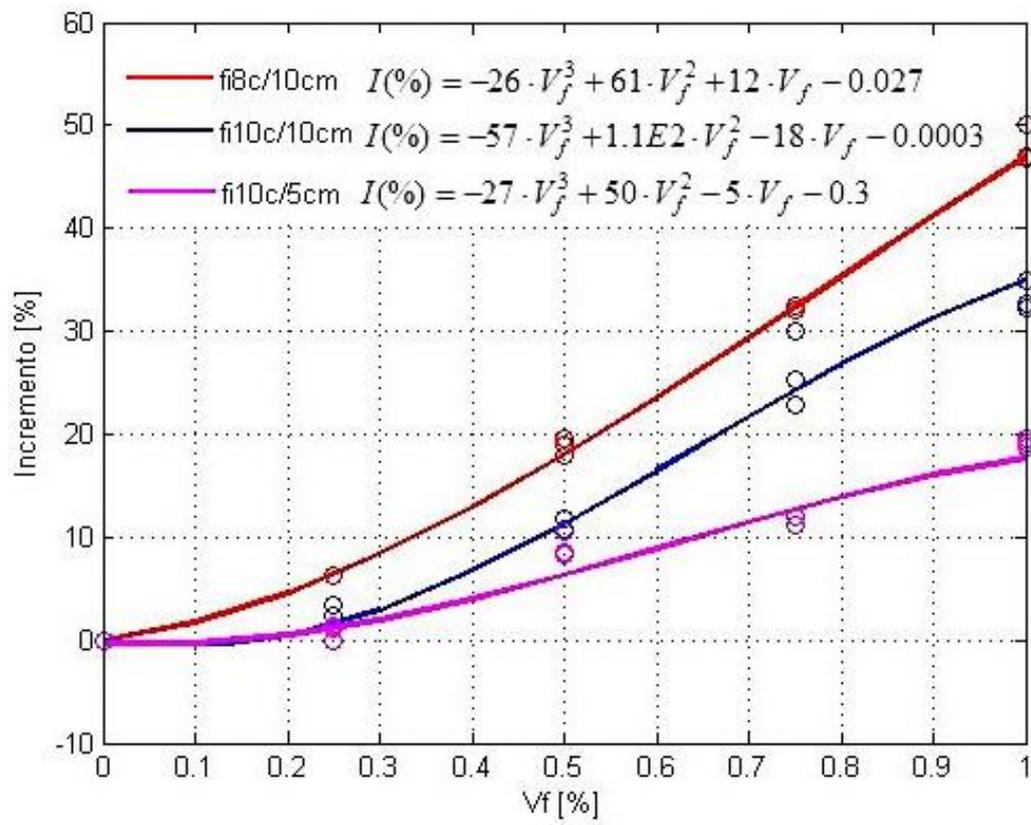


Figura 6.26: Diagrama de dispersión y ajuste no lineal de los resultados presentados en las tablas 6.12 a 6.14.

CAPITULO 7

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. CONCLUSIONES

En esta tesis se empleó el programa computacional de elementos finitos ANSYS para estudiar el punzonamiento en losas de hormigón armado reforzado con fibras de acero. En primera instancia se modelaron en ANSYS losas de hormigón armado y de hormigón armado reforzado con fibras de acero, las mismas que fueron ensayadas experimentalmente por otros investigadores. Estas losas sirvieron como modelos de calibración, permitiendo ajustar parámetros y establecer criterios de convergencia.

Posteriormente, se procedió a realizar un análisis de sensibilidad en el cual a modelos de elementos finitos de losas de hormigón armado del mismo espesor pero con armaduras de refuerzo diferentes (cuya finalidad fue obtener fallas del tipo dúctil y del tipo frágil), se adicionaron fibras de acero con ganchos en sus extremos; desde un volumen de 0.25% hasta 1% con la finalidad de determinar la influencia de las mismas en la carga de punzonamiento de cada una de las losas.

Las conclusiones a las que se arribó fruto del trabajo realizado son las siguientes:

1.- La generación de modelos de elementos finitos de losas de hormigón armado reforzado con fibras de acero, empleando ANSYS; permite describir el comportamiento de los materiales de manera adecuada, obteniendo curvas carga – desplazamiento cuyo contraste con aquellas obtenidas experimentalmente es satisfactorio.

2.- La inclusión del refuerzo de fibras de acero en modelos de elementos finitos empleando el modelo de Huang V.Z. (1995), pero aproximando la resistencia residual a tracción ya sea por medio de la expresión propuesta por Huang V.Z. (1995) o la indicada en el reglamento DAfStB (2012) permiten obtener resultados muy similares cuya diferencia no supera el 1%. La consideración que debe tenerse en cuenta en cada caso, es el límite de fluencia a asignar a las fibras de acero.

3.- En lo concerniente a la orientación de los volúmenes de fibras de acero, la consideración de que la mayor parte de las fibras se orientan en dos direcciones ortogonales coincidentes con la base de los modelos y el volumen restante se orienta en la dirección coincidente con la elevación; genera resultados ligeramente mayores a los obtenidos considerando que las fibras se orientan en volúmenes iguales en tres direcciones ortogonales (esta diferencia no supera el 3%). En caso de realizar los modelos en ANSYS, resulta una buena aproximación el considerar que las fibras se orientan de forma igualitaria en tres direcciones ortogonales tal como lo establece el modelo de Huang V.Z. (1995).

4.- El análisis de sensibilidad realizado, permite apreciar que el volumen de fibras adicionado influye notablemente en las cargas de punzonamiento que pueden soportar las losas.

Esto permite concluir que a mayor cantidad de fibras adicionadas, las cargas de punzonamiento que pueden soportar las losas aumentan.

5.- En los resultados obtenidos no se evidenció una relación directa entre el porcentaje de fibras añadido y el incremento en la carga de punzonamiento, por lo cual esta relación debe ajustarse estadísticamente para cada grupo de modelos analizados.

6.- En todas las curvas carga – desplazamiento generadas por medio de ANSYS, en el comportamiento post pico se muestra una caída súbita de la resistencia, lo cual corresponde a una falla frágil. Sin importar el volumen de fibras adicionado, este comportamiento se repitió sucesivamente y se debe a la caracterización que realiza ANSYS del hormigón como material frágil por medio del criterio de falla asignado al elemento SOLID65. Esta situación se constituye en una limitante para ANSYS pues una de las virtudes del hormigón con fibras es el de proporcionar ductilidad en el comportamiento post pico.

6.- Los factores que afectan la resistencia al punzonamiento en losas de hormigón armado reforzado con fibras de acero, son similares a los que afectan al punzonamiento de las losas de H^oA^o; como ser el espesor de la losa, la armadura de refuerzo por tracción, el tamaño del área cargada y las propiedades mecánicas de los materiales. Debe incluirse en este grupo de factores el volumen de fibras adicionado, la geometría de las fibras y sus propiedades mecánicas.

En lo que respecta a las propiedades mecánicas de las fibras de acero, se destaca el límite de fluencia de las mismas, siendo este es un parámetro de gran importancia al momento de emular el refuerzo de fibras de acero en ANSYS.

7.2. RECOMENDACIONES

Una de las principales limitantes que se encontró en la realización de este trabajo, que también repercute en la utilización de expresiones analíticas propuestas por reglamentos de diseño para determinar la carga de punzonamiento en losas de hormigón armado reforzado con fibras de acero; es la falta de bases de datos referentes a resistencias residuales a tracción del hormigón reforzado con fibras de acero. Esta situación obliga a la realización de ensayos experimentales. Por lo cual es recomendable tener presente esta limitante en caso de estudiar el punzonamiento en losas de hormigón armado reforzado con fibras de acero y generar modelos de elementos finitos de estas losas por medio de ANSYS.

7.3. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

- 1.- Se sugiere complementar este estudio numérico con una campaña experimental, en la cual se ensaye un número significativo de losas de hormigón armado reforzado con fibras de acero y pueda determinarse de forma tangible la relación entre el volumen de fibras adicionado y el incremento porcentual en las cargas de punzonamiento.
- 2.- Realizar la calibración y/o ajuste de las expresiones propuestas tanto por Huang V.Z. (1995) o por DAfStB (2012) para determinar esta resistencia residual a tracción del hormigón reforzado con fibras de acero.

