



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

ESTUDIO NUMÉRICO DE LLAVES DE CORTE PARA PLACAS BASE DE
COLUMNAS SOMETIDAS A SOLICITACIONES CÍCLICAS

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

ISAÍAS ENRIQUE ARANCIBIA MONTECINOS

PROFESOR GUÍA:
RICARDO ANTONIO HERRERA MARDONES

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
JUAN FELIPE BELTRÁN MORALES
CARLOS MAXIMILIANO AGUIRRE AHUMADA

SANTIAGO DE CHILE
2016

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
POR: ISAÍAS ARANCIBIA MONTECINOS
FECHA: 05/12/2016
PROF. GUÍA: RICARDO HERRERA MARDONES

ESTUDIO NUMÉRICO DE LLAVES DE CORTE PARA PLACAS BASE DE COLUMNAS SOMETIDAS A SOLICITACIONES CÍCLICAS

Una llave de corte es un elemento estructural de acero que permite transmitir los esfuerzos de cizalle desde una columna hacia la fundación, de manera tal que se evite la transmisión de éstos por los pernos de anclaje. Usualmente, consiste en una pieza de acero en cruz o doble T soldada a la columna, y embebida en el bloque de hormigón. Si bien en Chile estos elementos adquieren gran importancia en las estructuras industriales, debido a las solicitaciones sísmicas a las que las mismas se ven sometidas, existe poca información relativa al comportamiento y diseño de las llaves de corte.

El objetivo principal del trabajo de investigación consiste en el análisis del comportamiento de las llaves de corte, cuando éstas se ven sometidas a solicitaciones cíclicas, mediante la modelación por elementos finitos. Para esto, primeramente se realiza una revisión bibliográfica de la literatura respectiva. De especial interés resultan las investigaciones previas sobre el tema, tanto experimentales como de estudios numéricos.

Luego, se modifican los modelos de elementos finitos existentes, correspondientes a tres configuraciones de llaves de corte en cruz y seis en doble T, donde tres se cargan en el eje débil y las tres restantes en el eje fuerte. Los cambios realizados a los nueve modelos estudiados buscan incluir el agrietamiento y aplastamiento de los elementos del bloque de hormigón, y estudiar el comportamiento de los sistemas bajo estas condiciones en un historial cíclico de desplazamientos. La calibración de los modelos se realiza en base a la respuesta global reportada en el caso monotónico, tanto experimental como numéricamente.

Posteriormente, se analiza el comportamiento global de los sistemas mediante las curvas de fuerza deformación y la flexión en la unión de las llaves a la placa base. Localmente, se estudia el estado de tensiones y deformaciones de cada componente en particular.

A partir de los resultados obtenidos de la modelación se desprende que existe una degradación de la rigidez producto de la apertura y cierre gradual de grietas en el bloque de hormigón, lo que conduce a un angostamiento de los aros que componen el ciclo de histéresis. No obstante, el daño por agrietamiento y aplastamiento en el hormigón se desarrolla en sectores acotados del bloque, con lo que una falla frágil en éste se considera poco probable.

En cuanto al mecanismo de falla, aunque la flexión adquiere una mayor importancia durante el análisis cíclico, se confirma que la falla asociada a los sistemas corresponde a una falla dúctil de las llaves de acero, debida a la plastificación por esfuerzos de corte.

*A quien me acompañó desde mis primeros pasos,
pero la vida nos separó antes alcanzar este momento.*

A la memoria de María Josefina Bravo Vidal.

Agradecimientos

Agradezco, en primer lugar, al Profesor Ricardo Herrera, por darme la oportunidad de trabajar con él en este tema de investigación. A los profesores Juan Felipe Beltrán y Carlos Aguirre, por su gran disposición. A los ingenieros Oriel Núñez y Florencia Ramacotti por facilitarme los modelos con que este trabajo es realizado. También, agradezco a los ingenieros Diego Hurtado y Emilio Peña, por las recomendaciones que me permitieron desarrollar esta investigación.

A mis padres y hermanos, por el apoyo y motivación constante a lo largo la etapa que ahora culmina. A mis primos, Ariel y Carlos, por las infinitas veces en que me recibieron.

A Camila, por el amor y apoyo incondicional que me regala día a día. Agradezco además, tu inhumana capacidad para soportarme, durante todo este tiempo.

Al Profesor Iván *El Cheja* Bejarano, por darme la oportunidad de trabajar como profesor auxiliar en su curso, y disfrutar de la que sin duda fue una de las mejores experiencias en la Universidad. Agradezco en especial, al Jote, Seba Olea, Magda, Michel, Pancho, Diego Cruz, Otu, Max, Cubano, Chico, Celis, Nicole y Danko , por los infinitos asados, buena onda y tallas en el cerro, y por formar parte del mejor Team Docente.

A CiBilis, el grupo de los mejores recuerdos de la carrera. Agradezco a Orrego, Fabo, Jaque, Caleb, el Ojo Fabbione, Tuto, Ramiro, Jones, Kitty, Zorrits, Iban, Javier, Mengual y al Poto, por todas las historias de carretes, viajes a la playa, salidas al estadio, partidos, Sedes, Tenazos y Kiwis.

A mis amigas, las Tres Mosquetebrias, Cony, Feña y Sol, por las copuchas y carcajadas eternas. En especial, agradezco a Marisol, junto a quien recorrí toda mi vida universitaria, desde Intro a la Ingeniería hasta nuestra titulación.

A todos los memoristas de la Pecera , por lejos el mejor espacio de trabajo que he conocido. En especial, agradezco a la Tía Isabel por el cariño, los retos y la compañía brindada a lo largo de esta memoria.

A Consuelo y Catalina, por la buena onda y el apoyo constante que me brindaron en la parte final de mi vida universitaria.

A todos, muchas gracias, sin ustedes esto no hubiese sido posible.

Tabla de Contenido

1	Introducción	1
1.1	Motivación	1
1.2	Objetivos	2
1.2.1	General	2
1.2.2	Específicos	2
1.3	Alcances de cada capítulo	2
2	Antecedentes	4
2.1	Revisión Bibliográfica	5
2.1.1	Normas Nacionales	5
	NCh 2369 Of.2003	5
	Manual de Diseño para Estructuras de Acero	6
2.1.2	Normas y recomendaciones de diseño extranjeras	6
	Steel Design Guide N°1 “ <i>Column Base Plate</i> ”	6
2.1.3	Estudios Experimentales	8
	Estudios experimentales Universidad Técnica Federico Santa María	8
	Shear Transfer in Exposed Column Base Plates	9
2.1.4	Estudios Numéricos	12
	Estudio Numérico de Llaves de Corte de Acero en Cruz para Placas Base de Columnas	12
	Análisis Numérico de Llaves de Corte con Geometría Doble T	13
2.2	Marco Teórico	14
2.2.1	Modelo de elementos finitos	14
2.2.2	Modelación de modos de falla en el hormigón	18
	Agrietamiento	18
	Aplastamiento	19
2.2.3	Estados límite en acero	20
	Flexión	20
	Corte	21
3	Calibración de Modelos de Elementos Finitos	22
3.1	Geometría de los modelos analizados	23
3.2	Materiales	24
3.2.1	Grout de nivelación	24
3.2.2	Acero	25
3.3	Factor de fricción	25
3.4	Modelamiento del bloque de hormigón	26
3.4.1	Supuestos y restricciones SOLID65	26

3.4.2	Propiedades mecánicas	26
3.4.3	Modelamiento de barras de refuerzo a tracción	28
3.4.4	Mallado	29
3.4.5	Calibración de factores de transferencia de corte en grietas	30
3.4.6	Modificación de propiedades del hormigón	31
3.5	Curvas calibradas	31
4	Análisis y comparación de resultados	35
4.1	Historia de desplazamientos	36
4.2	Llaves de corte en cruz	37
4.2.1	Respuesta global del sistema estructural	38
	Corte	39
	Flexión	41
4.2.2	Comportamiento llave de corte	43
	Tensiones de corte	43
	Tensiones normales	46
	Tensiones y deformaciones equivalentes de Von Mises	48
	Deformaciones	50
4.2.3	Comportamiento bloque de hormigón	51
	Tensiones principales	51
	Tensiones normales en el apoyo	55
	Deformaciones	56
4.2.4	Comportamiento grout de nivelación	57
	Tensiones principales	57
	Deformaciones	61
4.3	Llaves de corte en Doble T, cargadas en el eje débil	63
4.3.1	Respuesta global del sistema estructural	63
	Corte	63
	Flexión	66
4.3.2	Comportamiento llave de corte	68
	Tensiones de corte	68
	Tensiones normales	70
	Tensiones y deformaciones equivalentes de Von Mises	72
	Deformaciones	73
4.3.3	Comportamiento bloque de hormigón	74
	Tensiones principales	74
	Tensiones normales en el apoyo	78
	Deformaciones	79
4.3.4	Comportamiento grout de nivelación	80
	Tensiones principales	80
	Deformaciones	84
4.4	Llaves de corte Doble T cargadas en el eje fuerte	85
4.4.1	Respuesta global del sistema estructural	85
	Corte	85
	Flexión	86
4.4.2	Comportamiento llave de corte	87
	Tensiones de corte	87

Tensiones normales	88
Tensiones y deformaciones equivalentes de Von Mises	89
Deformaciones	90
4.4.3 Comportamiento bloque de hormigón	91
Tensiones principales	91
Tensiones normales en el apoyo	93
Deformaciones	93
4.4.4 Comportamiento grout de nivelación	94
Tensiones principales	94
Deformaciones	96
4.5 Degradación de la respuesta	97
4.5.1 Resistencia	97
4.5.2 Rigidez	100
4.6 Energía histerética	103
5 Conclusiones y comentarios	106
5.1 Conclusiones	107
5.1.1 Calibración y desempeño de modelos de elementos finitos	107
5.1.2 Comportamiento global de los sistemas y modos de falla	107
5.1.3 Llave de corte	108
5.1.4 Bloque de Hormigón	109
5.1.5 Grout de nivelación	109
5.1.6 Energía disipada	110
5.2 Limitaciones y recomendaciones para futuras líneas de investigación	110
Bibliografía	113

Índice de tablas

2.1	Disposiciones respecto a llaves de corte	5
2.2	Procedimiento de diseño	7
2.3	Procedimiento de diseño propuesto	8
2.4	Comprobación área al corte	9
2.5	Módulos plásticos de perfiles estudiados	20
3.1	Geometría llaves de corte modeladas	23
3.2	Propiedades grout de nivelación	24
3.3	Propiedades acero A36	25
3.4	Propiedades hormigón	27
3.5	Propiedades barras de refuerzo	28
3.6	Número de nodos y elementos	29
3.7	Factores de transferencia de corte	30
3.8	Factor de amplificación de resistencia a la compresión	31
4.1	Carga máxima por ciclo, llaves en cruz	97
4.2	Carga máxima por ciclo, llaves en doble T cargadas en el eje débil	98
4.3	Carga máxima por ciclo, llaves en doble T cargadas en el eje fuerte	98
4.4	Degradación de la rigidez por ciclo, llaves en cruz	100
4.5	Degradación de la rigidez por ciclo, llaves en doble T cargadas en el eje débil	101
4.6	Degradación de la rigidez por ciclo, llaves en doble T cargadas en el eje fuerte	101
4.7	Energía histerética disipada por ciclo, llaves en cruz	103
4.8	Energía histerética disipada por ciclo, llaves en doble T cargadas en el eje débil	104
4.9	Energía histerética disipada por ciclo, llaves en doble T cargadas en el eje fuerte	105

Índice de figuras

2.1	Modelo llave de corte (AISC, 2003)	7
2.2	asdasd	9
2.3	Disposiciones experimentales,	10
2.4	Curvas $F - \Delta$, transferencia de corte por pernos de anclaje, test #4	11
2.5	Curvas $F - \Delta$, transferencia de corte por pernos de anclaje, test #5	12
2.6	SOLID185	14
2.7	SOLID285	15
2.8	SOLID65	16
2.9	CONTA174	16
2.10	CONTA173	17
2.11	TARGE170	17
2.12	TARGE170	19
3.1	Componentes modelados en <i>ANSYS Workbench</i>	23
3.2	Ley constitutiva del grout de nivelación	24
3.3	Ley constitutiva del acero	25
3.4	Ley constitutiva del hormigón	27
3.5	Distribución del refuerzo en el bloque de hormigón	28
3.6	Modificación al refinamiento en la zona casilla	29
3.7	Calibración factor de transferencia de corte en grietas abiertas β_t	30
3.8	Curvas calibradas $F - \Delta$, llaves con geometría en cruz	32
3.9	Curvas calibradas $F - \Delta$, llaves con geometría en doble T, cargadas según el eje débil	33
3.10	Curvas calibradas $F - \Delta$, llaves con geometría en doble T, cargadas según el eje fuerte	34
4.1	Protocolo de carga empleado en la modelación	37
4.2	Fuerza y desplazamiento, caso experimental y caso numérico	38
4.3	Carga vs desplazamiento, Llave N°1 en cruz	39
4.4	Carga vs desplazamiento, Llave N°4 en cruz	39
4.5	Carga vs desplazamiento, Llave N°6 en cruz	40
4.6	Momento vs desplazamiento, Llave N°1 en cruz	41
4.7	Momento vs desplazamiento, Llave N°4 en cruz	42
4.8	Momento vs desplazamiento, Llave N°6 en cruz	42
4.9	Evolución de las tensiones de corte τ_{YZ} , llave N°1 en cruz	44
4.10	Evolución de las tensiones de corte τ_{YZ} , llave N°4 en cruz	45
4.11	Evolución de las tensiones de corte τ_{YZ} , llave N°6 en cruz	45
4.12	Tensión Normal eje Z , llave N°1 en cruz	46

4.13	Tensión Normal eje Z , llave N°4 en cruz	47
4.14	Tensión Normal eje Z , llave N°6 en cruz	47
4.15	Tensiones equivalentes de Von Mises, llaves en cruz	48
4.16	Deformada llaves de corte en cruz	50
4.17	Evolución de las tensiones principales mínimas, bloque, llave N°1 en cruz . .	52
4.18	Evolución de las tensiones principales mínimas, bloque, llave N°4 en cruz . .	52
4.19	Evolución de las tensiones principales mínimas, bloque, llave N°6 en cruz . .	53
4.20	Evolución de las tensiones principales máximas, llaves en cruz	54
4.21	Tensiones normales en el apoyo, según dirección Y , llaves en cruz	55
4.22	Deformaciones en el bloque de hormigón, según dirección Y , llaves en cruz .	56
4.23	Evolución de las tensiones principales mínimas, grout, llave N°1 en cruz . . .	57
4.24	Evolución de las tensiones principales mínimas, grout, llave N°4 en cruz . . .	58
4.25	Evolución de las tensiones principales mínimas, grout, llave N°6 en cruz . . .	58
4.26	Evolución de las tensiones principales máximas, grout, llave N°1 en cruz . . .	59
4.27	Evolución de las tensiones principales máximas, grout, llave N°4 en cruz . . .	60
4.28	Evolución de las tensiones principales máximas, grout, llave N°6 en cruz . . .	60
4.29	Deformaciones en grout de nivelación, según dirección Y , llaves en cruz	62
4.30	Carga vs desplazamiento, Llave N°1 en doble T cargada en el eje débil	63
4.31	Carga vs desplazamiento, Llave N°7 en doble T cargada en el eje débil	64
4.32	Carga vs desplazamiento, Llave N°8 en doble T cargada en el eje débil	64
4.33	Momento vs desplazamiento, Llave N°1 en doble T cargada en el eje débil . .	66
4.34	Momento vs desplazamiento, Llave N°7 en doble T cargada en el eje débil . .	66
4.35	Momento vs desplazamiento, Llave N°8 en doble T cargada en el eje débil . .	67
4.36	Evolución de las tensiones de corte τ_{XZ} , llave N°1 en doble T cargada en el eje débil	68
4.37	Evolución de las tensiones de corte τ_{XZ} , llave N°7 en doble T cargada en el eje débil	69
4.38	Evolución de las tensiones de corte τ_{XZ} , llave N°8 en doble T cargada en el eje débil	69
4.39	Tensión Normal eje Z , llave N°1 en doble T cargada en el eje débil	70
4.40	Tensión Normal eje Z , llave N°7 en doble T cargada en el eje débil	71
4.41	Tensión Normal eje Z , llave N°8 en doble T cargada en el eje débil	71
4.42	Tensiones equivalentes de Von Mises, llaves en doble T cargadas en el eje débil	72
4.43	Deformada llaves de corte en doble T cargadas en el eje débil	73
4.44	Evolución de las tensiones principales mínimas, bloque, llave N°1 en doble T cargada en el eje débil	75
4.45	Evolución de las tensiones principales mínimas, bloque, llave N°7 en doble T cargada en el eje débil	75
4.46	Evolución de las tensiones principales mínimas, bloque, llave N°8 en doble T cargada en el eje débil	76
4.47	Evolución de las tensiones principales máximas, bloque, llaves en doble T car- gadas en el eje débil	77
4.48	Tensiones normales en el apoyo, según dirección X , llaves en doble T cargadas en el eje débil	78
4.49	Deformaciones en el bloque de hormigón según dirección X , llaves en doble T cargadas en el eje débil	79