ANEXO 1

COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN Y A TRACCIÓN DEL HORMIGÓN SIMPLE Y DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO MODELADO EN ANSYS

A1.1. DESCRIPCIÓN

Teniendo en cuenta que en esta tesis se emplea el programa computacional de elementos finitos ANSYS para estudiar el punzonamiento en losas de hormigón armado reforzado con fibras de acero, en este anexo se realiza un breve análisis del comportamiento a compresión y a tracción tanto del hormigón simple (H°S°) como del hormigón reforzado con fibras de acero (HRFA) modelados por medio de este programa; pretendiendo dar respuesta a las siguientes interrogantes:

- ¿Cómo es el comportamiento de los materiales modelados en ANSYS, una vez que alcanzaron sus resistencias máximas a compresión y a tracción uniaxial?
- ¿Teniendo en cuenta que no se introduce en ANSYS la rama en tracción de la curva tensión – deformación que caracteriza a un material dado, como genera este programa la mencionada curva?
- ¿Cómo representa ANSYS la ductilidad aportada por la adición de fibras de acero, en un elemento de hormigón sometido a tracción?

Para responder a estas interrogantes, se generaron por medio de ANSYS modelos de elementos finitos de los ensayos de compresión y de tracción directa a los que son sometidas las probetas de estos materiales de acuerdo a normas ASTM y RILEM respectivamente. Para este fin se consideraron probetas de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura, las cuales al ser doblemente simétricas sus respectivos modelos se generan a partir de una cuarta parte de sus geometrías.

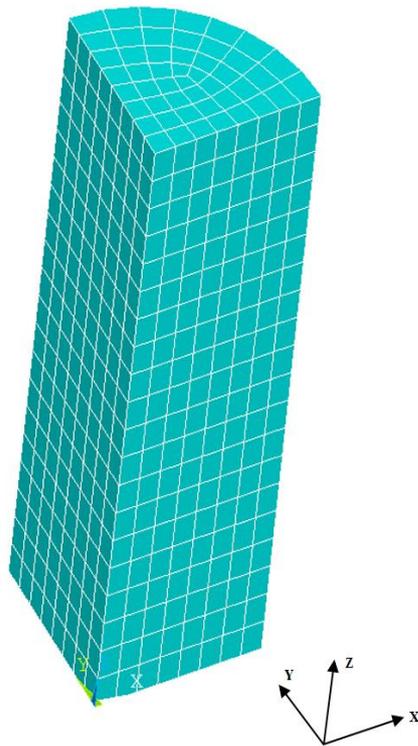


Figura A1.1: Malla de elementos finitos de las probetas generadas.

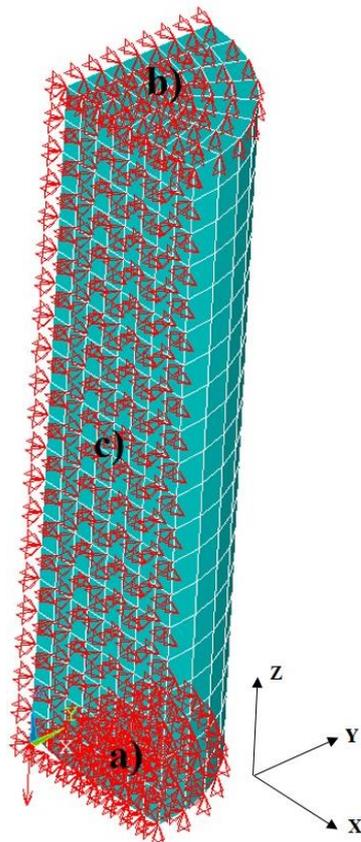


Figura A1.2: Condiciones de borde impuestas a los modelos a) Desplazamientos en $X=Y=Z=0$
b) Desplazamientos en $X=Y=0$, desplazamiento en $Z \neq 0$ c) Condiciones de simetría.

En las figuras A1.1 y A1.2, son mostradas la geometría y la imposición de condiciones de borde de los modelos. Para la caracterización mecánica de los materiales, se siguió lo establecido en el capítulo 3 y la aplicación de cargas fue realizada por medio de la imposición de desplazamientos en la dirección Z, positivos en el caso de tracción y negativos en el de compresión. En las tablas A1.1, A1.2 y A1.3 se resumen los datos más relevantes que fueron empleados para la generación de las probetas a compresión y a tracción respectivamente.

Tabla A1.1. Datos empleados para las probetas a compresión.

Modelos	Tipo de Hormigón	Vol. Fibras [%]	f'_c [MPa] (1)
Probeta 1	H°S°	0%	28.862
Probeta 2	HRFA	0.50%	29.798
Probeta 3	HRFA	0.75%	30.266

(1) Resistencia uniaxial a compresión

Tabla A1.2. Datos empleados para las probetas a tracción.

Modelos	Tipo de Hormigón	Vol. Fibras [%]	f_t [MPa] (2)
Probeta 4	H°S°	0%	1.50
Probeta 5	HRFA	0.50%	1.507
Probeta 6	HRFA	0.75%	1.516

(2) Resistencia uniaxial a tracción

Tabla A1.3. Datos correspondientes a las fibras de acero empleadas.

Tipo	Longitud [mm]	Diámetro [mm]	f_{yf} [MPa] (1)	E_{sf} [GPa] (2)
Con ganchos en los extremos	50	1.0	1110	210

(1) Límite de fluencia de las fibras de acero.

(2) Módulo elástico de las fibras de acero.

A1.2. RESULTADOS OBTENIDOS DE LOS ENSAYOS A COMPRESIÓN

En la figura A1.3 se muestran las ramas en compresión de las curvas tensión – deformación generadas en ANSYS, a partir de las cuales se puede estudiar el comportamiento postpico de los materiales analizados.

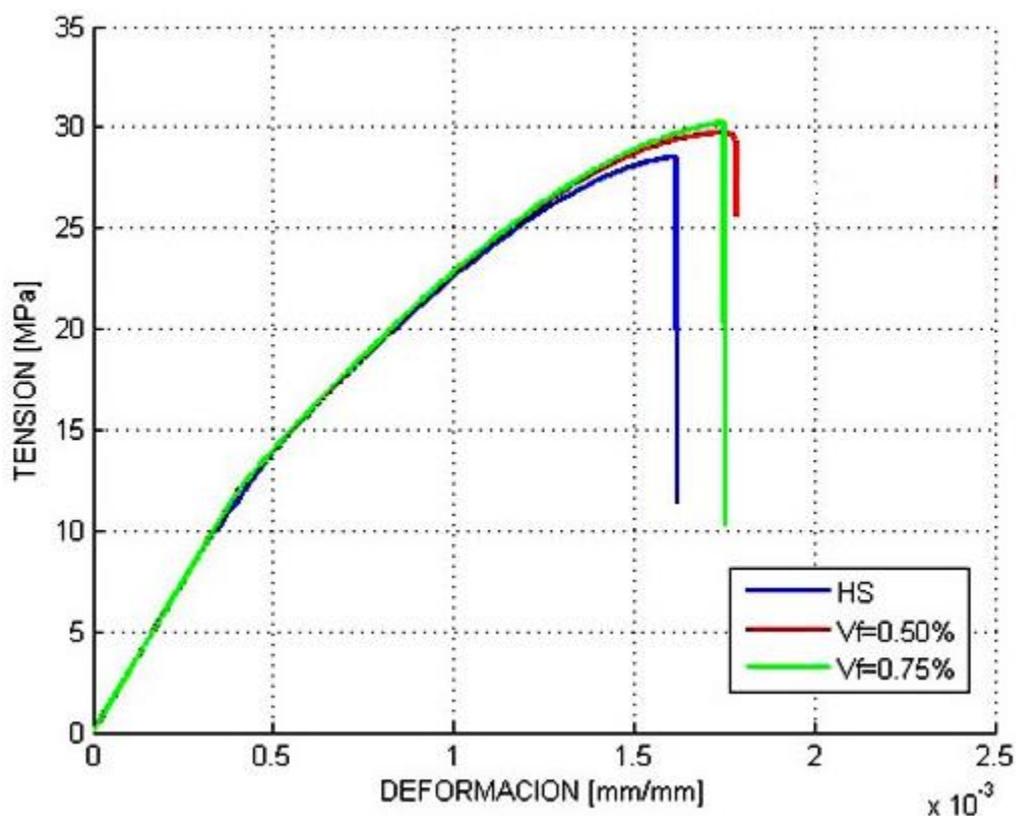


Figura A1.3: Ramas en compresión de las curvas tensión – deformación generadas en ANSYS, tanto para H°S° (curva azul), HRFA con 0.5% de fibras (curva roja) y HRFA con 0.75% de fibras (curva verde).

Las curvas mostradas en la figura A1.3 son muy similares a las mostradas en la figura 5.21 del capítulo 5 (para H°S°, Vf = 0.5% y Vf = 0.75% respectivamente), siendo las diferencias entre estas curvas las tensiones pico alcanzadas y el comportamiento postpico. En lo que respecta a las tensiones pico, las diferencias son indicadas en la tabla A1.4 pudiendo apreciarse que las tensiones obtenidas por medio de la figura 5.21 son ligeramente mayores a las obtenidas por medio de la figura A1.3.

Tabla A1.4. Tensiones pico obtenidas por medio de las figuras 5.21 y A1.3.

Tipo de Hormigón	Tensión Pico [MPa] Figura 5.21 (1)	Tensión Pico [MPa] Figura A1.3 (2)	Diferencia [MPa] (1-2)
Para H°S°	28.862	28.522	0.34
Para Vf = 0.5%	29.798	29.755	0.043
Para Vf = 0.75%	30.266	30.266	0.00

En la figura 5.21, el comportamiento postpico es representado por ramas descendentes que indican pérdida de resistencia del material, mientras que en la figura A1.3 se aprecia que una vez alcanzada la tensión pico se produce la falla del material por aplastamiento; la cual va acompañada de una caída abrupta de la tensión.

De esta forma podemos indicar que ANSYS representa la falla (o colapso) del hormigón simple (H°S°) o del HRFA sometido a compresión por medio de una caída de la tensión y no por ramas descendentes.

Es importante indicar, que durante la generación de estos modelos de probetas sometidas a compresión se ensayaron diversos escenarios de análisis entre los cuales se destacan:

- a) Prescindir de la rama en compresión de la curva tensión – deformación y permitir que el material sea modelado solamente por medio del criterio de falla indicado en la ecuación (3.8) del capítulo 3; a su vez pudiendo el material agrietarse en tracción y aplastarse en compresión.
- b) Prescindir de la rama en compresión de la curva tensión – deformación y permitir que el material sea modelado solamente por medio del criterio de falla indicado en la ecuación (3.8); a su vez pudiendo el material sólo agrietarse en tracción y no aplastarse en compresión.
- c) Emplear la rama en compresión de la curva tensión - deformación como así también el criterio de falla de la ecuación (3.8), suprimiendo la capacidad de aplastamiento del material en compresión; pero no la capacidad de agrietamiento por tracción.
- d) Emplear la rama en compresión de la curva tensión - deformación como así también el criterio de falla de la ecuación (3.8) y permitir que el material pueda aplastarse en compresión y agrietarse en tracción.

En lo que respecta a los escenarios “a” y “b” no se obtuvieron buenos resultados, pues los modelos no alcanzaron la convergencia esperada. Los correspondientes a los incisos “c” y “d” permiten obtener resultados prácticamente iguales, destacándose el escenario del inciso “c” por

la velocidad en la convergencia alcanzada, ya que el escenario del inciso “d” convergió un poco más lentamente.

Por todo lo indicado, se destaca la importancia de emplear conjuntamente una rama en compresión de la curva tensión – deformación y el criterio de falla indicado en la ecuación (3.8) cuando se modela H°S° y HRFA en ANSYS. La rama en compresión es un componente indispensable para que se produzca la convergencia en los modelos generados, además de representar el comportamiento del material que se emplea. Se constituye en un complemento del criterio de falla de la ecuación (3.8), ya que el mismo provoca que el material falle antes de haber alcanzado su tensión pico a compresión haciendo muy difícil la convergencia de los modelos.

A1.3. RESULTADOS OBTENIDOS DE LOS ENSAYOS A TRACCIÓN

En la figura A1.4 se muestra la rama en tracción de la curva tensión deformación que genera ANSYS a partir de la resistencia a tracción del material y del módulo elástico (E).

Puede apreciarse que una vez alcanzada la resistencia a tracción (f_t) se produce una caída de la resistencia del material, seguida por una rama descendente que se prolonga hasta que la resistencia por tracción adopte un valor igual a cero, para una deformación de seis veces la deformación pico por tracción (ϵ^{ck}).

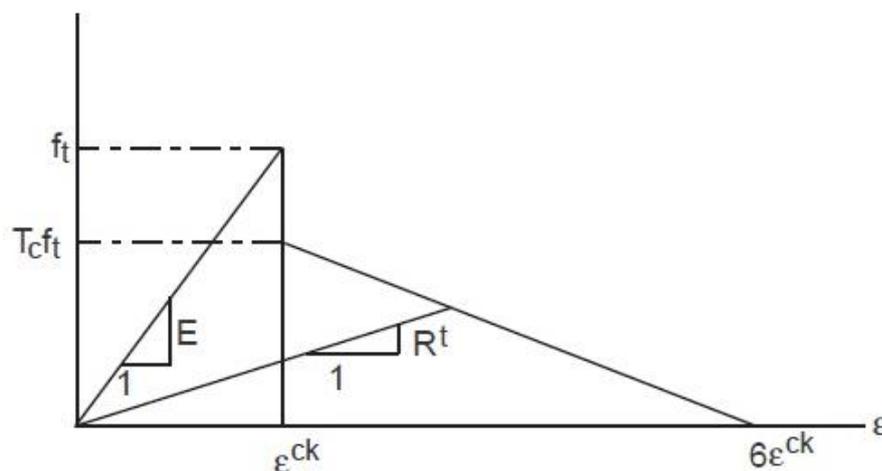


Figura A1.4: Ramas en tracción de las curvas tensión – deformación incorporada en ANSYS (Ansys Inc., 2009).

En la figura A1.5 se muestran las ramas en tracción de las curvas tensión – deformación obtenidas por medio de las probetas modeladas en ANSYS, apreciándose la similitud existente entre estas curvas y las de la figura A1.4 hasta que se produce la deformación pico por tracción.

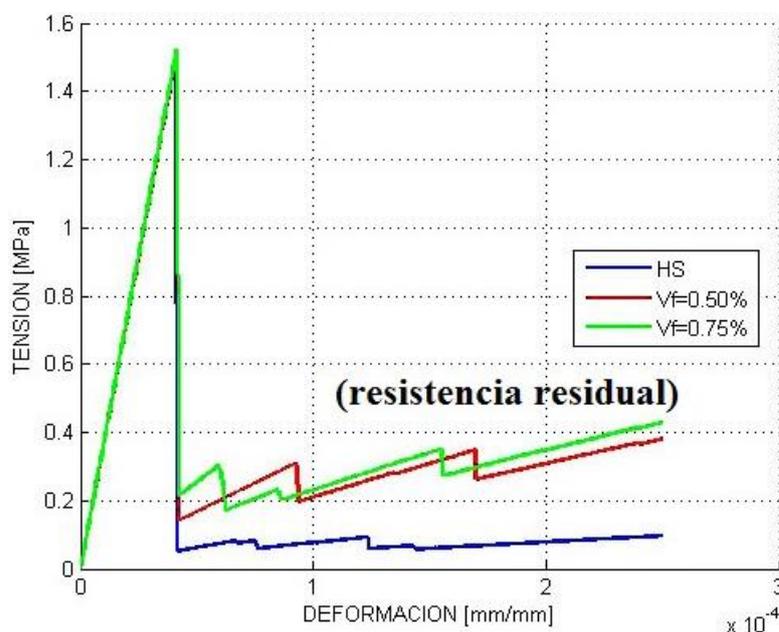


Figura A1.5: Ramas en tracción de las curvas tensión – deformación generadas en ANSYS, tanto para H°S° (curva azul), HRFA con 0.5% de fibras (curva roja) y HRFA con 0.75% de fibras (curva verde).