4.50	Evolución de las tensiones principales mínimas, grout, llave N°1 en doble T cargada en el eje débil	80
4.51	Evolución de las tensiones principales mínimas, grout, llave N°7 en doble T cargada en el eje débil	81
4.52	Evolución de las tensiones principales mínimas, grout, llave N°8 en doble T cargada en el eje débil	81
4.53	Evolución de las tensiones principales máximas, grout, llave N°1 en doble T cargada en el eje débil	82
4.54	Evolución de las tensiones principales máximas, grout, llave N°7 en doble T cargada en el eje débil	83
4.55	Evolución de las tensiones principales máximas, grout, llave N°8 en doble T cargada en el eje débil	83
4.56	Deformaciones en grout de nivelación, según dirección X , llaves en doble T cargadas en el eje débil	84
4.57	Carga vs desplazamiento, Llave N°8, geometría Doble T, cargada en el eje fuerte	85
4.58	Momento vs desplazamiento, Llave N°8, geometría Doble T, cargada en el eje fuerte	86
4.59	Evolución de las tensiones de corte τ_{YZ} , llave N°8 en doble T cargada en el eje fuerte	87
4.60	Tensión Normal eje Z , llave N°8 en doble T cargada en el eje fuerte	88
4.61	Tensiones equivalentes de Von Mises, llaves en doble T cargadas en el eje fuerte	89
4.62	Deformada llaves de corte en doble T cargadas en el eje fuerte	90
4.63	Evolución de las tensiones principales mínimas, bloque, llave N°8 en doble T cargada en el eje fuerte	91
4.64	Evolución de las tensiones principales máximas, bloque, llaves en doble T cargadas en el eje fuerte	92
4.65	Tensiones normales en el apoyo, según dirección X , llaves en doble T cargadas en el eje fuerte	93
4.66	Deformaciones en el bloque de hormigón según dirección Y , llaves en doble T cargadas en el eje fuerte	94
4.67	Evolución de las tensiones principales mínimas, grout, llave N°8 en doble T cargada en el eje fuerte	95
4.68	Evolución de las tensiones principales máximas, grout, llave N°8 en doble T cargada en el eje fuerte	96
4.69	Deformaciones en grout de nivelación, según dirección X , llave N°8 en doble T cargada en el eje fuerte	96
4.70	Carga resistida por la llave y por el sistema global	99
4.71	Rigidez tangente y secante	100
4.72	Variación porcentual de la rigidez secante respecto del desplazamiento	102
4.73	Energía histerética disipada, llaves en cruz	103
4.74	Energía histerética disipada, llaves en doble T cargadas en el eje débil	104
4.75	Energía histerética disipada, llave en doble T cargada en el eje fuerte	105

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

Una llave de corte es un elemento estructural de acero que permite transmitir los esfuerzos de cizalle desde una columna hacia la fundación, de manera tal que se evite la transmisión de éstos por los pernos de anclaje. Usualmente, consiste en una pieza de acero en cruz (aunque también se usa la geometría doble T), soldada a la columna, y embebida en el bloque de hormigón.

En Chile las solicitaciones basales en las estructuras suelen ser importantes, debido a la alta actividad sísmica presente en el país. Debido a esto, las llaves de corte se encuentran presentes en la mayoría de las estructuras de carácter industrial. La normativa nacional vigente (NCh 2369, 2003) exige que las llaves deben transmitir la totalidad de los esfuerzos de corte, y que la falla del elemento se produzca en la sección de acero y no en el hormigón. No obstante, no indica un procedimiento de diseño a seguir, por lo que como referencia se utiliza lo indicado en la guía de diseño AISC.

La metodología ahí indicada se basa en la hipótesis de que la falla producida en la llave corresponde a una plastificación por flexión. Sin embargo, estudios experimentales recientes realizados en la Universidad Técnica Federico Santa María demostraron que el método no predice correctamente el comportamiento de las llaves de corte, señalando que el modo de falla dominante corresponde a la plastificación de la sección por corte (Palma, 2008), (Silva, 2012) y (Villar, 2013).

Posteriormente se realizaron estudios numéricos mediante la modelación por elementos finitos, en donde se validaron los resultados obtenidos experimentalmente, tanto para placas de corte en cruz (Núñez, 2014) como para llaves en doble T (Ramaciotti, 2014).

Si bien los trabajos anteriores representan un avance significativo en el estudio de estos elementos estructurales, los resultados obtenidos permiten comprender sólo el comportamiento para el caso monotónico. Debido a esto, la investigación desarrollada en el presente trabajo permitirá ampliar el análisis, incluyendo el desempeño de las placas de corte con solicitaciones cíclicas.

1.2. Objetivos

1.2.1. General

El objetivo principal de la investigación corresponde a estudiar numéricamente el comportamiento de llaves de corte de acero, con geometría de cruz y doble T, cuando se ven sometidas a solicitaciones cíclicas.

1.2.2. Específicos

Dentro de los objetivos específicos del estudio, se consideran los siguientes:

- Revisión y adaptación de modelos de elementos finitos, empleando la plataforma *ANSYS Workbench*, para llaves de corte de geometría de cruz y doble T.
- Identificación de los modos de falla producidos en las llaves de corte, cuando se ven solicitadas cíclicamente.
- Comparar los modos de falla observados para ambas geometrías, y contrastarlo con los resultados de estudios previos.

1.3. Alcances de cada capítulo

Introducción

Se presenta la motivación del estudio, en relación a la situación nacional. Se explican además los objetivos del estudio, tanto generales como específicos. Finalmente se detalla la estructura seguida en el informe.

Antecedentes

Se revisa y discute información sobre los principales temas atinentes al estudio. En una primera instancia, se realiza una revisión de la literatura, dando especial énfasis a las disposiciones normativas actuales, tanto nacionales como extranjeras, estudios experimentales y numéricos. Posteriormente, se presenta un marco teórico donde se detallan los principios y leyes que rigen el comportamiento físico de los elementos estudiados.

Calibración de los Modelos de Elementos Finitos

En este capítulo se detallan las características y propiedades de los modelos estudiados, en lo que refiere al detalle de la modelación y propiedades de materiales (empleados en estudios previos). Posteriormente se explican las modificaciones realizadas en pos de lograr una mejor representación del problema de desplazamientos cíclicos. En particular se modifican propiedades que permitan estudiar el comportamiento no lineal en el hormigón.

Análisis y comparación de resultados

Se presentan y discuten los resultados obtenidos a partir de la modelación de las llaves de corte sometidas a desplazamientos cíclicos. Se analiza el comportamiento de los materiales y partes constituyentes del elemento, y se discuten los fenómenos observados asociados a las sollicitaciones cíclicas.

Conclusiones

En base al trabajo realizado, se presentan las conclusiones del estudio.

Capítulo 2

Antecedentes

En este capítulo se realiza una revisión del material bibliográfico relacionado con el tema de estudio. En una primera instancia se detallan las disposiciones normativas vigentes. Posteriormente, se discuten procedimientos de diseño recomendados en base a lo observado en trabajos experimentales, poniendo énfasis en el comportamiento de los materiales y modos de falla supuestos. Se revisan además, los estudios analíticos desarrollados para el caso de llaves de corte solicitados de forma monotónica.

Posteriormente, se presentan los fundamentos teóricos que permiten comprender y analizar el comportamiento de los elementos, comenzando por algunas especificaciones de los tipos de elementos finitos empleados en los modelos, y la determinación de los modos de falla en los materiales frágiles.

Finalmente, se describen las condiciones que determinan los modos de falla asociados a los elementos de acero, particularmente para las geometrías de las llaves de corte estudiadas.

2.1. Revisión Bibliográfica

2.1.1. Normas Nacionales

NCh 2369 Of.2003 (INN, 2003)

Dentro del contexto nacional, la norma NCh 2369 Of.2003 *Diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales*, corresponde a la principal referencia en el diseño de estructuras de acero. En su capítulo 8.6 *Anclajes* se indican algunas disposiciones generales relativas a las llaves de corte, detalladas en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1: Disposiciones respecto a llaves de corte (INN, 2003)

Sección	Detalle
8.6.1	Los apoyos de estructuras y equipos que transmiten esfuerzos sísmicos a las fundaciones u otro elemento de hormigón se deben anclar por medio de pernos de anclaje, placas de corte, barras de refuerzo u otros medios adecuados.
8.6.3	Las placas bases de columnas y equipos en general deben estar provistas de placas de corte o topes sísmicos diseñados para transmitir el 100 % del esfuerzo basal. Se exceptúan de esta exigencia los casos siguientes: <ul style="list-style-type: none">(a) Apoyos con esfuerzo de corte inferior a 50 kN; en este caso se aceptará tomar el corte con los pernos, considerando que sólo dos de ellos son activos para este fin y las correspondientes fórmulas de interacción corte-tracción.(b) Bases de estanques y equipos provistos de nueve o más pernos, considerando activos un tercio del número total de pernos, y aplicando las correspondientes fórmulas de interacción corte-tracción con la tracción máxima y el corte así calculado.(c) Estanques con razón de aspecto menor que uno, que no requieren anclaje de acuerdo con 11.8. En este caso el corte podrá ser tomado con la conicidad de la base. En los casos a) y b) los pernos deben estar embebidos en la fundación.
8.6.4	En el diseño de la placa de corte no se debe considerar la resistencia del mortero de nivelación.
8.6.5	El diseño de elementos de anclaje al corte no debe contemplar el roce entre la placa base y la fundación.
8.6.6	No se debe considerar la superposición de resistencia entre placas de corte y pernos de anclaje.
8.6.8	El hormigón de las fundaciones se debe diseñar para resistir los esfuerzos verticales y horizontales transmitidos por los elementos metálicos de anclaje. La resistencia del hormigón y sus esfuerzos debe ser tal que la eventual falla se produzca en los dispositivos metálicos y no en el hormigón.

No obstante las recomendaciones anteriores, en la norma no se entregan indicaciones sobre cómo diseñar los elementos del sistema.

Manual de Diseño para Estructuras de Acero (ICHA, 2003)

El manual de diseño de estructuras de acero elaborado por el Instituto Chileno de Acero se refiere a las llaves de corte en su capítulo 3.3 *Conexión de la Columna a la Fundación*. Al respecto, señala que “Las placas de corte resultan ineludibles en casos de solicitaciones importantes. Para situaciones de solicitaciones bajas ellas pueden suprimirse. Generalmente se cita el límite de 5 toneladas para determinar la solicitación de corte. Finalmente, hay que hacer hincapié que cuando se suprime la placa de corte los pernos estarán seguramente sometidos a interacción corte-tracción”

2.1.2. Normas y recomendaciones de diseño extranjeras

Steel Design Guide N°1 “*Column Base Plate*” (AISC, 2003)

En la guía de diseño elaborada por el American Institute of Steel Construction se reconocen cuatro maneras en que se transmite el esfuerzo de corte desde la columna hacia la fundación.

La primera de ellas consiste en la fricción entre el hormigón y el acero, debido a la carga axial. La resistencia se obtiene a partir del producto entre la fuerza de compresión y el coeficiente de fricción. Dicho coeficiente puede variar entre 0.55 y 0.9. Además, Goldman (1983) sugiere no sobrestimar la carga axial, e indica que la fuerza friccional resistente debe calcularse con un 75 % de las cargas muertas.

Otras formas de transmitir el corte a la fundación consideran la utilización de pernos de anclaje, aunque resulta complejo suponer que todos los pernos se encuentran en contacto con la placa base, debido a que el diámetro de las perforaciones es mayor al de los pernos. Algunos autores (Goldman, 1983; Kharod, 1980) señalan que la transferencia de corte por los pernos debe considerarse sólo para cargas bajas.

Además, es posible transmitir el esfuerzo a través de la columna embebida directamente en el hormigón. En este caso, la profundidad de penetración dependerá de la capacidad de aplastamiento del grout.

La cuarta opción a considerar consiste en la utilización de llaves de corte (ver figura 2.1), la que consiste en una placa de acero soldada a la placa base. Con esto, la transmisión del corte se da en la interacción entre la placa y el grout de nivelación, considerando que la primera actúa como una viga en voladizo.

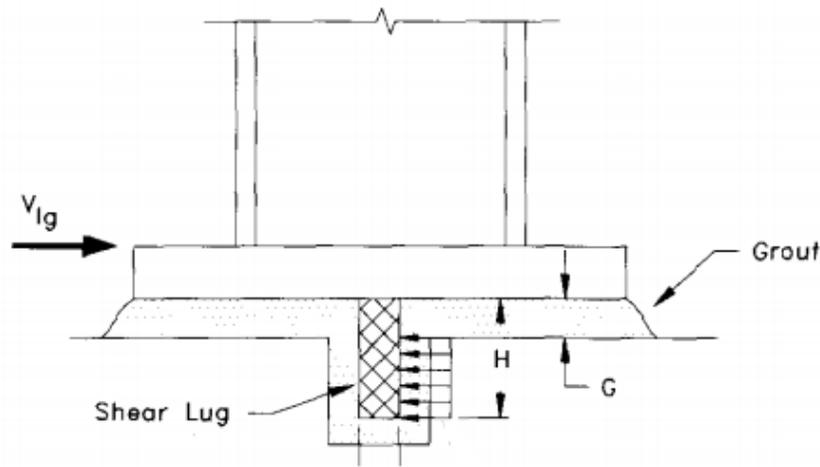


Figura 2.1: Modelo llave de corte (AISC, 2003)

En la guía se detalla un procedimiento de diseño para las llaves de corte, considerando en primer lugar el área de contacto necesaria, entre la placa y el hormigón, limitando la tensión entre las partes. Luego, se calcula el espesor de la llave a partir del momento flector en su base.

Un extracto de las ecuaciones de diseño es presentado en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2: Procedimiento de diseño (AISC, 2003)

Elemento	Método ASD	Método LRFD
Área de contacto necesaria	$A_{lg} = \frac{V_{lg}}{0,35 \cdot f'_c}$	$A_{lgu} = \frac{V_{lgu}}{0,85 \cdot \delta \cdot f'_c}$
Momento en llave de corte	$M_{lg} = \left(\frac{V_{lg}}{W} \right) \cdot \left[\frac{H + G}{2} \right]$	$M_{lgu} = \left(\frac{V_{lgu}}{W} \right) \cdot \left[\frac{H + G}{2} \right]$
Espesor llave de corte	$t_{lg} = \sqrt{\frac{6 \cdot M_{lg}}{0,75 \cdot f_y}}$	$t_{lg} = \sqrt{\frac{4 \cdot M_{lg}}{0,9 \cdot f_y}}$

donde

$A_{lg} = (H - G) \cdot W$, Área de llave de corte en oposición al grout.

V_{lg} : Fuerza de corte de diseño

M_{lg} : Momento volcante en la llave.

t_{lg} : Espesor de la llave de corte.

H : Altura de la llave de corte.

W Ancho de la llave de corte.

G : Espesor del grout de nivelación.

f'_c : Resistencia del hormigón a la compresión.

f_y : Tensión de fluencia en el acero.

2.1.3. Estudios Experimentales

Estudios experimentales Universidad Técnica Federico Santa María

A partir del año 2008, en la Universidad Federico Santa María, se comienzan a desarrollar investigaciones experimentales sobre el comportamiento de llaves de corte de diversas geometrías. Palma (2008) estudió la geometría en cruz, mientras que Silva (2012) y Villar (2013) trabajaron con la geometría en doble T.

Dentro de los resultados más relevantes del estudio, destaca la identificación de dos modos de falla predominantes en el sistema, correspondiente a la plastificación de la llave por corte y al aplastamiento en el hormigón. A partir de los experimentos se concluye que no se observa una falla por flexión, contradiciendo de esta manera lo propuesto por la AISC (2003). Debido a esto, Palma (2008) propone una metodología de diseño determinada a partir de expresiones que se condicen con los resultados del estudio.

En primer lugar, se diseña la sección transversal de la llave de manera que se verifique la fluencia al corte.

Tabla 2.3: Procedimiento de diseño propuesto (Palma, 2008)

Método ASD	Método LRFD
$A_{corte} \geq \frac{V_{lg}}{\frac{1}{FS} \cdot (0,6 \cdot f_y) \cdot F_{esb}}$	$A_{corte} \geq \frac{V_{lg}}{\Phi_v \cdot (0,6 \cdot f_y) \cdot F_{esb}}$

donde, además de los términos definidos en la sección 2.1.2, se tiene:

$A_{corte} = 2 \cdot W \cdot t - t^2$, Área de la llave de corte.

$FS = 1,67$: Factor de seguridad.

$\Phi_v = 0,9$, Factor de reducción.

$$F_{esb} = \begin{cases} 0,9 & \text{si } \frac{H - G}{2} < 0,7 \\ 1,0 & \text{si } \frac{H - G}{2} > 0,7 \end{cases}, \text{ Factor de esbeltez.}$$

Luego, se calcula la carga máxima de corte soportada por la llave en fluencia, en base a las recomendaciones del “*Seismic Provisions Steel Buildings*” (AISC, 2010). Con esto se busca garantizar que la carga pueda ser resistida completamente por el hormigón, de tal forma que se tenga la fluencia por corte antes que la falla frágil en el hormigón. Así, la carga máxima queda definida por la ecuación (2.1).

$$V_{max} = 1,1 \cdot R_y \cdot [(0,6 \cdot f_y) \cdot A_{corte} \cdot \Omega_{exp}] \quad (2.1)$$

donde

R_y : Razón entre el esfuerzo de fluencia esperado y el mínimo esfuerzo de fluencia especificado. Para acero de calidad ASTM A36 $R_y = 1,5$

Ω_{exp} : Sobre resistencia experimental de la llave de corte. Para llaves de corte en cruz $\Omega_{exp} = 1,5$

Finalmente, se comprueba que el hormigón es capaz de resistir toda la fuerza de corte V_{max} , de manera de evitar una falla frágil en el material.