La curva en azul de la figura A1.5 es la correspondiente al H°S°, que se diferencia de las curvas en rojo ($V_f = 0.5\%$) y de la curva en verde ($V_f = 0.75\%$) por no presentar resistencia a tracción una vez que el material alcanza su resistencia pico, la cual que es acompañada por una caída abrupta de la resistencia hasta alcanzar un valor muy próximo a cero.

En lo que respecta a las probetas con adición de fibras de acero (curvas en rojo y en verde de la figura A1.5), de forma similar a lo que sucede con el hormigón simple se produce una caída abrupta de la resistencia una vez que se alcanza la tensión pico, pero se produce una especie de resistencia residual en el material que se manifiesta como curvas en forma de dientes de sierra en dirección ascendente. Esta resistencia residual es la forma que ANSYS emplea para representar la resistencia en tracción aportada por las fibras de acero adicionadas al hormigón.

ANEXO 2

FUERZA DE ARRANCAMIENTO DE LAS FIBRAS DE ACERO EN LA MATRIZ DE HORMIGÓN

A2.1. DESCRIPCIÓN

En este anexo se presentan las curvas de “arrancamiento” (tensión – deslizamiento), obtenidas para fibras de acero con ganchos en los extremos, embebidas en una matriz de hormigón con resistencia uniaxial a compresión de 30 MPa. Estas curvas fueron determinadas por medio de la simulación numérica del ensayo de arrancamiento, cuya implementación en un programa computacional de elementos finitos fue realizada por Isla (2014).

Las características de las fibras empleadas fueron las siguientes:

- Fibra Tipo 1: $L = 30 \text{ mm}$, $\phi = 0.62 \text{ mm}$ y $f_{yf} = 1119 \text{ MPa}$. (ver tabla 5.3).
- Fibra Tipo 2: $L = 50 \text{ mm}$, $\phi = 1 \text{ mm}$ y $f_{yf} = 1100 \text{ MPa}$. (ver tabla 5.4).

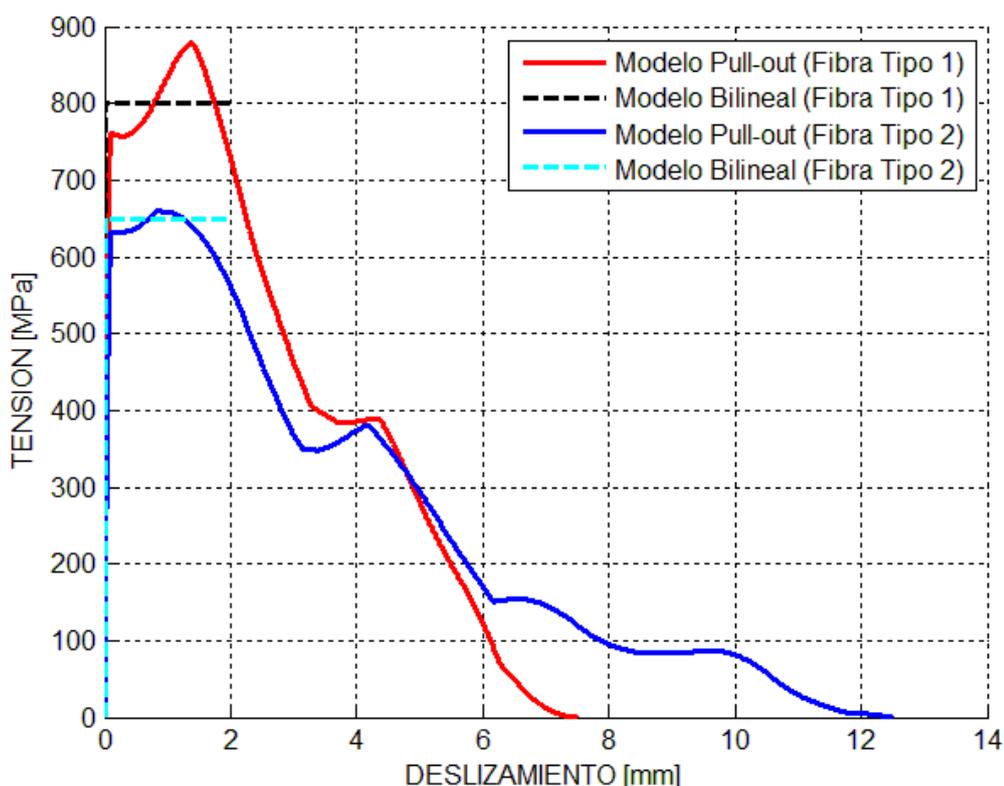


Figura A2.1: Curvas tensión – deslizamiento para las fibras de acero empleadas en esta tesis.

Para un deslizamiento extremo de 2 mm, se considera que el comportamiento mecánico tanto de las fibras de 30 mm de longitud (tipo 1), como las de 50 mm (tipo 2), puede asimilarse como bilineal (elastoplástico perfecto). Este comportamiento es representado por las curvas **----- Modelo Bilineal (Fibra Tipo 1)** y **----- Modelo Bilineal (Fibra Tipo 2)** para las fibras del tipo 1 y 2 respectivamente (ver figura A2.1).

De acuerdo con la figura A2.1, la fibra de 50 mm alcanza una tensión máxima (valor promedio) de 650 MPa, mientras que la fibra de 30 mm alcanza una tensión máxima (valor promedio) de 800 MPa. Las tensiones máximas que se mencionan, corresponden a los umbrales de deslizamiento (llamados en esta tesis f_{po}); que serán empleados como límites de fluencia en los modelos bilineales para la caracterización de las fibras de acero en los modelos indicados en los apartados 5.2.2 y 5.3.1.

El hecho de que las fibras de 30 mm de longitud y 0.62 mm de diámetro, alcancen una mayor tensión de arrancamiento que las de 50 mm de longitud y 1 mm de diámetro, se debe a que poseen menor diámetro y por ende menor área de sección transversal, que para una fuerza dada produce tensiones más elevadas.

ANEXO 3

GENERACIÓN DE CURVAS TENSIÓN – DEFORMACIÓN PARA EL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO

A3.1. DESCRIPCIÓN

En este anexo se describe el procedimiento numérico computacional de elementos finitos, seguido para la obtención de las ramas en compresión y en tracción de las curvas tensión – deformación presentadas en las figuras 5.4, 5.21 y 5.22 respectivamente.

Las ramas en compresión fueron obtenidas por medio de la modelación de los ensayos de compresión uniaxial que se aplican a las probetas de hormigón. De forma similar, las ramas en tracción son obtenidas modelando los ensayos de tracción uniaxial.

El fundamento teórico para la modelación constitutiva del hormigón simple se basa en un modelo elastoplástico con criterio de fluencia y potencial de Lubliner – Oller (Oller *et al*, 1988). Para modelar el hormigón reforzado con fibras de acero, se emplea la teoría de mezclas generalizada para materiales ortótropos, que permite tomar en cuenta la proporción, distribución, orientación y geometría de las fibras (Isla, 2014).

A3.2. MODELACIÓN DE LOS ENSAYOS DE COMPRESIÓN UNIAXIAL EN PROBETAS CILÍNDRICAS

En probetas cilíndricas de hormigón reforzado con fibras de acero, de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura, debido al método de llenado las fibras quedan orientadas preferentemente en planos horizontales, es decir perpendiculares al eje axial. Las fibras no modifican significativamente la carga pico a compresión, pero si mejoran la estabilidad del ensayo.

El porcentaje del volumen total de las fibras se distribuyó en un 44% en la dirección X, 44% en la dirección Y y 12% en la dirección Z; que concuerda con lo observado por Gettu *et al* (2005).

Este ensayo se modeló numéricamente en 3 dimensiones, para poder orientar las fibras adecuadamente en correspondencia con los ejes X, Y y Z. Se modeló la cuarta parte de la probeta, como se indica en la figura A3.1, mediante una malla formada por elementos hexaédricos de ocho nodos, con un total de 1488 elementos y 1952 nodos.

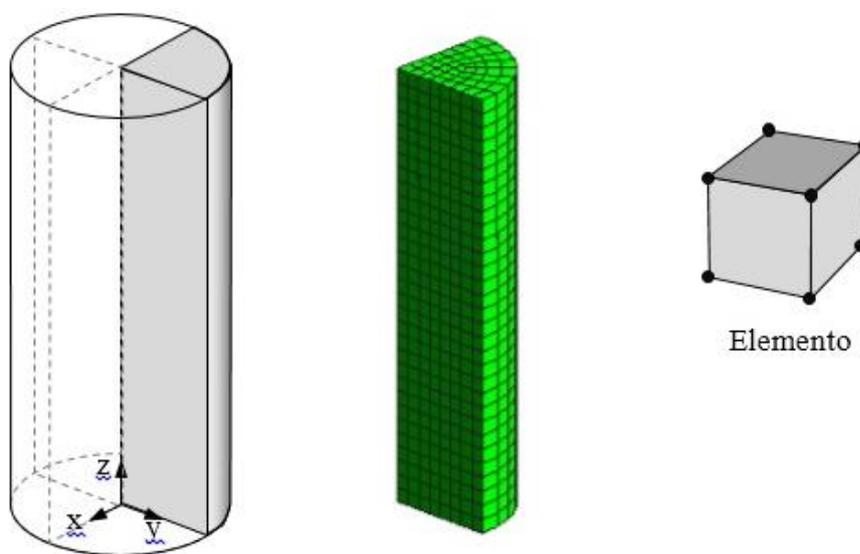


Figura A3.1: Malla para la modelación del ensayo de compresión uniaxial (Isla, 2014).

Las curvas tensión-deformación se obtuvieron a partir de las curvas carga-desplazamiento de la modelación numérica. La carga corresponde a la carga vertical aplicada y el desplazamiento, es el desplazamiento vertical relativo entre las dos caras de la probeta. La tensión se obtuvo como la carga aplicada dividida en el área transversal de la probeta ($\varnothing 100\text{mm}$) y la deformación se obtuvo como el desplazamiento vertical relativo entre las dos caras de la probeta dividido entre la altura (200 mm).

A3.3 MODELACIÓN DE LOS ENSAYOS DE TRACCIÓN UNIAXIAL EN PROBETAS CILÍNDRICAS

Este ensayo se modeló numéricamente en 3 dimensiones y las dimensiones de la probeta empleada fueron 150 mm de altura y 150 mm de diámetro (ver figura A3.2). Se modeló toda la probeta mediante una malla formada por elementos hexaédricos de ocho nodos, con un total de 1328 elementos y 1638 nodos.

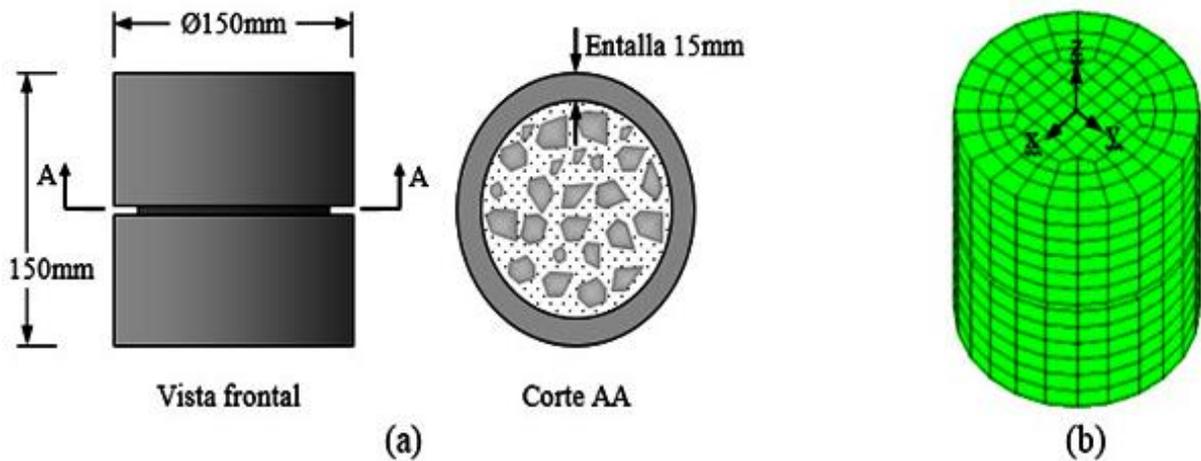


Figura A3.2: a) Geometría de espécimen b) malla de elementos finitos (Isla, 2014).

Las curvas tensión-deformación se obtuvieron a partir de las curvas carga-desplazamiento de la modelación numérica. La carga corresponde a la carga vertical aplicada y el desplazamiento, es el desplazamiento vertical relativo entre dos puntos situados cada lado de la entalla, separados por 77 mm (ver figura A3.2). La tensión se obtuvo como la carga aplicada dividida entre el área de la sección transversal de la probeta, en la sección correspondiente a la entalla ($\text{Ø}120\text{mm}$) y finalmente, la deformación se obtuvo como el desplazamiento vertical relativo entre los puntos mencionados dividido entre 77 mm .

ANEXO 4

APLICACIÓN DE LA EXPRESIÓN PROPUESTA POR EL COMITÉ ALEMÁN PARA EL HORMIGÓN ARMADO (DAfStB) PARA LA DETERMINACIÓN DE LA CARGA DE PUNZONAMIENTO EN LOSAS DE HORMIGÓN ARMADO REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO

A4.1. DESCRIPCIÓN

En este anexo se presenta una descripción de las expresiones propuestas por el comité alemán para el hormigón armado DAfStB (DAfStB, 2012) destinado a estructuras de hormigón armado y de hormigón armado reforzado con fibras de acero.

En la guía de diseño propuesta por DAfStB (DAfStB, 2012) se considera el estado límite de servicio y el estado límite último, debiendo ser definido el estado de diseño a emplear.

Se emplea la resistencia a tracción post agrietamiento del hormigón reforzado con fibras como una propiedad representativa de este material, que es la resistencia del hormigón reforzado con fibras en la zona de tracción, después de que la resistencia a tracción uniaxial es superada.

A4.2. FACTORES DE SEGURIDAD

Se consideran dos factores de seguridad γ_c y γ_f ; el primero aplicable al hormigón simple y el segundo al hormigón reforzado con fibras de acero. A ambos factores se asignará un valor igual a 1.

A4.3. REFUERZO CONVENCIONAL

El refuerzo por tracción provisto a las losas es considerado en un área de control en la unión losa – columna, igual a tres veces la altura útil d (ver figura A4.1). Esta distancia es medida a partir de cada lado de las caras de la columna y tiene forma cuadrada o rectangular.

Este refuerzo es considerado en las dos direcciones en las que es aplicado (X e Y) y la cuantía que lo representa es determinada por medio de la ecuación (A4.1).

$$\rho = \frac{A_s}{b_w \cdot d} \quad (\text{A4.1})$$

Donde:

ρ Cuantía que representa el refuerzo por tracción, debe ser determinada tanto para X como para Y.

A_s Área del refuerzo en el área de control de la unión losa columna.

d Altura útil de la losa.

b_w Ancho del área de control, que es la suma del lado de la columna (en X o Y) más tres veces el canto útil d medido a cada lado de las caras de la misma (Tazaly, 2011) (ver figura A4.1).