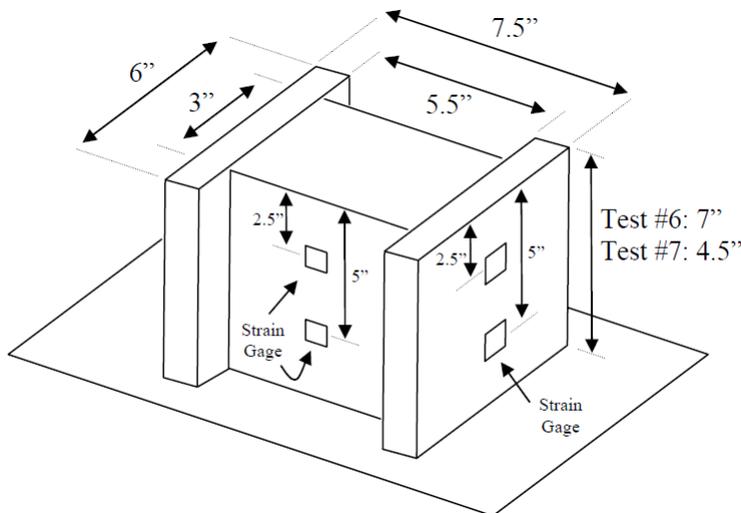
Tabla 2.4: Comprobación área al corte (Palma, 2008)

Método ASD	Método LRFD
$A_{lg} \geq \frac{V_{max}}{\frac{1}{FS} \cdot (1,3 \cdot f'_c)}$	$A_{lg} \geq \frac{V_{max}}{\Phi \cdot (1,3 \cdot f'_c)}$
$\frac{H - G}{2} \leq 1,0$	$\frac{H - G}{2} \leq 1,0$

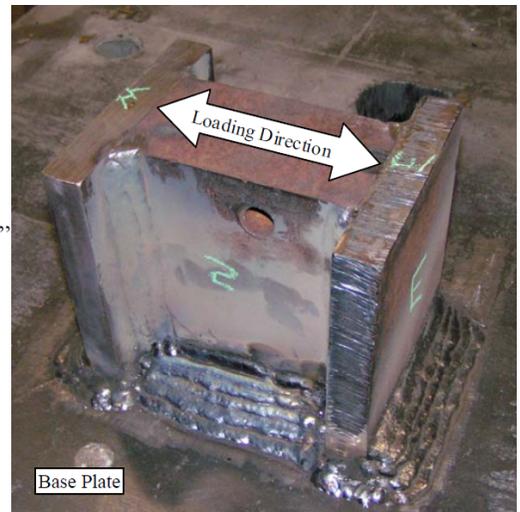
Shear Transfer in Exposed Column Base Plates (Kanvinde et al., 2009)

En marzo del año 2009 se presenta ante la AISC un reporte donde se estudia experimentalmente el comportamiento de los distintos mecanismos de transferencia de corte en placas base de columnas. En particular, se analiza la transferencia de corte por fricción entre la placa de acero y el bloque de hormigón, y la transferencia a través de los pernos de anclaje y llaves de corte.

A pesar de que sólo se estudia el comportamiento de las llaves de corte para el caso monotónico, sí se realizan experimentos con carga cíclica para el estudio de la fricción y de los pernos de anclaje. La llave analizada presenta una geometría en doble T, y se carga según su eje fuerte (fig. 2.2).



(a) Dimensiones



(b) Llave soldada a la placa base, test #6

Figura 2.2: Llaves de corte analizadas (Kanvinde et al., 2009)

La instalación experimental resulta similar a la empleada en los estudios mencionados anteriormente, y se compone de un bloque de hormigón, una placa base de acero y el grout de nivelación actuando en la interfaz. Dependiendo del test realizado, se incluyen los pernos de anclaje y la llave de corte.

El desplazamiento lateral se controla mediante un actuador sobre la placa base. Además, se inducen cargas axiales al sistema mediante un actuador vertical. La figura 2.3a muestra esquemáticamente el montaje experimental.

Para los estudios de la transferencia por fricción y por los pernos de anclaje, se utilizaron protocolos de desplazamiento como el mostrado en la figura 2.3b, donde se aumenta la amplitud de la sollicitación cada dos ciclos de carga, a velocidad constante.

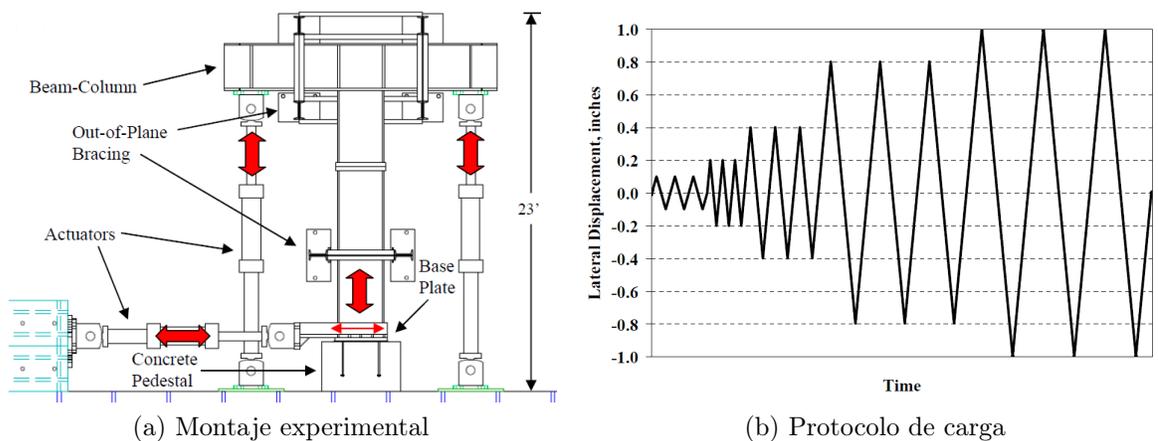


Figura 2.3: Disposiciones experimentales (Kanvinde et al., 2009)

Si bien el estudio no comprende el caso cíclico para llaves de corte, se consideran relevantes para este estudio los resultados globales obtenidos para los test #4 y #5, donde el mecanismo de transferencia analizado corresponde interacción entre los pernos de anclaje, el grout de nivelación y el bloque de hormigón.

Al respecto, en las curvas carga-desplazamiento de ambos ensayos se observa un comportamiento histerético complejo dominado por diversos fenómenos. La figura 2.4 muestra una gran carga máxima inicial, la que se atribuye a restos del grout que no fueron removidos completamente de los agujeros donde se insertan los pernos de anclaje. Dichos restos altamente confinados restringen el movimiento de los pernos y requieren de una carga relativamente alta para romperse. Dado el carácter muy frágil de este modo de falla se decide ignorar su efecto en el análisis.

En base a lo anterior, se tiene que las figuras 2.4 y 2.5 presentan una respuesta muy similar, donde se observa un estrangulamiento o *pinching* en la curva de histéresis que se acentúa a medida que la rigidez lateral de los pernos disminuye al volver a su posición vertical original, y aumenta al deformarse en la dirección opuesta. Además, se tiene también una degradación tanto de la rigidez como de la resistencia para amplitudes de desplazamiento lateral reiterados. Este fenómeno se atribuye a daños generados por agrietamiento y aplastamiento en el grout y el bloque de hormigón.

Además, se observa una respuesta asimétrica en ambos ensayos, especialmente en el test #5 (fig. 2.5), donde la máxima carga inducida por corte en una dirección resulta un 79% mayor que la máxima carga por corte en la dirección inversa. Este fenómeno se atribuye a la colocación irregular de los pernos de anclaje en los agujeros respectivos, lo que induce una mayor restricción de desplazamiento y menores longitudes de flexión en los pernos para las dos direcciones de desplazamiento.

En ambos casos, el análisis continuó hasta la fractura de alguno de los pernos de anclaje. Dicho instante se grafica en las figuras 2.4 y 2.5.

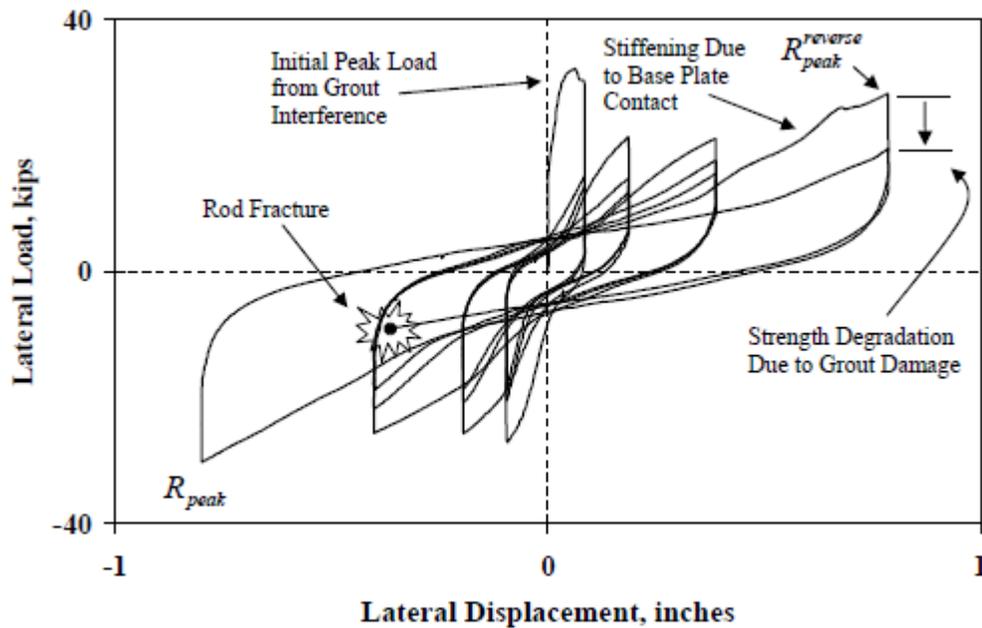


Figura 2.4: Curvas carga-deformación, transferencia de corte por pernos de anclaje, test #4 (diámetro perno 3/4") (Kanvinde et al., 2009)

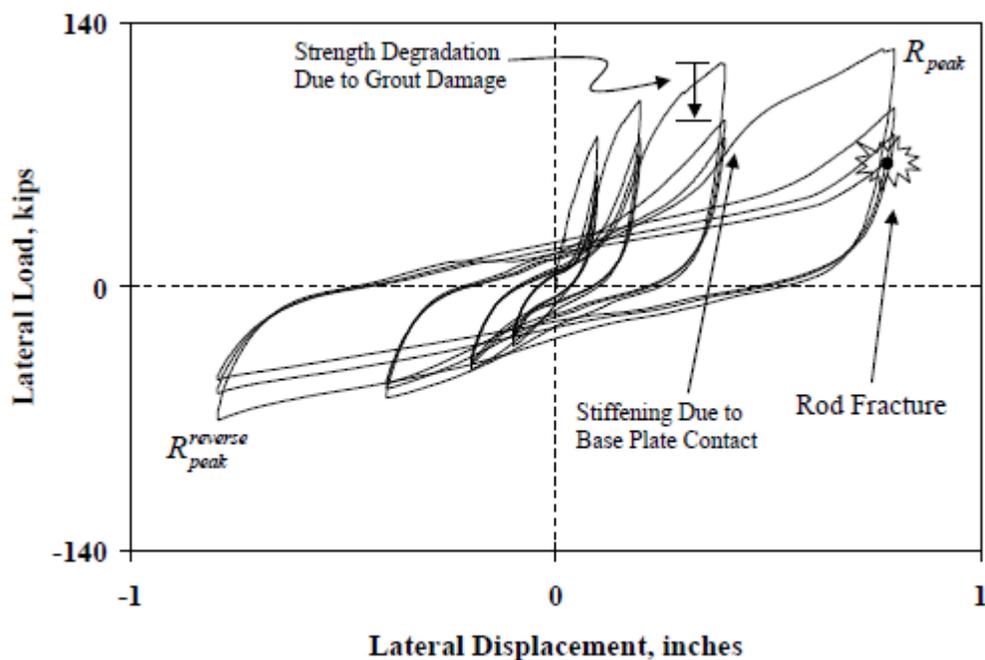


Figura 2.5: Curvas carga-deformación, transferencia de corte por pernos de anclaje, test #5 (diámetro perno 1 1/4") (Kanvinde et al., 2009)

2.1.4. Estudios Numéricos

Estudio Numérico de Llaves de Corte de Acero en Cruz para Placas Base de Columnas (Núñez, 2014)

Núñez (2014) realizó un estudio numérico del comportamiento de llaves de corte con geometría en cruz, mediante modelos de elementos finitos. Para esto, se basó en los resultados experimentales del estudio de Palma (2008).

Dentro de las particularidades observadas en el comportamiento del modelo, se tiene que si bien las tensiones por flexión alcanzan valores importantes en la base de la llave, éstas nunca superan el valor del momento plástico de la sección transversal. Además, se observa que la flexión crece de manera lineal hasta un nivel bajo de deformaciones, para luego alcanzar un máximo y comenzar a decaer hasta su valor último.

Además, desde un punto de vista local, no se observan deformaciones importantes en la zona inferior de la llave embebida en el hormigón, dado el confinamiento proporcionado por los elementos de concreto.

En vista de lo anterior, Núñez (2014) concluye que el modo de falla predominante en la llave de corte y en el sistema completo analizado corresponde a la fluencia al corte en la sección transversal de la base de la llave. Debido a esto, se descarta la ocurrencia de plastificación por flexión, que corresponde al modo principal de falla considerado por la AISC.

Análisis Numérico de Llaves de Corte con Geometría Doble T (Ramaciotti, 2014)

Ramaciotti (2014) analizó el comportamiento de llaves de corte con geometría doble T, cuando éstas son cargadas en sus dos direcciones principales.

Dentro de los resultados obtenidos, se observa que para el caso de llaves cargadas según su eje fuerte, el fin de la parte lineal de las deformaciones viene dada por la plastificación del alma. En el caso de llaves cargadas en el eje débil, este límite queda definido por la plastificación de las alas. Consecuentemente, del análisis de tensiones se tiene que la plastificación de la sección transversal es producto de los esfuerzos de corte en la llave, y que la relevancia de los esfuerzos por flexión resulta menor.

Dado esto, Ramaciotti (2014) concluye que el modo de falla predominante corresponde a una plastificación de la llave por corte, descartando el modo de falla asociado a la flexión. A su vez, esto contradice el supuesto de que la llave se comporta como viga en cantilever. Esto concuerda con lo propuesto por Palma (2008) y Núñez (2014).

2.2. Marco Teórico

En el presente apartado se detallan algunos de los conceptos necesarios para realizar los análisis y comparaciones de los resultados entregados por la modelación.

En primer lugar, se describen algunos conceptos teóricos y expresiones que permiten calcular la resistencia de los distintos elementos, y las hipótesis involucradas. Luego, se muestran algunos tipos de elementos finitos disponibles en el software utilizado, además de las características generales de *ANSYS Workbench*.

2.2.1. Modelo de elementos finitos

Tipo de elementos

A continuación se describen los tipos de elementos finitos disponibles en *ANSYS Workbench* que se utilizan en este trabajo, sus características generales y el tipo de modelación que permiten realizar.

Se incluyen los elementos empleados en los modelos ya desarrollados, y los elementos finitos que se emplean en la modelación del problema que motiva este trabajo.

SOLID185

Se utiliza para la modelación de sólidos estructurales homogéneos y tridimensionales. Queda definido por ocho nodos (I, J, K, L, M, N, O, P), con tres grados de libertad cada uno (UX, UY, UZ). Geométricamente, corresponde generalmente a un elemento hexaédrico, aunque también acepta degeneraciones en la geometría para la modelación de condiciones especiales (prismas, pirámides y tetraedros).

El elemento considera plasticidad, hiperelasticidad, creep, grandes deformaciones y tensiones, entre otros. Se emplea principalmente para la modelación de materiales elastoplásticos e hiperelásticos.

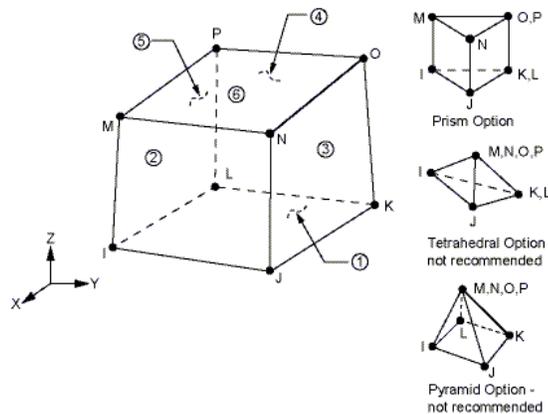


Figura 2.6: Representación geométrica del elemento finito SOLID185 (ANSYS, 2009)

SOLID285

Corresponde a un elemento tridimensional de cuatro nodos (I, J, K, L), con cuatro grados de libertad cada uno (UX, UY, UZ, HDSP). Los grados de libertad considerados corresponden a tres traslacionales y uno de presión hidrostática.

Es un tipo de elemento útil en la modelación de cuerpos irregulares y materiales generales. El elemento considera plasticidad, grandes deformaciones y tensiones, entre otros.