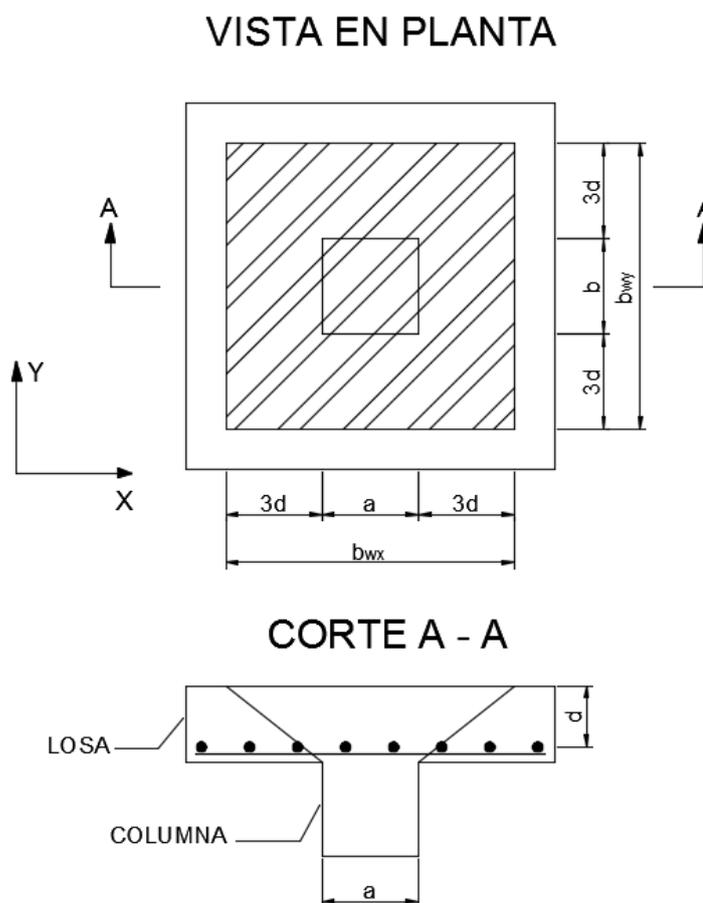


Figura A4.1. Determinación del ancho de control b_w .

A4.4. RESISTENCIA AL CORTE POR PUNZONAMIENTO EN LOSAS DE HORMIGÓN ARMADO REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO.

Para determinar la resistencia al punzonamiento en losas de hormigón armado reforzado con fibras de acero, se recomienda combinar las resistencias al cortante aportadas por el hormigón armado y por las fibras de acero, tal como se indica en la ecuación (A4.2).

$$V_{Rd,cf} = V_{Rd,c} + V_{Rd,f} \quad (A4.2)$$

Donde:

- $V_{Rd,cf}$ Resistencia total al punzonamiento.
 $V_{Rd,c}$ Resistencia aportada por el hormigón armado.
 $V_{Rd,f}$ Resistencia aportada por las fibras de acero.

A4.5. RESISTENCIA AL CORTE POR PUNZONAMIENTO APORTADO POR EL HORMIGÓN ARMADO

En la sección XII *Erläuterungen zur DafStB – Richtile Stahlfaserbeton* del comité alemán para el hormigón armado (*Deutschen Ausschuss für Stahlbeton DAfStB*) (DafStB, 2012) se presenta la ecuación (A4.3) la cual es empleada para determinar la resistencia al punzonamiento de losas de hormigón armado sin refuerzo adicional por cortante.

$$V_{Rd,c} = \left[C_{Rd,c} k (100 \rho_1 f_{ck})^{1/3} - 0.12 \sigma_{cp} \right] A_p \quad [N] \quad (A4.3)$$

Donde:

f_{ck} Resistencia característica a compresión del hormigón sin fibras.

$$C_{Rd,c} = \frac{0.21}{\gamma_c}$$

$$K = 1 + \sqrt{200/d} \leq 2.0$$

$\rho_1 = \sqrt{\rho_x \rho_y} \leq 0.02$ siendo ρ_x y ρ_y las cuantías de refuerzo por tracción en las direcciones X e Y respectivamente.

σ_{cp} Presfuerzo aplicado a la losa de hormigón armado.

$$A_p = ud$$

A_p Área crítica de punzonamiento.

u Perímetro crítico en el cual actúa el punzonamiento, es determinado a partir de una distancia igual a $1.5d$; siendo medida a partir de cada una de las caras de la columna y tiene su misma forma.

d Altura útil de la losa.

A4.6. RESISTENCIA AL CORTE POR PUNZONAMIENTO APORTADO POR LAS FIBRAS DE ACERO

El esfuerzo cortante absorbido por las fibras de acero es determinado por medio de la ecuación (A4.4).

$$V_{Rd,f} = v_{Rd,f} A_p \quad (A4.4)$$

Donde:

$$v_{Rd,f} = \frac{\alpha_f f_{ctR,u}^f}{\gamma_f}$$

α_f Factor que considera efectos de largo término, se asigna un valor de 1.

$f_{ctR,u}^f$ Valor de diseño de la resistencia a tracción post agrietamiento en el estado límite último.

La guía de diseño DAfStB (DAfStB, 2012) presenta la ecuación (A4.5) mediante la cual se determina el valor de la resistencia a tracción post agrietamiento del hormigón reforzado con fibras de acero.

$$f_{ctR,u}^f = \kappa_F^f \kappa_G^f f_{ct0,u}^f \quad (A4.5)$$

Donde:

$f_{ctR,u}^f$ Valor de diseño de la resistencia a tracción post agrietamiento en el estado límite último.

κ_F^f Factor que considera la orientación de la fibra, se le asigna un valor igual a 1 para losas.

- κ_G^f Factor que considera la influencia del tamaño del espécimen con la variación de $1.0 + (A_c \cdot 0.9)^{0.5} \leq 1.7$ (valor prácticamente igual a 1).
- A_c Área de la sección transversal de la viga prismática de hormigón (en metros cuadrados).
- $f_{ct0,u}^f$ Valor de la resistencia a tracción post agrietamiento del HRFA, que debe ser determinado experimentalmente por medio de ensayos de flexo tracción con aplicación de carga en cuatro puntos, realizados en al menos 6 vigas de 15 x 15 x 70 cm (Tazaly, 2011).

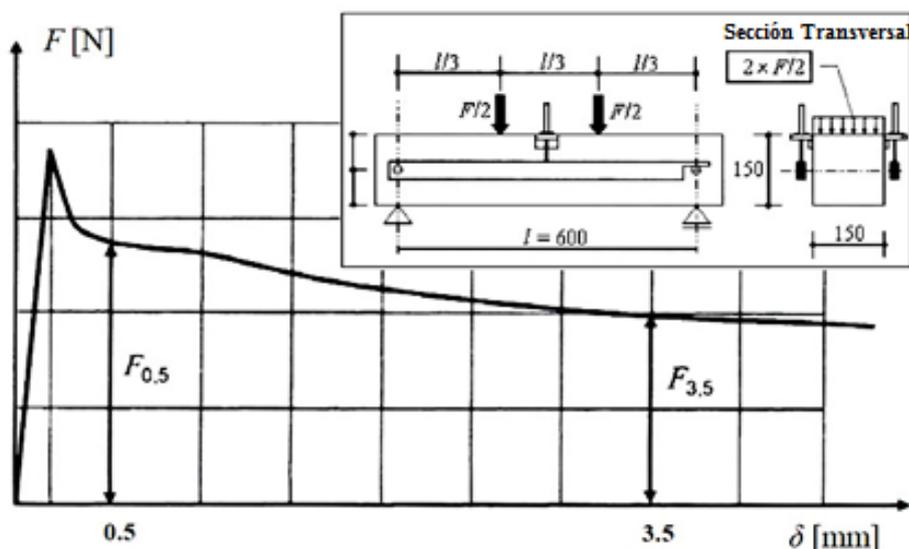


Figura A4.2. Ensayo con carga en cuatro puntos para determinar el valor de $f_{ct0,u}^f$ (DAfStB, 2012).

En la figura A4.2 se muestra el detalle del ensayo con carga en cuatro puntos para determinar el valor de $f_{ct0,u}^f$. En esta figura los valores de carga – deflexión 0.5 mm y 3.5 mm son los correspondientes a $F_{0.5}$ y $F_{3.5}$ respectivamente, que deben ser registrados para los estados límite de servicio ($L1$) y límite último ($L2$).

Los valores promedio de las resistencias a flexo tracción post agrietamiento, de las series de al menos seis vigas ensayadas ($n \geq 6$) se determinan por medio de (A4.6) para el estado límite de servicio y por (A4.7) para el estado límite último

$$f_{cflm,L1}^f = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{F_{0.5,i} \cdot l}{b_i \cdot h_i^2} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (\text{A4.6})$$

$$f_{cflm,L2}^f = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{F_{3.5,i} \cdot l}{b_i \cdot h_i^2} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (\text{A4.7})$$

Donde:

- l Valor del espaciamiento entre apoyos [mm].
- b Ancho de la viga [mm].
- h Altura de la viga [mm].
- i Índice que varía de 1 al número de vigas ensayadas.

El valor característico de la resistencia a flexión post agrietamiento de la serie de al menos seis vigas ensayadas, es determinado por medio de (A4.8) para los estados límite de servicio ($L1$) y límite último ($L2$).

$$f_{cflk,Li}^f = e^{(Lf_{cflm,Li}^f - k_s L_s)} \leq 0.51 \cdot f_{cflm,Li}^f \quad (\text{A4.8})$$

Donde:

$$Lf_{cflm,Li}^f = \frac{1}{n} \sum \ln(f_{cfl,Li,i}^f) \quad (\text{A4.9})$$

$$L_s = \sqrt{\frac{\sum (Lf_{cflm,Li}^f - \ln(f_{cfl,Li,i}^f))^2}{n-1}} \quad (\text{A4.10})$$

k_s Constante que depende del número de especímenes de la prueba (tabla A4.1).

Tabla A4.1. Factor fractil k_s (DAfStB, 2012).

Número de muestras n	k_s
6	2.336
9	2.141
12	2.048
15	1.991
20	1.932
25	1.895
100	1.76
∞	1.645

Habiendo determinado el valor de $f_{cflk,Li}^f$ es posible determinar $f_{ct0,u}^f$ por medio de (A4.11).

$$f_{ct0,u}^f = f_{cflk,L2}^f \cdot \beta_u \quad [\text{N/mm}^2] \quad (\text{A4.11})$$

Donde:

$$\beta_u = 0.37 \quad \text{Para el bloque de tensiones.}$$

Tazaly (2011) determinó que el valor de $f_{ct0,u}^f$ puede ser aproximado por medio de la expresión analítica para determinar el valor de f_{pc} , que es presentada en el trabajo de Choi *et al* (2007).

La expresión analítica para determinar el valor de f_{pc} , toma en cuenta la forma de las fibras de acero empleadas, las propiedades del HRFA (fuerza de arrancamiento y resistencia de adherencia *bond strength*) como así también la naturaleza de la matriz de hormigón.

La mencionada expresión es la siguiente:

$$f_{pc} = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 V_f \left(\frac{L}{D} \right) \tau \beta \quad (\text{A4.10})$$

Donde:

f_{pc} Resistencia a tracción post agrietamiento del HRFA.

λ_1 Índice fuerza de arrancamiento – longitud de la fibra, se asigna un valor de 0.25.

λ_2 Factor de eficiencia de la orientación de las fibras en el estado agrietado, se asigna un valor de 1.2.

λ_3 Factor de reducción de grupo, asociado con el número de fibras arrancadas por unidad de área, se asigna un valor de 1.0.

V_f Volumen de fibras de acero adicionadas.

L Longitud de las fibras de acero

D Diámetro de las fibras de acero.

τ Resistencia de adherencia (*bond strength*) interfacial promedio entre la matriz y las Fibras, se asigna un valor igual a $\tau = 2 \cdot f_t$

f_t Resistencia a tracción uniaxial de la matriz de hormigón, se asigna un valor

$$f_t = 0.292 \sqrt{f_c'}$$

f_c' Resistencia a compresión uniaxial de la matriz de hormigón.

β Factor que toma en cuenta la forma de las fibras de acero y el tipo de hormigón de la

matriz. Los valores a considerar para este factor son:

- Para fibras con ganchos u onduladas, $\beta = 1$
- Para fibras lisas redondeadas y matriz de hormigón normal, $\beta = 2/3$
- Para fibras con ganchos u onduladas con matriz de hormigón ligero, $\beta = 3/4$

Habiendo determinado el valor de f_{pc} , es posible determinar el esfuerzo cortante absorbido por las fibras de acero tal como indica la ecuación (A4.4).

A4.7. APLICACIÓN DE DAFSTB (2012)

Con la finalidad de evaluar el desempeño de DAfStB (2012) y su aplicabilidad en la presente tesis, será empleado para la determinación de las cargas de punzonamiento de las losas de calibración presentadas en los apartados 5.2.1 y 5.2.2 del capítulo 5. Los resultados obtenidos son presentados en las tablas A4.2 y A4.3

En estas tablas se puede apreciar el buen grado de aproximación de DAfStB (2012) a las cargas de punzonamiento experimentales. Es importante mencionar la existencia de valores analíticos que exceden a los experimentales, dándose esta situación para las losas LC14, LC15 y LC18 de la tabla A4.2; pero la diferencia existente entre estos valores no es significativa.

Tabla A4.2. Cargas últimas de punzonado calculadas para las losas LT1, LT2 y LT3.

Losa	Carga Experimental [Tn]	Carga Numérica [Tn]	Modelo Menétrey [Tn]	ACI-318 (2005) [Tn]	EC-2 (2005) [Tn]	DAfStB (2012) [Tn]
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	
LT1	25.000	27.58	16.4	20.65	24.13	25.81
LT2	35.000	35.91	23.8	21.59	28.84	31.15
LT3	47.000	45.00	39.2	24.15	41.65	39.96

(1) Columna (1) de la tabla 6.1 (Isla, 2008 y Villegas, 2009).

(2) Columna (2) de la tabla 6.1.

(3) Columna (4) de la tabla 6.1 (Villegas, 2009).

(4) Columna (5) de la tabla 6.1 (Villegas, 2009).

(5) Columna (6) de la tabla 6.2 (Villegas, 2009).

Tabla A4.3. Resumen de las cargas de punzonamiento obtenidas para las losas LC10, LC14, LC15 y LC18

Losa	Carga Experim.	Modalidad “a”	Modalidad “b”	Modalidad “c”	Modalidad “d”	DAfStB (2012)
	Pexp [Tn]	Ppun [Tn]	Ppun [Tn]	Ppun [Tn]	Ppun [Tn]	Ppun [Tn]
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	
LC10	13.75	16.17	15.84	13.46	15.79	12.27
LC14	21.02	20.75	20.54	20.98	20.94	21.47
LC15	39.25	41.13	40.22	39.61	39.70	40.18
LC18	29.76	32.63	32.42	30.07	30.50	32.36

- (1) Columna (1) de la tabla 6.4 (Higashiyama *et al*, 2011 y Cheng y Parra, 2010).
 (2) Columna (2) de la tabla 6.4.
 (3) Columna (3) de la tabla 6.4.
 (4) Columna (4) de la tabla 6.4.
 (5) Columna (5) de la tabla 6.4.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACI-318, *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*, American Concrete Institute, USA, 2005.
- ACI 318-11, *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-11) and Commentary*, American Concrete Institute, USA, 2011.
- ACI 544.4R-88, *Design considerations for steel Fiber Reinforced Concrete*, American Concrete Institute, USA, Reapproved 1999.
- Ansys Inc, *Theory Reference for the Mechanical APDL and Mechanical Applications*, SAS, Canonsburg, USA, 2009.
- Bangash, M.Y.H., *Manual of Numerical Methods in Concrete*, Thomas Telford, UK, 2001.
- CEB-FIP, *Fib Model Code for Concrete Structures 2010*, Ernst and Sohn, Switzerland, 2013.
- Chakrabarty, J., *Theory of Plasticity*, BH-Elsevier, UK, 2006.
- Chen, W.F., *Plasticity in Reinforced Concrete*, J.Ross Publishing, USA, 2007.
- Cheng, M.Y y G.J. Parra-Montesinos, *Evaluation of Steel fiber Reinforcement for Punching Shear Resistance in Slab – Column Connections*, Aci Structural Journal, No. 107-S11, pp.101-109, 2010.
- Choi, K.K., Reda Taha, M.M., Park, H.G. y Maji, A.K., *Punching Shear Strength of Interior Concrete Slab-Column Connections Reinforced with Steel Fibers*, Cement and Concrete Composites, No.29, pp.409-420, 2007.
- Civildigital (2015), *Fiber – Reinforced – Concrete*, www.civildigital.com/fiber-reinforced-concrete/, Ingreso: 25/06/2015.
- DAfStB, *DafStB Guideline Steel Fibre Reinforced Concrete*, Beuth Verlag Gmbh, Berlín, 2012.
- Demagistri, A., *Evaluación Numérica de la Ductilidad de Pilas de Puentes con HRF*, Proyecto final de la carrera de ingeniería civil, Universidad Nacional de Tucumán, Tucumán, 2013.