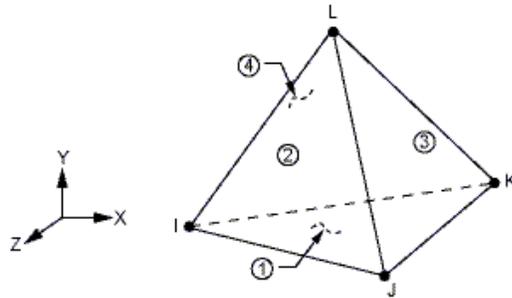


Figura 2.7: Representación geométrica del elemento finito SOLID285 (ANSYS, 2009)

SOLID65

Se utiliza para la modelación tridimensional de sólidos con o sin barras de refuerzo. El sólido es capaz de experimentar agrietamiento en tracción y aplastamiento en compresión. Por esto, es muy utilizado para la modelación de cuerpos de hormigón armado, donde la capacidad del sólido se utiliza para modelar el concreto y la capacidad de refuerzo se emplea para modelar el comportamiento del refuerzo. También puede utilizarse para modelar otros materiales reforzados, como la fibra de vidrio, y materiales geológicos, como diversos tipos de roca.

Queda definido por ocho nodos (I, J, K, L, M, N, O, P), con tres grados de libertad cada uno (UX, UY, UZ). Pueden especificarse hasta tres direcciones diferentes para las barras de refuerzo.

Uno de los aspectos más importantes de este elemento es que permite la modelación de propiedades no lineales en los materiales. El concreto es capaz de experimentar agrietamiento en tres direcciones ortogonales, aplastamiento, deformaciones plásticas y creep. El refuerzo puede experimentar tensión y compresión, pero no corte. Además, pueden también sufrir deformaciones plásticas y creep.

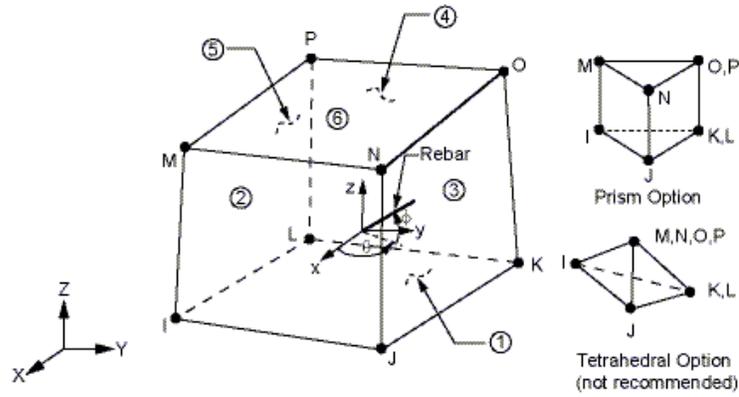


Figura 2.8: Representación geométrica del elemento finito SOLID65 (ANSYS, 2009)

CONTA174

Se utiliza para representar el contacto y deslizamiento entre las superficies para un análisis 3-D. El elemento queda definido por ocho nodos (I, J, K, L, M, N, O, P) y se ubica en la superficie de sólidos con nodos intermedios (SOLID285). El elemento posee las mismas propiedades geométricas que el sólido sobre el que se encuentra.

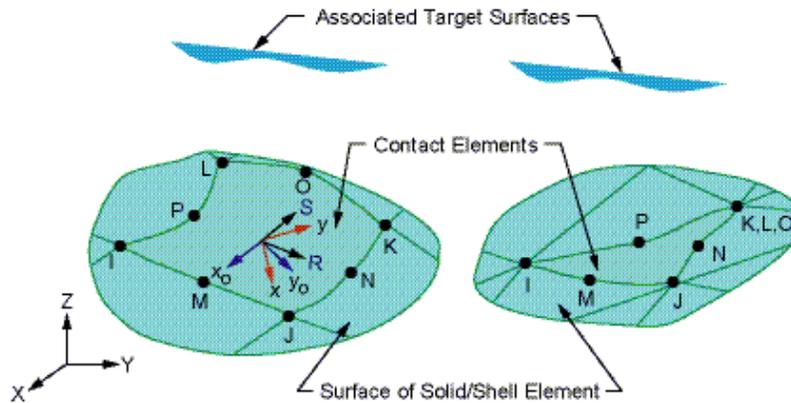


Figura 2.9: Representación geométrica del elemento finito CONTA174(ANSYS, 2009)

CONTA173

Se utiliza para la representación del contacto y deslizamiento entre una superficie denominada "target"(TARGE170) y una superficie deformable, definida por este elemento. Se emplea en análisis estructurales tridimensionales.

El elemento está determinado por cuatro nodos (I, J, K, L) y se ubica en la superficie de sólidos sin nodos intermedios (SOLID65, SOLID185), y tiene las mismas propiedades geométricas del sólido al que se conecta.

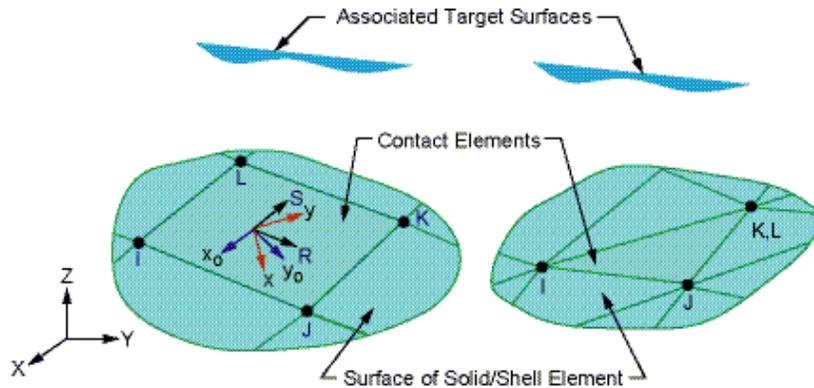


Figura 2.10: Representación geométrica del elemento finito CONTA173 (ANSYS, 2009)

TARGE170

Se emplea para representar distintos tipos de superficies objetivo en análisis estructurales 3-D, asociadas a superficies de contacto definidas por distintos tipos de elementos finitos (CONTA173, CONTA174).

Esta superficie objetivo se discretiza en segmentos de superficie, cada una asociada con una superficie de contacto.

Para superficies objetivo rígidas, el elemento puede modelar fácilmente formas complejas. Para la modelación de superficies objetivo flexibles, el elemento se superpone al sólido, describiendo los bordes del sólido objetivo.

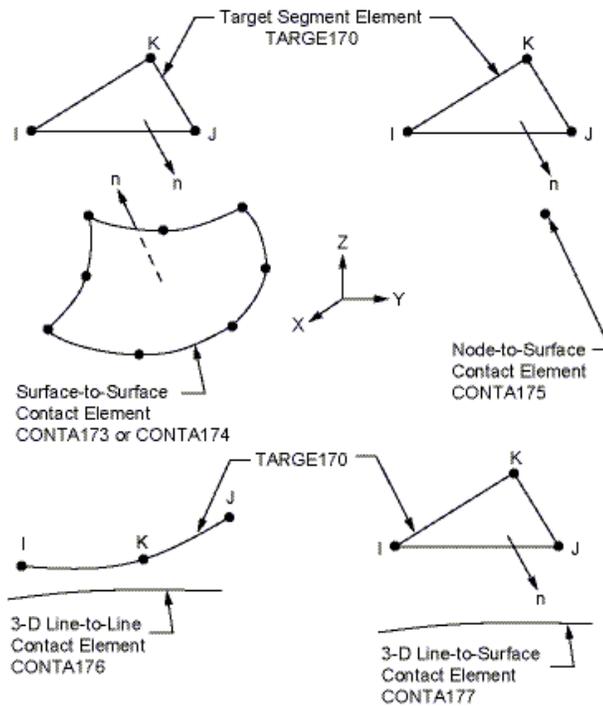


Figura 2.11: Representación geométrica del elemento finito TARGE170 (ANSYS, 2009)

2.2.2. Modelación de modos de falla en el hormigón

Se explican a continuación, de manera general, los aspectos teóricos asociados al modelo de modos de falla asociados al elemento *SOLID65*, destacando parámetros relevantes en la posterior calibración de los modelos.

Si se presenta comportamiento elástico, el hormigón es tratado como un material lineal y elástico, con una relación de esfuerzo y deformación definida por la matriz de la ecuación 2.2.

$$[D^c] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} (1-\nu) & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & (1-\nu) & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & (1-\nu) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Por otro lado, si se presentan condiciones de agrietamiento o aplastamiento, la matriz recién definida se reajusta como se explica a continuación.

Agrietamiento

La presencia de una grieta en cualquiera de los puntos de integración es representada con la modificación de las relaciones esfuerzo-deformación mediante la introducción de un plano de debilitación en la dirección normal a la cara de la grieta. Además se introduce un coeficiente de transferencia de corte β_t , que representa un factor de reducción en el esfuerzo de corte transmitido por deslizamiento a lo largo de la grieta.

La nueva relación esfuerzo-deformación para el material que se ha agrietado solo en una dirección queda definida por la matriz 2.3.

$$[D_c^{ck}] = \frac{E}{(1+\nu)} \begin{bmatrix} \frac{R^t(1+\nu)}{E} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{1-\nu} & \frac{1}{1-\nu} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{1-\nu} & \frac{1}{1-\nu} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\beta_t}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\beta_t}{2} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

donde R^t corresponde a la pendiente (módulo secante) definido en la figura 2.12. Dicho factor disminuye en cada iteración, tendiendo a 0 a medida que la solución converge. Además, T_c representa el porcentaje de relajación de esfuerzos en la condición agrietada.

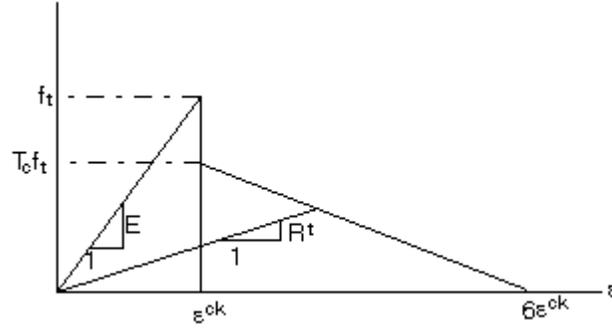


Figura 2.12: Relajación de esfuerzos en condición agrietada(ANSYS, 2009)

Cuando la grieta se cierra todos los esfuerzos compresivos normales a la cara de la grieta son transmitidos a través de ella, y se introduce el coeficiente de transferencia de corte para una grieta cerrada β_c . En dicho caso, la matriz de esfuerzo deformación se define según la ecuación 2.4.

$$[D_c^{ck}] = \frac{E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \begin{bmatrix} (1 - \nu) & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & (1 - \nu) & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & (1 - \nu) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \beta_c \frac{(1-2\nu)}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \beta_c \frac{(1-2\nu)}{2} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Considerando además los casos con presencia de grietas abiertas y o cerradas en dos o tres direcciones, se tiene un total de dieciséis posibles combinaciones de agrietamiento con los subsecuentes cambios en la matriz de esfuerzo-deformación.

Cabe a destacar que de acuerdo a la definición de los coeficientes antes mencionados debe cumplirse que $1 > \beta_c > \beta_t > 0$.

Aplastamiento

Si el material falla en algún punto de integración por compresión uniaxial, biaxial o triaxial, se asume que existe aplastamiento en dicho punto. Para el elemento *SOLID65* el aplastamiento se define como el deterioro completo de la integridad estructural del material.

Bajo el cumplimiento de las condiciones en que se tenga aplastamiento, se asume que la resistencia del material se ha degradado a tal punto que su contribución a la rigidez del elemento en el punto de integración analizado puede ser despreciada.

2.2.3. Estados límite en acero

Debido a que se necesita caracterizar el comportamiento de las llaves de acero, se discuten a continuación algunos aspectos teóricos que permiten determinar los posibles estados de falla en el material.

Flexión

Considerando un estado de flexión pura, se tienen dos condiciones importantes para describir el comportamiento de las llaves. El primero corresponde al comienzo de la fluencia en la sección transversal, situación que se presenta cuando la tensión de la fibra más extrema alcanza el valor de la tensión de fluencia del material. El momento que se tiene en este punto se calcula según la ecuación 2.5

$$M_y = f_y \cdot W_e \quad (2.5)$$

donde W_e corresponde al módulo elástico de la sección, y se calcula como.

$$W_x = \frac{I_x}{y_{max}} \quad , \quad W_y = \frac{I_y}{x_{max}}$$

con I_x e I_y los momentos de inercia respecto a los ejes X e Y , y x_{max}, y_{max} las distancias en los ejes X e Y a la fibra extrema, medidas respecto al eje neutro.

Además, resulta de interés conocer el momento para el cual se tiene una plastificación completa de la sección transversal, producto de los esfuerzos de flexión. Dado que se considera un acero definido por una curva esfuerzo-deformación perfectamente elastoplástica, dicho estado se alcanza cuando se tiene que toda la sección ha alcanzado la tensión de fluencia.

El momento de plastificación se calcula según la ecuación 2.6

$$M_p = f_y \cdot Z_p \quad (2.6)$$

donde Z_p corresponde al módulo plástico de la sección y se calcula dependiendo de la geometría de la misma, según se detalla en la tabla 2.5.

Tabla 2.5: Módulos plásticos de perfiles estudiados

Perfil	Módulo Plástico
Llaves en Cruz	$Z_p = \frac{W \cdot t^2}{4} + \frac{t \cdot (W^2 - t^2)}{4}$
Llaves Doble T cargadas en el eje débil	$Z_p = \frac{W^2 \cdot t}{2} + \frac{t^2 \cdot S}{2}$
Llaves Doble T cargadas en el eje fuerte	$Z_p = W \cdot t \cdot (S + t) + \frac{S^2 \cdot t}{4}$

donde

W : ancho de la llave de corte. En los perfiles doble T, corresponde al ancho de las alas.

t : espesor de la llave

S : altura del alma en las llaves doble T

Corte

El máximo cortante que la sección transversal puede resistir se determina a partir de lo indicado según la teoría de Von Mises, donde la resistencia nominal queda determinada por un estado bidimensional de tensiones, actuando en corte puro.

Al igualar la tensión equivalente a la tensión uniaxial de fluencia a la tracción se obtiene la expresión

$$\tau_{max} = \frac{f_y}{3} \Rightarrow \tau_y = 0,577f_y \simeq 0,6f_y \quad (2.7)$$

Así, la resistencia nominal al corte corresponde a

$$V_{corte} = 0,6f_y \cdot A_{corte} \quad (2.8)$$

donde A_{corte} corresponde a la sección transversal de la llave sometida a esfuerzo cortante.

Capítulo 3

Calibración de Modelos de Elementos Finitos

En este capítulo se describen las modificaciones realizadas a los modelos empleados en estudios anteriores para el análisis de llaves de corte en cruz (Núñez, 2014) y doble T (Ramaciotti, 2014), bajo condiciones de desplazamientos monotónicos.

En particular, se describen las propiedades mecánicas de los materiales utilizados en cada uno de los modelos, haciendo énfasis en los parámetros asociados a la representación de la falla por agrietamiento y aplastamiento en el hormigón.

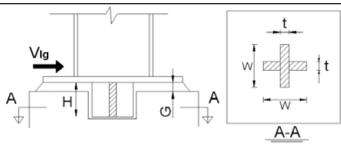
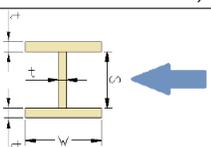
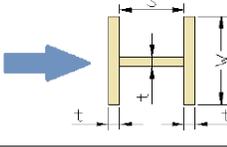
Además, se discuten los criterios adoptados en la modelación de las barras de refuerzo a tracción y también aspectos relevantes respecto del mallado utilizado.

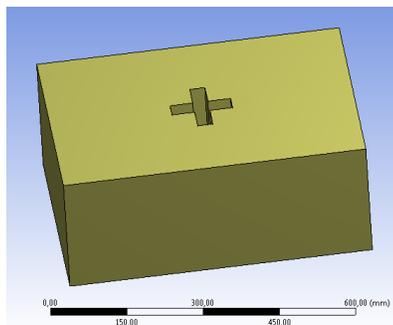
Finalmente, se presentan las curvas fuerza desplazamiento para cada uno de los modelos en el caso monotónico, comparándolas con las empleadas en modelos previos y con la evidencia experimental disponible.

3.1. Geometría de los modelos analizados

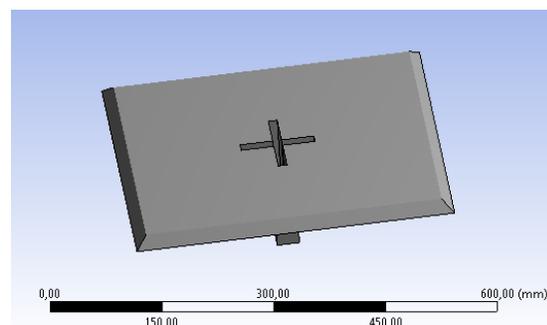
En la tabla 3.1 se detallan las propiedades geométricas de las llaves de corte modeladas, clasificadas según la nomenclatura utilizada en los trabajos experimentales. Además, la figura 3.1 muestra los cuatro cuerpos que forman parte de los modelos analizados.

Tabla 3.1: Geometría llaves de corte modeladas

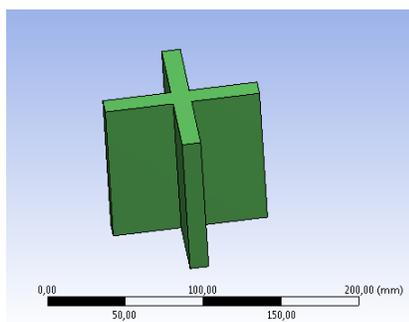
Cruz (Palma, 2008)						
	Llave	$W[mm]$	$H[mm]$	$t[mm]$	$G[mm]$	
	N°1	100	100	5	8	
	N°4	100	100	8	11	
	N°6	100	100	12	15	
Doble T, desplazamiento según eje débil (Silva, 2012)						
	Llave	$W[mm]$	$H[mm]$	$S[mm]$	$t[mm]$	$G[mm]$
	N°1	100	100	90	5	15
	N°7	150	130	118	6	15
	N°8	100	130	124	3	15
Doble T, desplazamiento según eje fuerte (Villar, 2013)						
	Llave	$W[mm]$	$H[mm]$	$S[mm]$	$t[mm]$	$G[mm]$
	N°1	100	100	90	5	15
	N°7	130	150	124	3	15
	N°8	130	150	118	6	15



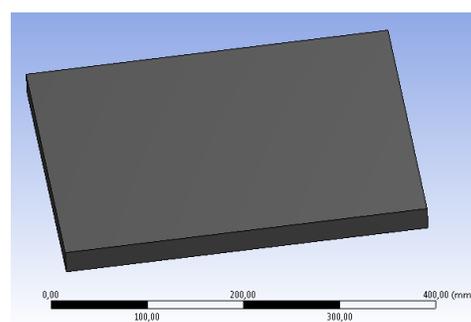
(a) Bloque



(b) Grout



(c) Llave



(d) Placa

Figura 3.1: Componentes modelados en ANSYS Workbench, llave N°6, geometría de cruz

3.2. Materiales

El comportamiento de los materiales empleados en la modelación queda determinado por sus propiedades mecánicas, tales como su comportamiento elástico e inelástico y sus límites de resistencia. A continuación, se detallan los criterios empleados para cada material. Las propiedades del hormigón se discuten en el apartado siguiente, dada la relevancia que la modificación de algunas de sus propiedades posee sobre el comportamiento global de los modelos.

3.2.1. Grout de nivelación

A diferencia del bloque de hormigón, el grout es modelado como un material definido por un comportamiento elastoplástico perfecto con una curva esfuerzo deformación bilineal. Las razones para escoger un comportamiento que no represente fallas frágiles en el material se discuten más adelante.

Por lo anterior, las propiedades del grout de nivelación son las mismas empleadas en los modelos anteriores (Núñez, 2014; Ramaciotti, 2014).

Tabla 3.2: Propiedades grout de nivelación

Modelo	ρ [kg/m ³]	ν	f'_c [MPa]	E [MPa]	f_r [MPa]
Llaves en cruz	2400	0.2	40	29725	3.93
Llaves doble T	2400	0.2	43	30820	4.07

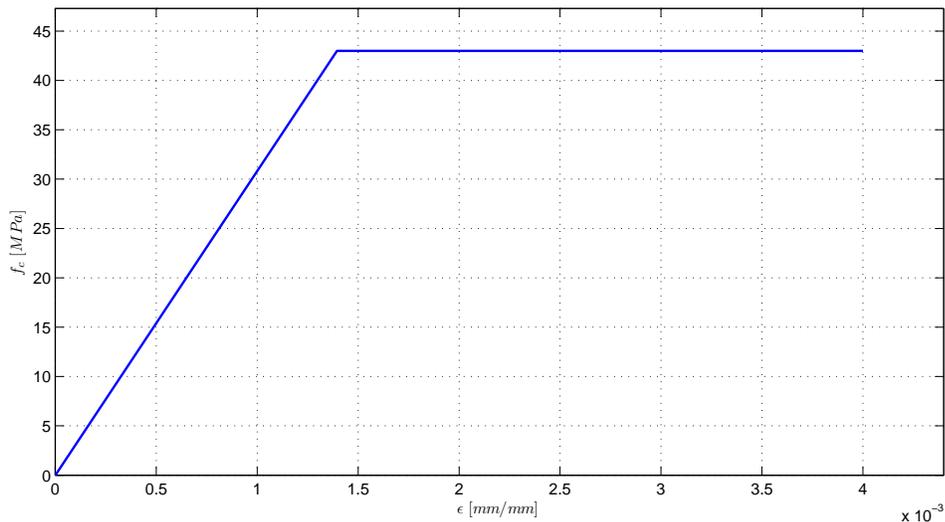


Figura 3.2: Ley constitutiva del grout de nivelación, modelos llaves doble T

3.2.2. Acero

Para los elementos de acero modelados se decide trabajar con los parámetros utilizados en los trabajos anteriores (Núñez, 2014; Ramaciotti, 2014), dado que de acuerdo al análisis realizado los valores seleccionados son los que mejor reproducen el comportamiento global de los sistemas analizados experimentalmente. En base a lo anterior, se trabaja con las propiedades del acero A36, indicadas en la tabla 3.3, sin endurecimiento.

Tabla 3.3: Propiedades acero A36

Modelo	$\rho[kg/m^3]$	ν	$f_y[MPa]$	$E[MPa]$	$\varepsilon_u[mm/mm]$
Llaves en cruz	7850	0.3	317	200000	0.3
Llaves doble T	7850	0.3	335	200000	0.3

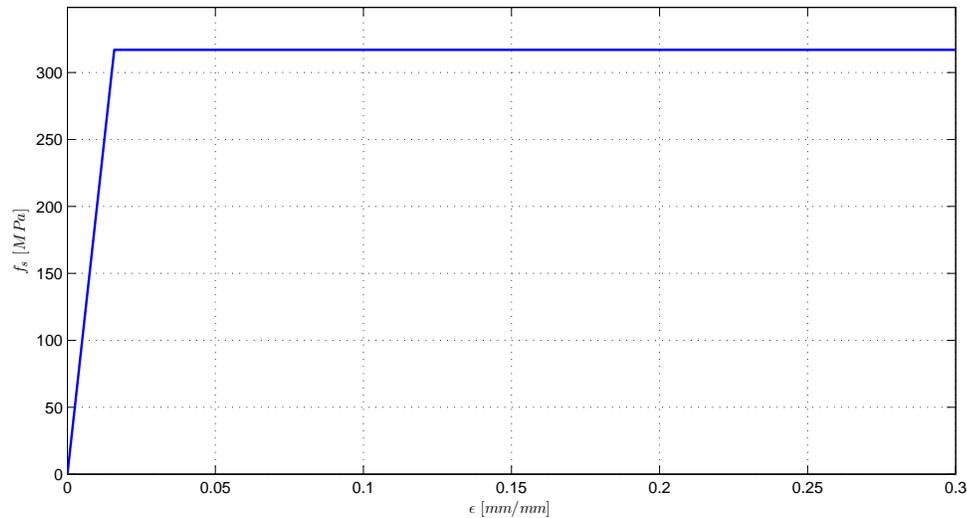


Figura 3.3: Ley constitutiva del acero, modelo llave N° 1, geometría en cruz

3.3. Factor de fricción

De los tipos de contacto presentes entre los componentes de los modelos, aquellos que poseen una mayor relevancia en la respuesta global de los modelos corresponden a los contactos friccionales entre el grout de nivelación y los elementos de acero (Núñez, 2014).

Debido a que no se realizan modificaciones a las propiedades de dichos materiales, se trabaja con el factor de fricción calibrado en los trabajos anteriores (Núñez, 2014; Ramaciotti, 2014), donde se concluye que el valor que mejor representa el comportamiento de los ensayos corresponde a $\mu = 0,15$.

3.4. Modelamiento del bloque de hormigón

Para considerar los efectos de aplastamiento, agrietamiento y plasticidad, entre otros, se modifica el tipo de elemento finito utilizado para la modelación del hormigón, reemplazándolo por SOLID65, permitiendo el agrietamiento y aplastamiento. De esta manera, se busca obtener una mejor representación del comportamiento del bloque respecto al del modelo simplificado empleado anteriormente (Núñez, 2014; Ramaciotti, 2014).

Dado que existen problemas de convergencia al modificar el tipo de elemento finito utilizado, se considera también un análisis con el hormigón modelado con SOLID65, pero sin capacidad de aplastamiento. Bajo esta condición, en general, no se tienen problemas de convergencia.

Además, para el caso con aplastamiento, se considera la inclusión de las barras de refuerzo para mejorar el comportamiento del hormigón. No obstante, la armadura no se modela como tal, sino que se incluye como una cuantía, mediante las propiedades del elemento SOLID65 (*Smearred Reinforcement*).

Para el rango de modelación considerado, se detallan a continuación las modificaciones realizadas a los modelos, y se comparan los resultados del caso monotónico con los obtenidos en los estudios previos.

3.4.1. Supuestos y restricciones (ANSYS, 2009)

Se detallan a continuación algunos de los supuestos considerados en la definición del tipo de elemento finito a emplear (SOLID65).

- El agrietamiento puede ocurrir en tres direcciones ortogonales, en cada punto de integración.
- Si se presenta una grieta en un punto de integración, esta es modelada como una banda distribuida de grietas, en vez de considerar una distribución discreta de éstas.
- El material se asume inicialmente isotrópico.
- En cualquier momento en que se emplee la resistencia de los elementos de refuerzo, estos se asumen distribuidos a través del elemento.
- Además del agrietamiento y aplastamiento, el hormigón puede también estar sometido a deformaciones plásticas, siendo el criterio de falla de la superficie de Drucker-Prager el que se utiliza comúnmente. En este caso, la plasticidad ocurre antes de que se verifique el agrietamiento y el aplastamiento.

3.4.2. Propiedades mecánicas

Aún cuando se modifica el tipo de elemento finito empleado, se mantienen las propiedades mecánicas empleadas en los modelos previos. La tabla 3.4 muestra las resistencias del hormigón según el modelo analizado (Núñez, 2014; Ramaciotti, 2014).

Tabla 3.4: Propiedades hormigón (Núñez, 2014; Ramaciotti, 2014)

Geometría	Llave	ρ [kg/m ³]	ν	f'_c [MPa]	E [MPa]	f_r [MPa]
Cruz	N°1	2500	0.2	33.79	27405	3.6
	N°4	2500	0.2	25.42	23965	3.2
	N°6	2500	0.2	25.42	23965	3.2
Doble T, eje débil	N°1	2500	0.2	25.5	23733.8	3.13
	N°7	2500	0.2	23.8	22929.1	3.02
	N°8	2500	0.2	23.8	22929.1	3.02
Doble T, eje fuerte	N°1	2500	0.2	24.4	23216.3	3.06
	N°7	2500	0.2	23.4	22784.1	3.0
	N°8	2500	0.2	23.4	22784.1	3.0

A partir del análisis de los modelos de llaves de corte con geometría en cruz se concluye que una curva esfuerzo-deformación con un comportamiento elastoplástico perfecto reproduce de buena manera el comportamiento de los sistemas (Núñez, 2014).

Por otro lado, en el estudio de llaves de corte con geometría en doble T se opta por trabajar con curvas parabólicas para definir el comportamiento del material (modelo de Hognestad). No obstante, se observa que la diferencia entre considerar curvas bilineales y parabólicas resulta poco significativa respecto al comportamiento global.

En el presente estudio se tiene que al considerar los efectos de agrietamiento por tracción y aplastamiento por compresión el tiempo de cálculo y las posibilidades de no convergencia en los modelos aumentan considerablemente. Dado lo anterior, se opta por emplear curvas bilineales en la definición del comportamiento elástico y plástico del hormigón, con el fin de reducir el número de iteraciones a realizar. La figura 3.4 muestra una curva tipo empleada para modelar el comportamiento del hormigón.

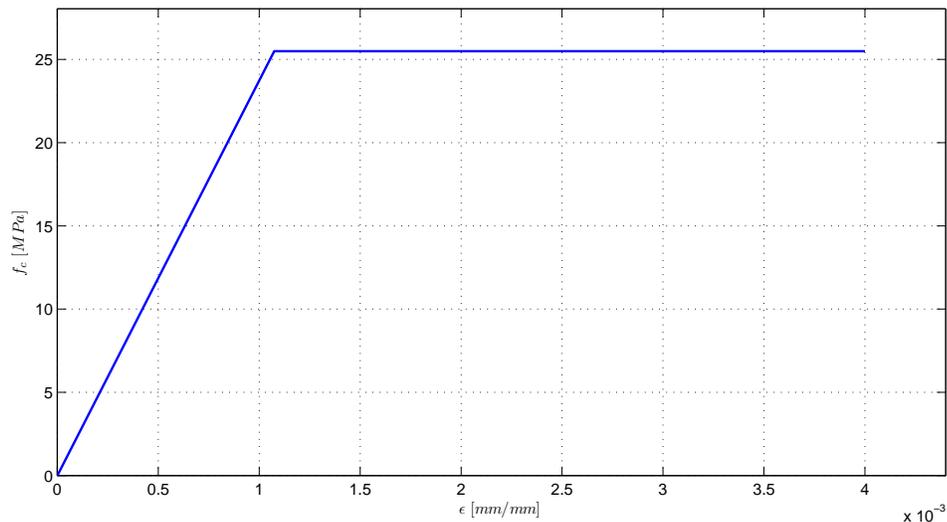


Figura 3.4: Ley constitutiva del hormigón, Llave N°1 cargada en el eje débil

3.4.3. Modelamiento de barras de refuerzo a tracción

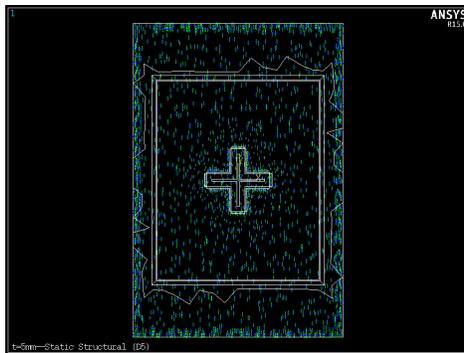
Dado que se busca representar de mejor manera el comportamiento de los materiales frágiles en el modelo, se añaden las barras de refuerzo en el bloque de hormigón. No obstante, debido a la alta complejidad que los modelos ya poseen (en términos de número y tipos de materiales y elementos) se desecha la opción de modelar las barras en sí, ya que se incrementaría el número total de elementos finitos y los contactos entre éstos.

Tomando en consideración lo anterior, se opta por modelar el refuerzo utilizando las propiedades del tipo de elemento SOLID65, tal como se detalla en la sección 2.2.1. Las cuantías de refuerzo se determinan en base a las armaduras utilizadas experimentalmente, y se aplican a todos los elementos del bloque de hormigón. La figura 3.5 muestra gráficamente la distribución de las barras de refuerzo, donde las líneas rojas representan la dirección con mayor cuantía, siguiendo con las líneas verdes y las azules, que representan la menor.

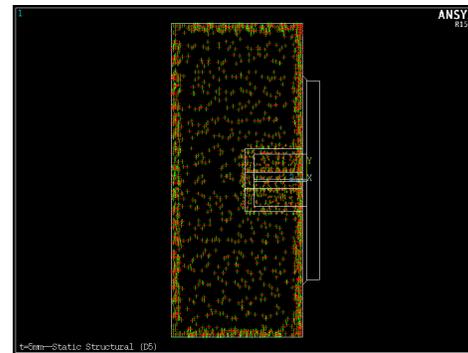
La tabla 3.5 detalla las propiedades del acero A630-420H, las que se asignan a las barras de refuerzo.

Tabla 3.5: Propiedades barras de refuerzo

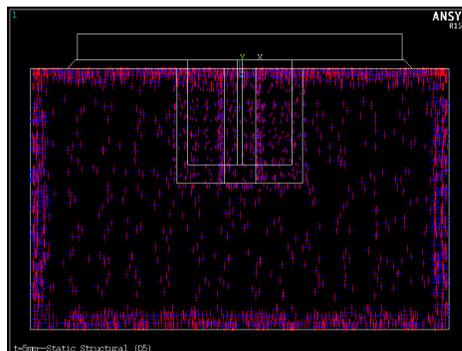
$\rho[kg/m^3]$	ν	$f_y[MPa]$	$E[MPa]$
7850	0.29	420	210000



(a) Plano XY



(b) Plano YZ



(c) Plano XZ

Figura 3.5: Distribución del refuerzo en el bloque de hormigón

3.4.4. Mallado

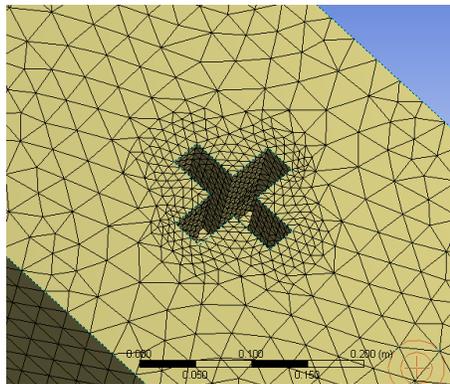
Debido a la modificación realizada al tipo del elemento finito en el bloque de hormigón la cantidad de iteraciones realizadas por el programa aumenta, complejizando los modelos en términos de tiempo de cálculo y convergencia de los mismos. Debido a esto se decide modificar el mallado del bloque de hormigón.