- Desayi, P., *Equation for Stress – Strain Curve of Concrete*, Aci Journal, Proc. 61(3), pp. 345-350, 1964.
- EC-2, *Eurocode 2: Design of Concrete Structures – Concrete Bridges – Design and Detailing Rules*, European Committee for Standardization, Belgium, 2005.
- Gawas, S., *Study of Two Way RC Slabs Using Ansys with and without Opening*, International Journal of Scientific Engineering and Technology, Vol.3, pp.1108-1110, 2014.
- Gettu, R., D. Gardner, H. Saldivar y B. Barragán, *Study of the distribution and orientation of fibers in SFRC specimens*, Materials and Structures, Vol. 38, pp.31 – 37, 2005.
- Granju, J.L y S.U. Balauch, *Corrosion of Steel fibre Reinforced Concrete From the Cracks*, Cement and Concrete Research, Vol.35,pp.573-577, 2004.
- Higashiyama, H., Ota, A. y Mizukashi, M., *Design Equations for Punching Shear Capacity of SFRC Slabs*, International Journal of Concrete Structures and Materials, Vol.5, pp.35-42, 2011.
- Huang V.Z., *Grenzbeanspruchung Gebetteter Stahlfaserbetonplatten*, Ph.D. Dissertation, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, TU Braunschweig, 1995.
- Isla, A.F., *Estudio Analítico y Experimental del Punzonado*, proyecto final de la carrera de ingeniería civil, Universidad Nacional de Tucumán, Tucumán, 2008.
- Isla, F.A., *Modelo para Hormigón Reforzado con Fibras*, Tesis doctoral, Universidad Nacional de Tucumán, Argentina, 2014.
- Kachlakev, D., Miller, D., Yim, S., Chansawat, K. y Tanarat, P., *Finite Element Modeling of Reinforced Concrete Structures Strengthened with FRP Laminates Final Report*, Oregon Department of Transportation, Oregon, 2001.
- Köning, G. y L. Kutzing, *Modeling the Increase of Ductility of HPC Under Compressive Forced, a Fracture Mechanical Approach*, Proceedings of the III International RILEM Workshop “High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites (HPFRCC 3)”, Mainz, pp.251-260, 1999.

- López Lancheros, P.A., *Simulación Numérica de Vigas en Concreto Reforzado con Barras Longitudinales, Transversales y Fibras Cortas de Acero Mediante el Método de los Elementos Finitos*, Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2012.
- Luccioni, B., Ruano, G., Isla, F., Zerbino, R. y Giaccio, G., *A Simple Approach to Model SFRC*, *Construction and Building Materials*, Vol. 37, pp. 111 – 124, 2012.
- Maccaferri (2015), *Fibras Como Elemento Estructural Para el Refuerzo del Hormigón*, www.aprocins.org.py/doc/pavimento/manual_fibras.pdf, Ingreso: 25/06/2015.
- MacGregor, J.G. and J.K. Whight, *Reinforced Concrete Mechanics and Design*, Pearson, USA, 2012.
- Majeed, H.Q., *Nonlinear Finite Element Analysis of Steel Fiber Reinforced Concrete Deep Beams with and without Opening*, *Journal of Engineering*, Vol.18, No.12 pp.1421-1438, December 2012.
- Mase, G. *Continuum Mechanics*, Schaum Outline Series, USA, 1970.
- Möller, O., *Hormigón Armado*, UNR editora, Argentina, 2004.
- Nguyen, L., Rounák, M., Tran-Quoc, T. y Nguyen-Kim, K., *Punching Shear Resistance of Steel Fiber Reinforced Concrete Flat Slabs*, *Procedia Engineering*, No.14, pp. 1830 – 1837, 2011.
- Núñez López, A. M., *Análisis Numérico–Experimental de Elementos de Hormigón Reforzado con Fibras de Acero*, Tesis doctoral, Univ. Politécnica de Valencia, España, 2011.
- Park, R. y W. Gamble, *Reinforced Concrete Slabs*, John Wiley and Sons, USA, 2000.
- Pozolo, A.M., *Transfer and Development of Steel Strands in Full Scale Prestressed Self-Consolidating Concrete Bridge Girders*, Master's Degree Thesis, University of Illinois at Urbana – Champaign, 2010.
- Ragab, K.S., *Study Punching Shear of Steel Fiber Reinforced Self Compacting Concrete Slabs by Nonlinear Analysis*, *International Journal of Civil, Architectural, Structural and Construction Engineering*, Vol.7, pp.288-299, 2013.
- Ribeiro, T.S.A. y P. Serna, *Numerical Analysis of Steel fiber Reinforced Concrete Shells*, *Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS)*, pp.1731-1742, 2009.

- Ribeiro, T.S.A., Serna, P., Ribeiro, G.O. y López, A.M.N., *Numerical Modelling of Steel Fibre Reinforced Concrete Structures – A Comparative Study*, Seventh Intl. RILEM symp. on Fibre Reinforced Concrete: Design and Applications, pp.345-355, 2009.
- Ruano, G. y B. Luccioni, *Comportamiento de Elementos Estructurales de Hormigón Reforzado con Fibras*, Asociación Argentina de Mecánica Computacional, Vol. XXVIII, pp.1941-1960, 2009.
- Shah, S.P., *Fibre Reinforced Concrete*, Concrete Construction, Vol.26, pp.261-266, 1981.
- Soroushian, P., C.D. Lee, *Constitutive modeling of steel fiber reinforced concrete under direct tension and compression*, Fiber Reinforced Cement and Concretes: Recent Developments, 363 – 377, 1989.
- Tazaly, Z., *Punching Shear Capacity of Fibre Reinforced Concrete Slabs with Conventional Reinforcement*, Master's Degree Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, 2011.
- Tavarez, F.A., *Simulation of Behavior of Composite Grid Reinforced Concrete Beams Using Explicit Finite Element Methods*, Master's Degree Thesis, University of Wisconsin, Madison, 2001.
- Teixeira, M.D.E., Barros, J.A.O, Cunha, V.M.C.F., Moraes-Neto, B.N. y Ventura-Gouveia, A., *Numerical Simulation of the Punching Shear Behavior of Self-Compacting Fibre Reinforced Flat Slabs*, Construction and Building Materials, No.74, pp.25-36, 2014.
- Vandewalle, C.L., *Design of Steel Fibre Reinforced Concrete Using the $\sigma-w$ Method – Principles and Applications*, Materials and Structures, Vol.35, pp.262-278, 2002.
- Vandewalle, C.L., *Test and Design Methods for Steel Fibre Reinforced Concrete, $\sigma-\varepsilon$ Design Method*, Materials and Structures, Vol.36, pp.560-567, 2003.
- Villegas, O.E., *Análisis Experimental del Punzonado en Losas de Hormigón Armado*, Proyecto final de la carrera de ingeniería civil, Universidad Nacional de Tucumán, 2009.
- Vondran, G.L., *Applications of Steel Fibre Reinforced Concrete*, Concrete International, Vol.13, No. 11, pp.44-49, 1991.

Zhang, Q., *Finite Element Application to Slab – Column Connections Reinforced with Glass Fibre – Reinforced Polymers*, Master's Degree Thesis, Memorial University of Newfoundland, Terranova, 2004.