En los modelos anteriores (Núñez, 2014; Ramaciotti, 2014) se decidió aumentar el número de elementos en la vecindad de la casilla donde se inserta la llave de corte, con el fin de obtener una mayor precisión en las zonas donde las tensiones varían en mayor medida. Para ello se trabajó con el parámetro *Refinement*, donde se permite escoger entre tres niveles de refinamiento. Dicho parámetro se estableció en un nivel 2.

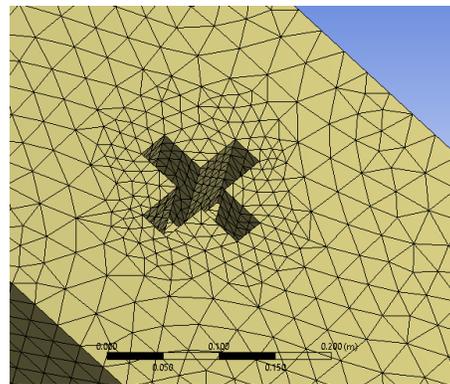
Dado que con tal nivel de refinamiento no se logra la convergencia de los modelos con SOLID65, se rebaja el refinamiento al nivel 1, reduciendo de esta manera la cantidad de nodos y elementos en el modelo, y por ende el tiempo de cálculo. La tabla 3.6 detalla la variación del número de nodos y elementos al modificar el refinamiento. Además, la figura 3.6 muestra gráficamente la modificación realizada al mallado.

Tabla 3.6: Número de nodos y elementos

Modelo		Refinamiento = 2		Refinamiento = 1	
		N° Nodos	N° Elementos	N° Nodos	N° Elementos
Cruz	Llave N°1	25994	73561	19414	37897
	Llave N°4	14301	48998	11889	36298
	Llave N°6	14963	50563	11480	33597
Doble T Eje Débil	Llave N°1	18803	69145	15886	54022
	Llave N°7	22761	85236	17982	60182
	Llave N°8	23158	87155	18286	61629
Doble T Eje Fuerte	Llave N°1	16458	58636	13449	42938
	Llave N°7	21694	82694	17115	58569
	Llave N°8	37619	91831	33238	68918



(a) Refinamiento = 2



(b) Refinamiento = 1

Figura 3.6: Modificación al refinamiento en la zona casilla

3.4.5. Calibración de factores de transferencia de corte en grietas

Dentro de las opciones disponibles para el elemento SOLID65 se encuentran los factores de transferencia de corte, relevantes al presentarse agrietamiento en el hormigón, de acuerdo a lo detallado en la sección 2.2.2.

Considerando la transferencia de corte en grietas cerradas, se opta por emplear el máximo valor posible del factor β_c . De esta manera, el análisis puede considerarse conservador. Además, se observa que disminuyen los tiempos de cálculo en el software.

Para el factor de transferencia de corte en grietas abiertas β_t , en tanto, se decide evaluar el efecto de este parámetro en el comportamiento global del sistema estructural. La figura 3.7 muestra la curva carga-desplazamiento obtenida para cada valor de β_t , para la llave N°1 en cruz.

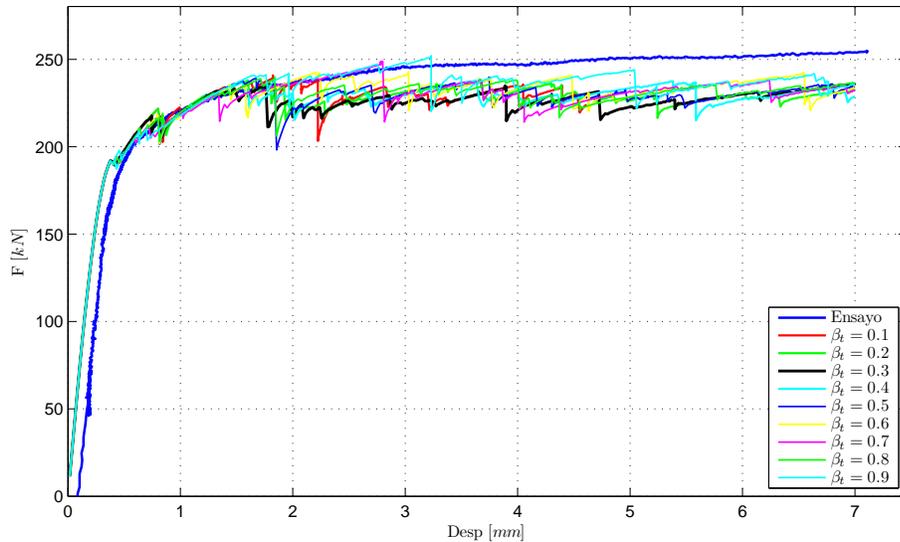


Figura 3.7: Calibración factor de transferencia de corte en grietas abiertas β_t

Como se puede apreciar en el gráfico anterior, el valor del coeficiente β_t no incide significativamente en el comportamiento global del sistema. Las variaciones corresponden a distintos instantes en que ocurre falla de elementos por aplastamiento. No obstante, se observa que a valores más altos se tiene en general una convergencia para menos iteraciones, aunque esto es poco relevante para valores mayores al 50 %.

A pesar de esto, se decide optar por un valor lo más bajo posible, para no disminuir las posibles modificaciones de la respuesta en el caso cíclico, como el pinching que resulta típico en hormigones sometidos a este tipo de solicitaciones. Así, se trabaja con los valores indicados en la tabla 3.7.

Tabla 3.7: Factores de transferencia de corte

Factor	Valor
Grieta cerrada (β_c)	0.9
Grieta abierta (β_t)	0.3

3.4.6. Modificación de propiedades del hormigón

De acuerdo a lo observado durante la ejecución de los análisis cíclicos, la principal causa de problemas de convergencia corresponde a la penetración entre elementos, desarrollada especialmente durante los primeros ciclos de carga.

Debido a esto, se decide incrementar porcentualmente el valor de la resistencia uniaxial a la compresión del hormigón, buscando mejorar el desempeño de los modelos. El criterio de elección del factor de amplificación se realizó iterativamente, buscando el menor valor que permita alcanzar una cantidad razonable de ciclos completos para modelos de la misma geometría y condiciones de carga.

Los factores de amplificación utilizados se detallan en la tabla 3.8.

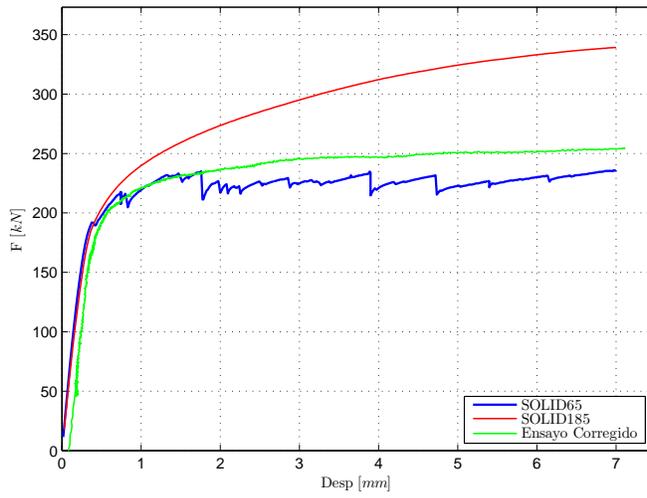
Tabla 3.8: Factor de amplificación de resistencia a la compresión

Modelo		Factor de amplificación [%]
Cruz	Llave N°1	30
	Llave N°4	30
	Llave N°6	30
Doble T Eje Débil	Llave N°1	35
	Llave N°7	35
	Llave N°8	35
Doble T Eje Fuerte	Llave N°1	—
	Llave N°7	—
	Llave N°8	30

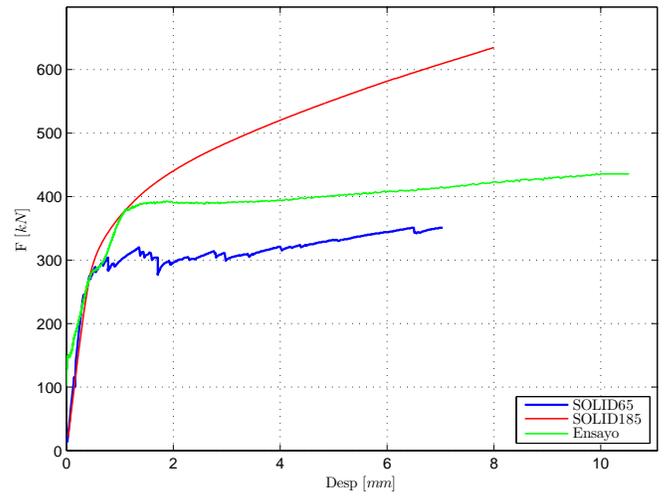
3.5. Curvas calibradas

De acuerdo a las modificaciones realizadas a los modelos, descritas en los apartados anteriores, se obtienen las curvas de carga-desplazamiento que permiten caracterizar el comportamiento global de los sistemas estructurales.

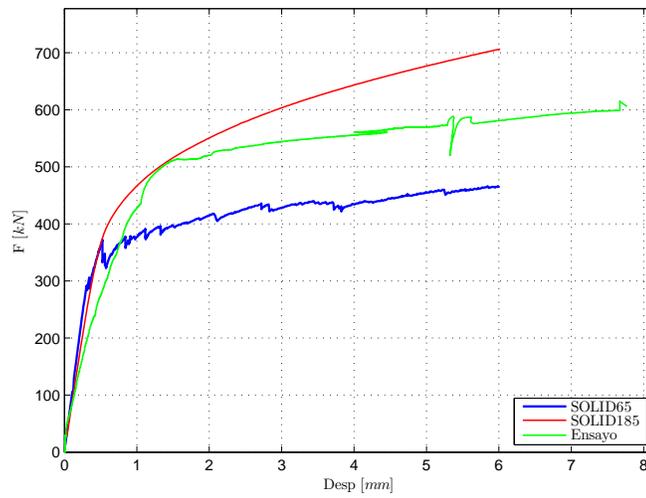
Las figuras 3.8, 3.9 y 3.10 muestran las curvas obtenidas a partir de los modelos modificados, los modelos originales y la respuesta obtenida experimentalmente, hasta el máximo desplazamiento alcanzado.



(a) Llave N°1

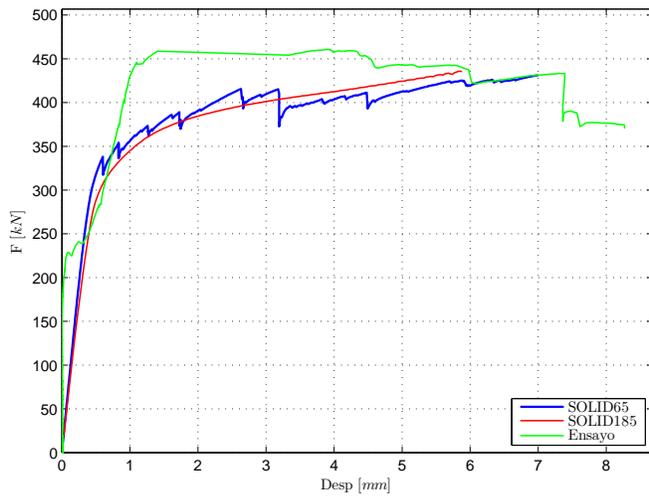


(b) Llave N°4

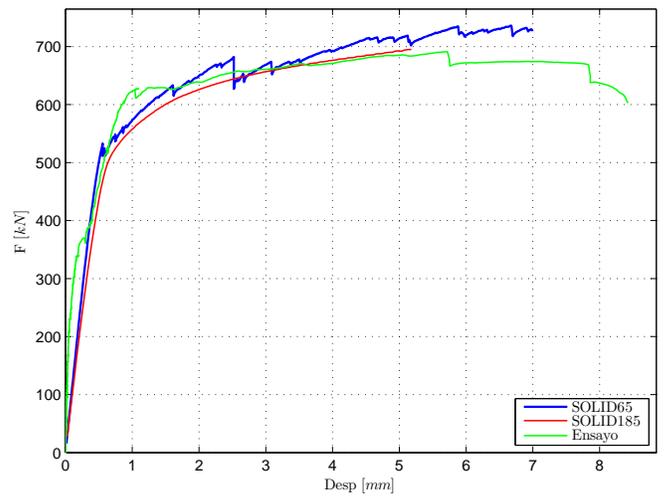


(c) Llave N°6

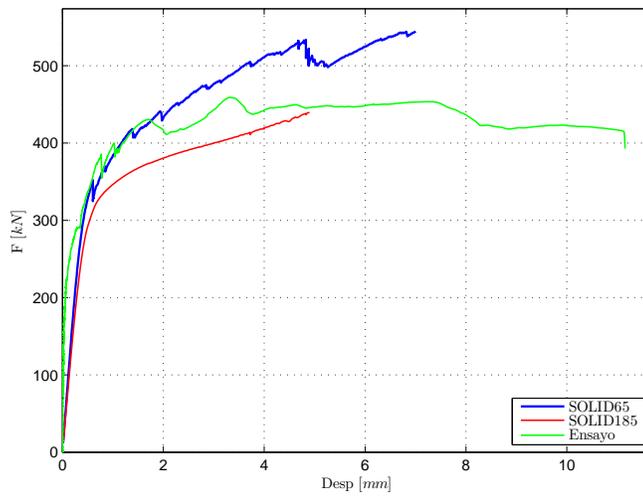
Figura 3.8: Carga vs desplazamiento, llaves con geometría en cruz



(a) Llave N°1

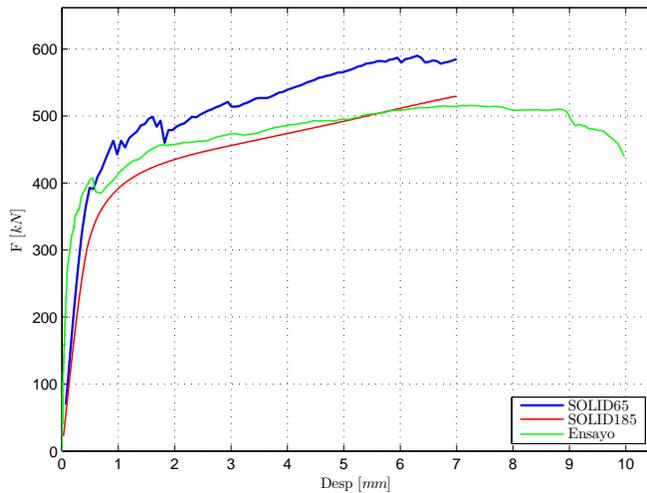


(b) Llave N°7

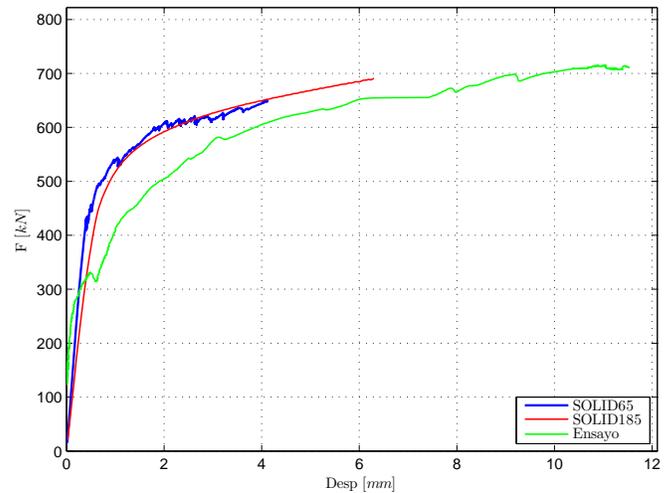


(c) Llave N°8

Figura 3.9: Carga vs desplazamiento, llaves con geometría en doble T, cargadas según el eje débil



(a) Llave N°1



(b) Llave N°8

Figura 3.10: Carga vs desplazamiento, llaves con geometría en doble T, cargadas según el eje fuerte

Para las llaves de corte en cruz, se observa en general una buena aproximación para las curvas en el rango elástico, siendo consistente además, con la pendiente obtenida para el modelo elastoplástico del hormigón. En tanto, para el rango plástico se tiene que si bien la carga resistida por el modelo resulta menor a la observada experimentalmente, existe una buena representación del comportamiento obtenido en los ensayos.

Por lo demás, debe considerarse que al no incluir los pernos de anclaje disminuyen las zonas comprimidas en el bloque de hormigón, y al existir fallas por aplastamiento y agrietamiento, se tiene una merma en la carga máxima que el bloque es capaz de resistir.

En las llaves tipo Doble T cargadas en el eje débil, en cambio, se tiene una buena representación para las llaves N°1 y N°7. En la llave N°8 se tiene una sobrerresistencia respecto a las curvas experimentales y del modelo elastoplástico, y además la pendiente de la curva en este tramo difiere de la evidencia experimental.

Las llaves en doble T cargadas en el eje fuerte presentan también una sobrerresistencia con respecto a la evidencia experimental. No obstante, existe una buena representación cualitativa de la respuesta.

A pesar de lo anterior, los máximos desplazamientos alcanzados en los modelos de doble T resultan del orden de $2[mm]$, con lo que se considera que las curvas calibradas representan satisfactoriamente el comportamiento de los sistemas estructurales, al menos en estos rangos de desplazamiento.

Cabe destacar que, durante el desarrollo de este trabajo, no se logra obtener resultados satisfactorios para el modelo de la llave N°7 de doble T, cargada en el eje fuerte, en el caso monotónico.

Capítulo 4

Análisis y comparación de resultados

En este capítulo se analiza el comportamiento de los modelos calibrados en la sección anterior, pero siendo sometidos ahora a un historial de desplazamientos de tipo cíclico.

Se expone primeramente el criterio adoptado para la selección del comportamiento cíclico a modelar. Luego, se analiza el comportamiento de los sistemas en forma global y local.

Para la caracterización global, se estudian las curvas $F - d$ y $M - d$, donde F corresponde a las fuerzas axiales medidas en los apoyos, M al momento medido en la unión entre la placa y la llave, y d a desplazamiento de la placa base. Además, se estudian las variaciones de rigidez y resistencia experimentadas, y se comparan los resultados obtenidos con las capacidades nominales de los elementos. Localmente, se analizan por separado el comportamiento de los elementos que componen los sistemas, prestando especial atención a los estados tensionales y deformaciones de las llaves y del bloque de hormigón.

Cabe destacar que los resultados se presentan por elemento analizado, y por tipo de llave de corte modelada.

Posteriormente, se estudia la variación global de la respuesta de los sistemas a lo largo del historial cíclico de desplazamientos. Una parte del análisis se centra en la degradación de la respuesta, cuantificando las posibles disminuciones de la resistencia y analizando porcentualmente la degradación de la rigidez de los sistemas.

Finalmente, se analiza la capacidad de disipación de energía del sistema estructural, estudiando la variación de los aros de histéresis y cuantificando las áreas contenidas en éstos.

4.1. Historia de desplazamientos

Dada la falta de resultados experimentales de llaves de corte sometidas a cargas cíclicas, se toman como referencia estudios de similares características aplicados a elementos de acero estructural.

En base a lo anterior, para la definición del patrón de desplazamientos cíclicos en el modelo, se aplican las disposiciones especificadas en la guía *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings* (AISC, 2010), en lo referente a los ensayos cíclicos de elementos con pandeo restringido.

Según la guía, el historial de desplazamientos aplicado depende de algunos términos, definidos por:

- Δ_b : Cantidad de deformación usada para controlar las cargas aplicadas a la probeta en el ensayo.
- Δ_{by} : Valor de la deformación (Δ_b), a la primera fluencia del elemento.
- Δ_{bm} : Valor de la deformación (Δ_b), correspondiente al desplazamiento entre pisos de diseño.

Dado que este último término no aplica al estudio realizado, Δ_{bm} se considera como diez veces la deformación de fluencia (Δ_{by}), en consideración de las deformaciones aplicadas en los modelos monotónicos (Núñez, 2014; Ramaciotti, 2014).

En base a las variables definidas anteriormente, el historial de desplazamientos aplicado al modelo queda definido por la siguiente secuencia:

1. Dos ciclos de carga a una deformación correspondiente a $\Delta_b = \Delta_{by}$
2. Dos ciclos de carga a una deformación correspondiente a $\Delta_b = 0,5 \cdot \Delta_{bm}$
3. Dos ciclos de carga a una deformación correspondiente a $\Delta_b = 1,0 \cdot \Delta_{bm}$
4. Dos ciclos de carga a una deformación correspondiente a $\Delta_b = 1,5 \cdot \Delta_{bm}$
5. Dos ciclos de carga a una deformación correspondiente a $\Delta_b = 2,0 \cdot \Delta_{bm}$
6. Ciclos adicionales de carga a una deformación $\Delta_b = 1,5 \cdot \Delta_{bm}$, hasta que el elemento alcance una deformación inelástica acumulada de a lo menos 200 veces la deformación de fluencia (Δ_{by}).

No obstante el modelo de carga recién definido, cabe destacar que el número de ciclos a aplicar queda supeditado a la capacidad de convergencia de los modelos analizados. Esta condición es explicitada en el análisis posterior, para cada modelo por separado.

La figura 4.1 muestra gráficamente el comportamiento cíclico y creciente del protocolo de carga definido recientemente.

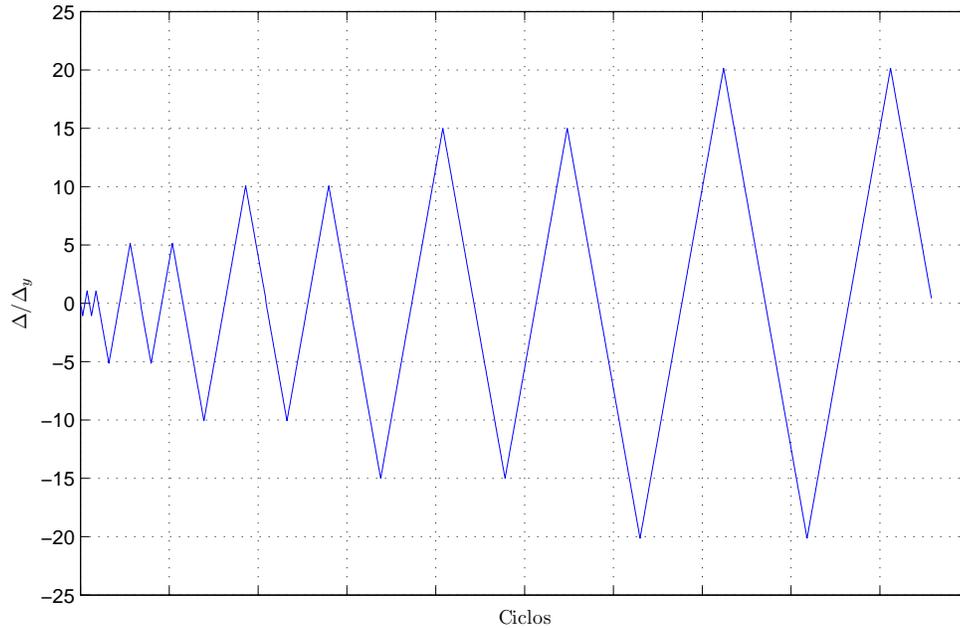


Figura 4.1: Protocolo de carga empleado en la modelación

4.2. Llaves de corte en cruz

Se presentan a continuación los resultados obtenidos para los modelos de llave de corte con geometría en cruz.

En una primera parte, se estudia el comportamiento global de los sistemas, analizando tanto los esfuerzos en el apoyo de la fundación como la reacción de momento entre la llave y la placa base.

Luego, se discute el comportamiento tensional de los elementos por separado, analizando su evolución según el protocolo de carga e identificando posibles condiciones de falla.

4.2.1. Respuesta global del sistema estructural

Para describir el comportamiento global del sistema estructural se utilizan las curvas carga-desplazamiento, cuya calibración se describe en el capítulo 3.5. Cabe destacar que en los modelos esta fuerza F_m corresponde a la reacción en el apoyo empotrado y el desplazamiento es medido en la cara lateral de la placa base. En los ensayos en tanto, dicha carga corresponde a la mitad de la fuerza aplicada mediante una pieza rígida, y el desplazamiento es medido en una cara lateral de la placa base.

No obstante su definición sea distinta, es importante destacar que estos conceptos representan el mismo fenómeno, correspondiente a la fuerza cortante que resiste el sistema. Lo anterior, funciona bajo el supuesto de una distribución equitativa en ambas llaves de corte ensayadas.

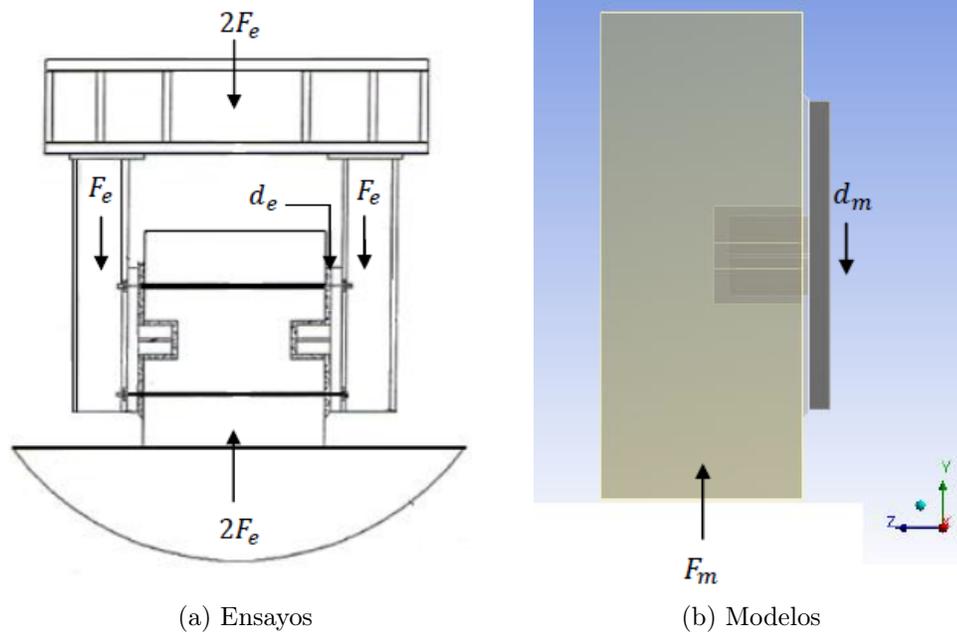


Figura 4.2: Fuerza y desplazamiento (Núñez, 2014)

Además, dado que en los modelos es posible obtener la reacción de momento en la unión entre la llave de corte y la placa base, se analiza también el comportamiento a flexión de dicha conexión.

Corte

Las figuras 4.3, 4.4 y 4.5 muestran las curvas carga-desplazamiento de los casos monotónico y cíclico, para las llaves en cruz.

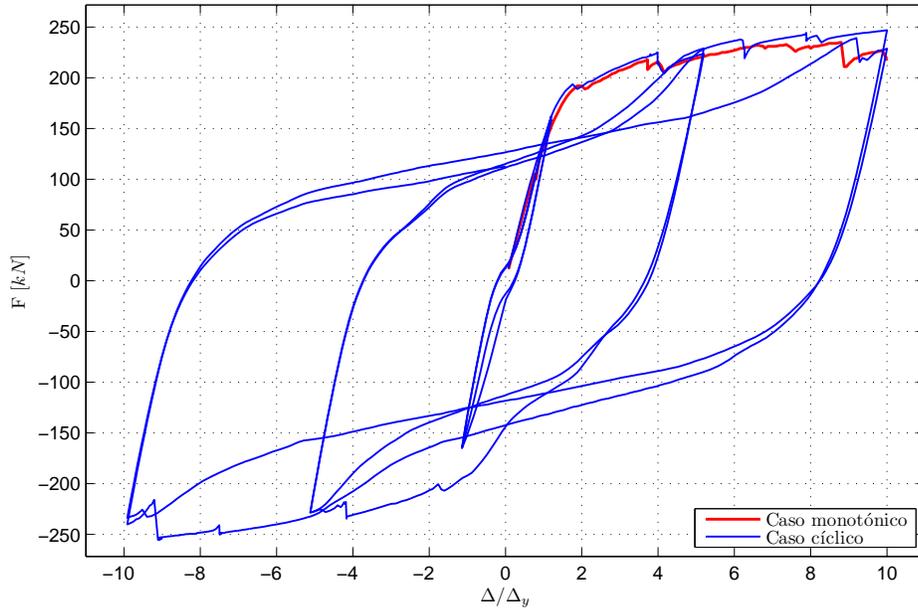


Figura 4.3: Carga vs desplazamiento, Llave N° 1

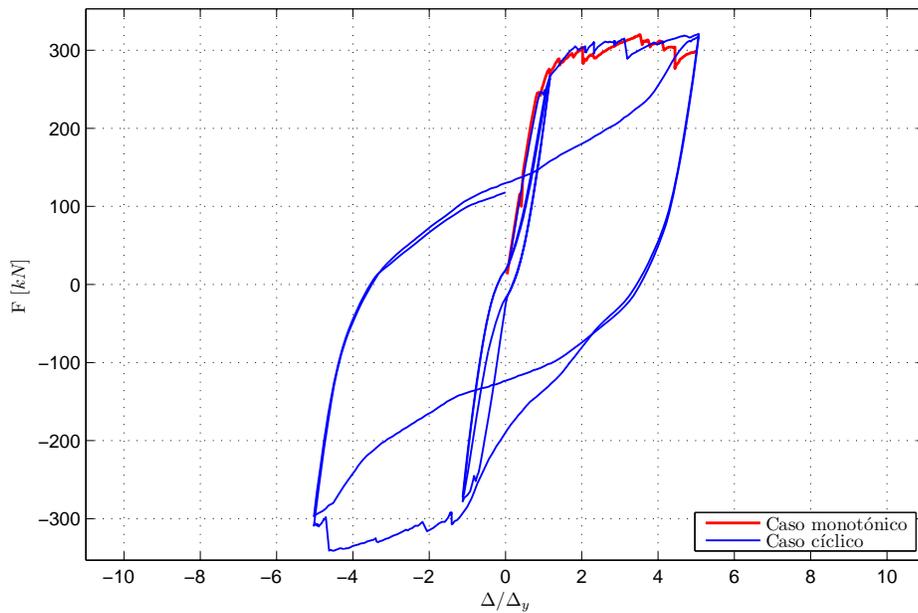


Figura 4.4: Carga vs desplazamiento, Llave N° 4

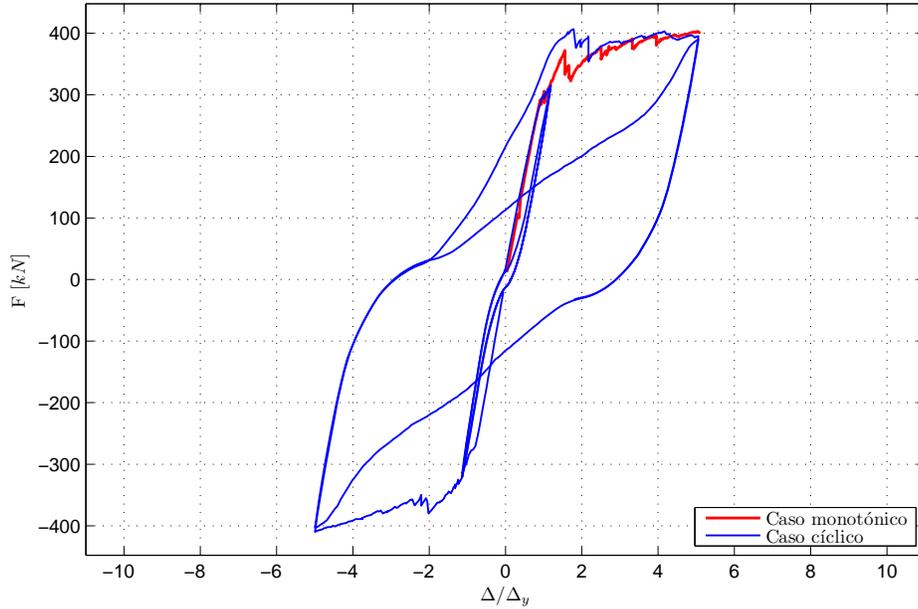


Figura 4.5: Carga vs desplazamiento, Llave N°6

Los gráficos anteriores denotan el número de ciclos que los modelos son capaces de completar antes de que se presenten problemas de convergencia. De esta manera, el modelo de la llave N°1 logra completar seis ciclos. Por otro lado, las llaves N°4 y N°6 completan solamente cuatro ciclos de amplitudes d_y y $5d_y$.

Estas diferencias en el número de ciclos completos se explican por el mayor espesor de las últimas dos llaves, con lo que los desplazamientos a la primera fluencia resultan considerablemente mayores que en el primer caso. Por ende, el daño por aplastamiento en el hormigón (causa principal de los problemas de convergencia) resulta significativamente mayor.

En cuanto al comportamiento histéretico que se observa en los gráficos anteriores, se tiene que para los tres modelos estudiados existe una notoria variación en la rigidez para la fase de carga. Dicho comportamiento se presenta a partir del cuarto ciclo, correspondiente al segundo ciclo con amplitud de $5d_y$. Lo anterior obedece al efecto que produce el agrietamiento en las áreas traccionadas del bloque de hormigón, correspondientes a las inmediaciones de la zona casilla.

Luego, en la siguiente fase de carga, se tiene que el hormigón agrietado se encuentra limitado en su capacidad para tomar carga, siendo ésta resistida en su mayor parte por el grout y la llave. No obstante, a medida que el desplazamiento de la placa base aumenta, el cierre de las grietas generadas en el ciclo anterior conlleva a una rigidización parcial del hormigón, hasta llegar a la capacidad máxima que el sistema estructural es capaz de resistir. Una vez alcanzados estos niveles de carga, se observa una cierta estabilización de la resistencia, que se mantiene en base a la falla por aplastamiento de los elementos de hormigón.

Esta variación de la rigidez en la fase de carga resulta un poco más pronunciada para ciclos subsiguientes a la misma amplitud. Lo anterior puede explicarse por la acción conjunta de elementos con grietas abiertas y al mayor número de elementos aplastados respecto al ciclo inmediatamente anterior. Además, al observar la figura 4.3 se tiene una evidente variación de la rigidez al aumentar la amplitud entre ciclos.

Para la fase de descarga, en tanto, se tiene que la rigidez permanece relativamente constante y presenta un comportamiento muy similar al observado en los primeros ciclos, correspondientes al rango elástico de deformaciones en la llave. Dicho comportamiento se mantiene hasta que la carga se acerca a cero, momento a partir del cual el fenómeno descrito previamente se presenta en la zona negativa de la curva de histéresis.

Cabe destacar que en las figuras anteriores se observa una simetría entre las ramas positivas y negativas de los ciclos. No obstante, se tiene un mayor angostamiento de la curva en los tramos negativos del ciclo (llaves N°4 y N°6).

Otro aspecto interesante a observar en las figuras anteriores consiste en un ligero aumento de la resistencia en las curvas cíclicas, respecto del comportamiento monótonico. Una posible explicación a este comportamiento es que al cerrarse gradualmente las grietas se produce un reacondicionamiento de los elementos de hormigón.

Flexión

Las siguientes figuras muestran la reacción de momento que se genera en la unión llave - placa base y su evolución a lo largo de los ciclos de desplazamiento.

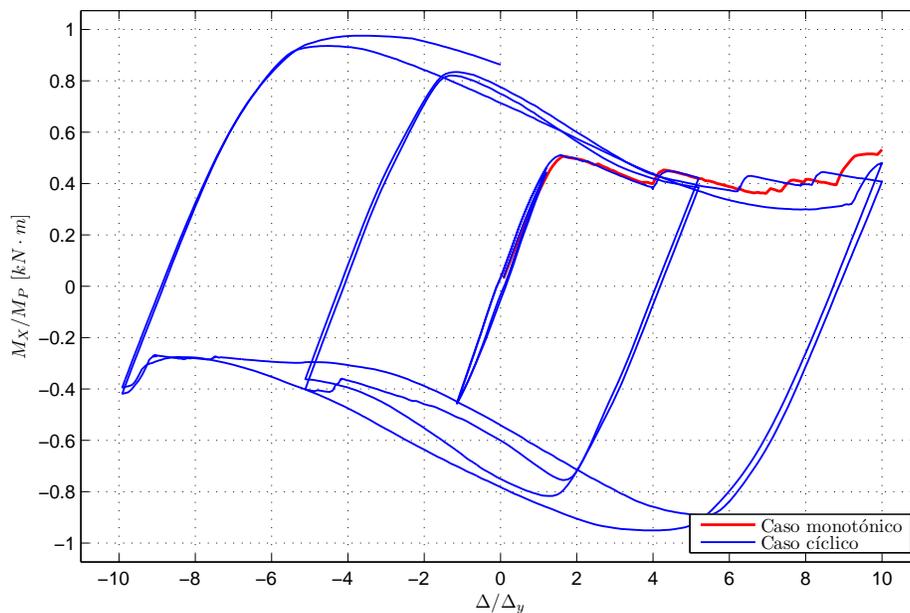


Figura 4.6: Momento vs desplazamiento, Llave N°1

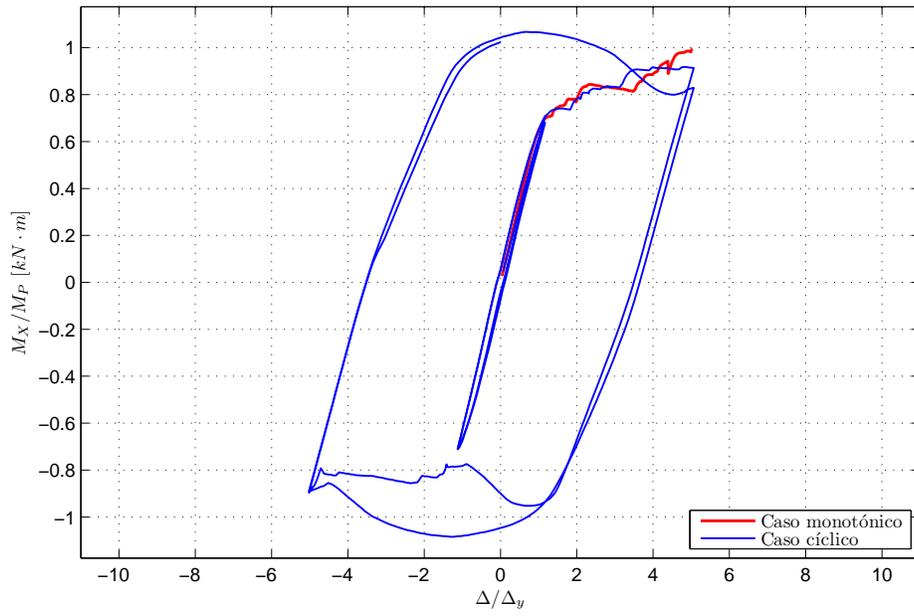


Figura 4.7: Momento vs desplazamiento, Llave N° 4

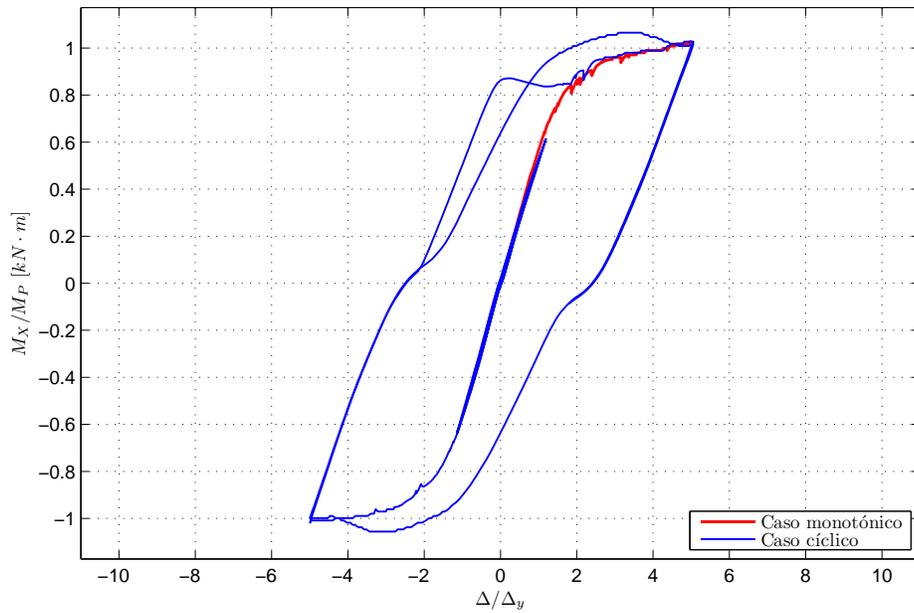


Figura 4.8: Momento vs desplazamiento, Llave N° 6

Del análisis de las figuras anteriores se desprende que al considerar un análisis cíclico, la sollicitación de flexión en la conexión placa - llave adquiere mayor importancia que en lo reportado para el caso monotónico (Núñez, 2014; Ramaciotti, 2014). En efecto, en las tres llaves analizadas se alcanzan valores muy cercanos al momento de plastificación, como en la llave N°1, o valores por sobre éste, como en las dos llaves de mayor espesor.

Al contrastar el comportamiento de las curvas para desplazamientos a una misma amplitud, se observa que en un comienzo la presencia de elementos de hormigón permiten reducir la demanda de flexión en la conexión. Gráficamente, el efecto puede apreciarse en las ramas de la curva donde se observan irregularidades en la misma. Posteriormente, una vez que los elementos solicitados fallan por aplastamiento, y por ende disminuye el aporte de los mismos a la resistencia, el acero se encarga de resistir completamente la sollicitación.

En cuanto a la diferencia de capacidad en ambos casos, se observa que las sollicitaciones máximas de flexión se alcanzan en los casos en que ya existe aplastamiento, mientras que el momento último para los desplazamientos alcanzados es mayor en la situación en que el hormigón está fallando debido a compresión.

Esta diferencia observada para el momento último, se explica por el aporte a la resistencia que entrega el hormigón que no se ha visto mayormente sollicitado por el nivel de desplazamiento de los ciclos previos.

Por otro lado, las curvas presentan un comportamiento casi simétrico para ambos sentidos de desplazamiento. Sumando a esto lo observado en las curvas fuerza - desplazamiento analizadas anteriormente, es de suponer que el perfil de deformaciones en el bloque, y por lo tanto la cantidad de material aplastado, se distribuya simétricamente en los sectores cercanos a la casilla.

4.2.2. Comportamiento llave de corte

En el siguiente apartado se estudian los estados de tensiones y deformaciones que experimentan las llaves modeladas, identificando los fenómenos que se asocian a los mecanismos de falla esperados en los elementos.

Tensiones de corte

Para evaluar la evolución de la fluencia en las llaves debido al esfuerzo de corte, se analizan las tensiones de corte en la dirección de desplazamiento, es decir, dirección según el eje Y en un plano normal al eje Z . Las figuras 4.9 a 4.11 muestran dichas tensiones en los instantes en que se alcanzan los valores peak de desplazamiento, según el historial cíclico. En los diagramas, las zonas en rojo corresponden a los sectores con tensiones positivas, mientras que en las zonas azules se tienen tensiones negativas, de acuerdo a los sentidos positivos de los ejes coordenados.

Al observar las tensiones alcanzadas en las llaves de corte se tiene que los valores máximos se alcanzan en la zona superior, donde está la unión entre la base de la llave con la placa

base. Además, para las llaves de menor espesor se tiene una plastificación completa de la sección transversal superior, donde se alcanza una tensión de $183[MPa]$, valor que coincide con la tensión de fluencia al corte, dada por la ecuación 2.7

La plastificación se inicia en la zona central de la llave, y se extiende hacia los extremos de las alas y en profundidad a lo largo de la llave. Dichas direcciones de propagación de tensiones, generan un perfil de plastificación cuasi parabólico en el plano YZ. Este efecto es menos notorio al aumentar el espesor de la llave, resultado esperable considerando el aumento en la resistencia que dicho parámetro induce, respecto de los desplazamientos máximos alcanzados.

Además, en las alas transversales al sentido de desplazamiento se observa una concentración de tensiones a partir de la profundidad en que está presente el bloque de hormigón.

Dadas las consideraciones anteriores, resulta evidente que la plastificación por corte tiene una importante participación en la falla de las llaves, lo que además concuerda con las conclusiones de las investigaciones previas (Núñez, 2014).

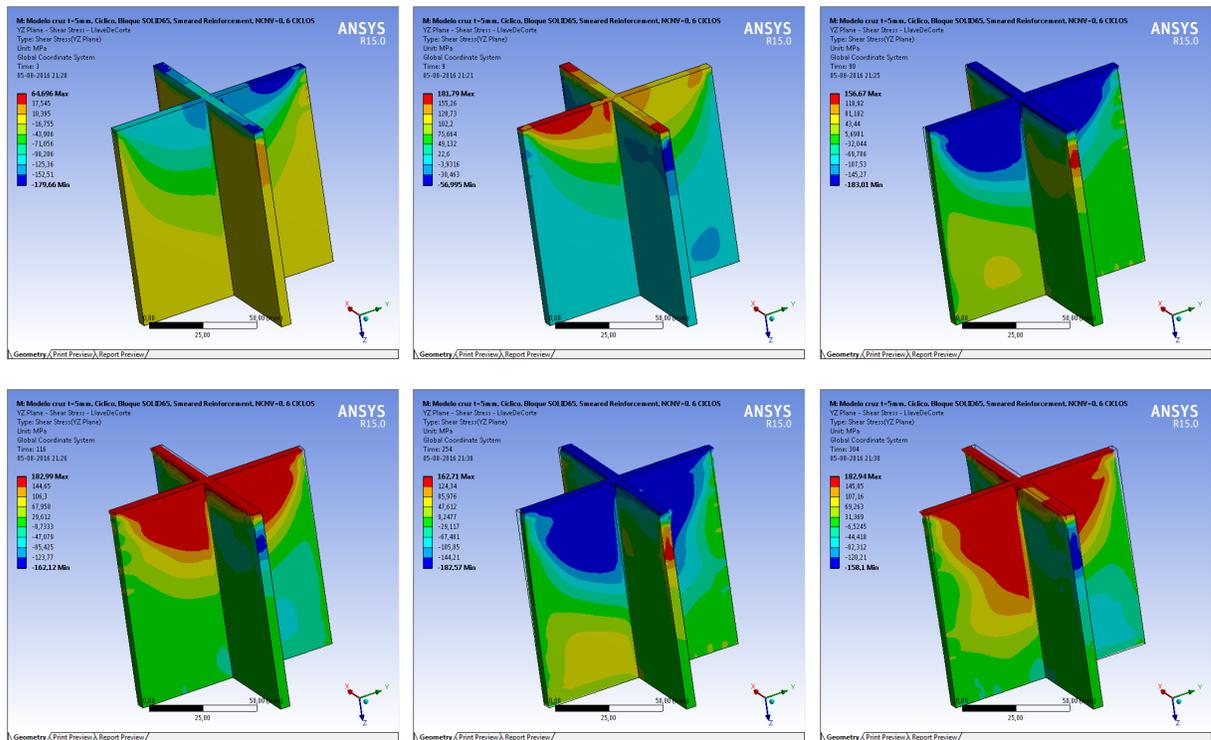


Figura 4.9: Evolución de las tensiones de corte τ_{YZ} , llave N° 1

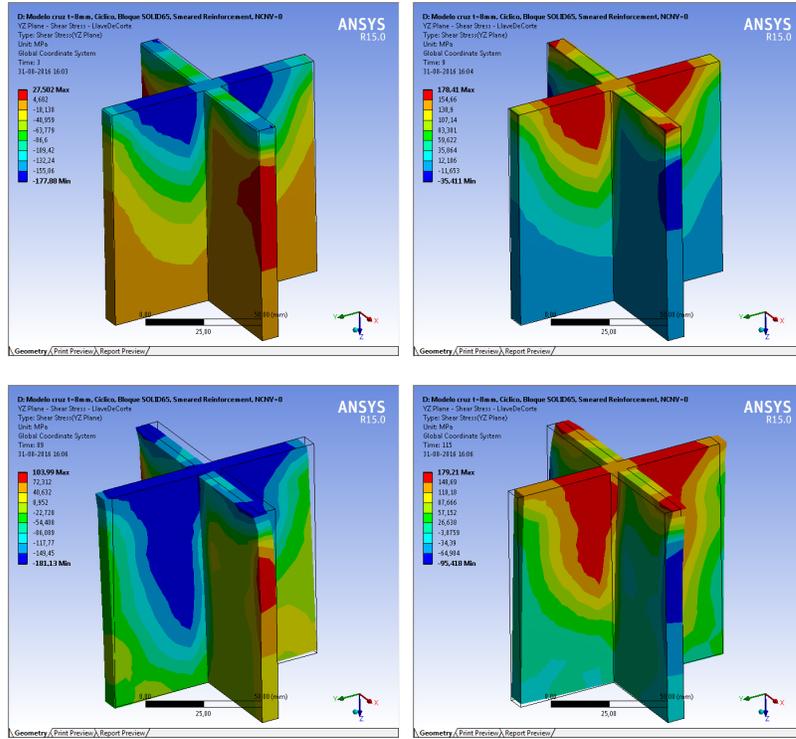


Figura 4.10: Evolución de las tensiones de corte τ_{yz} , llave N° 4

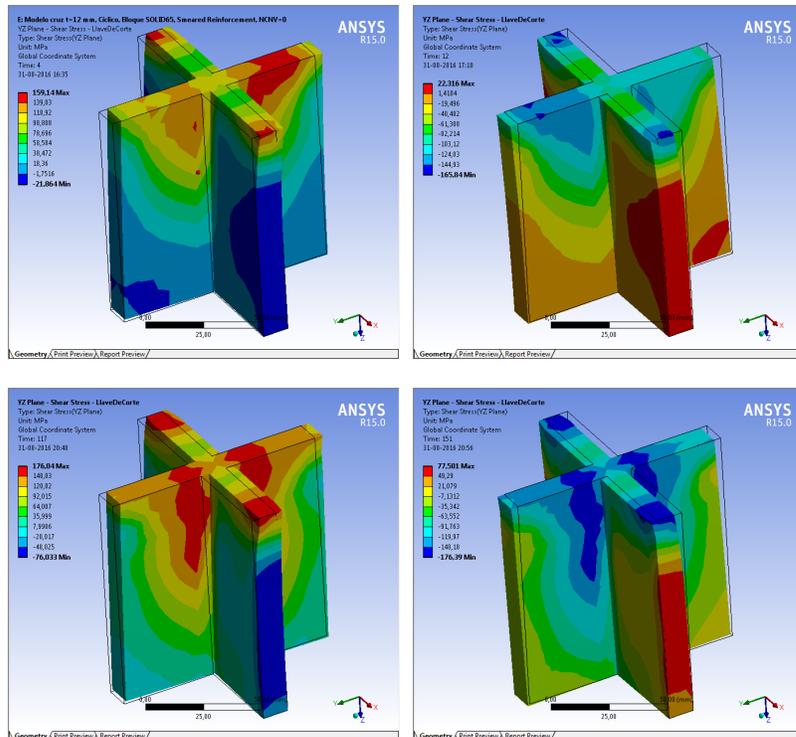


Figura 4.11: Evolución de las tensiones de corte τ_{yz} , llave N° 6

Tensiones normales

Para analizar la falla asociada a la fluencia por flexión de las llaves se analizan las tensiones normales en la dirección Z , ya que éstas determinan la flexión de la sección transversal.

Las figuras 4.12, 4.13 y 4.14 muestran las tensiones normales en el eje Z en los instantes de máxima sollicitación de momento. Para distinguir entre tensiones de compresión y tracción se presentan los resultados según la vista anterior y posterior de las llaves de corte.

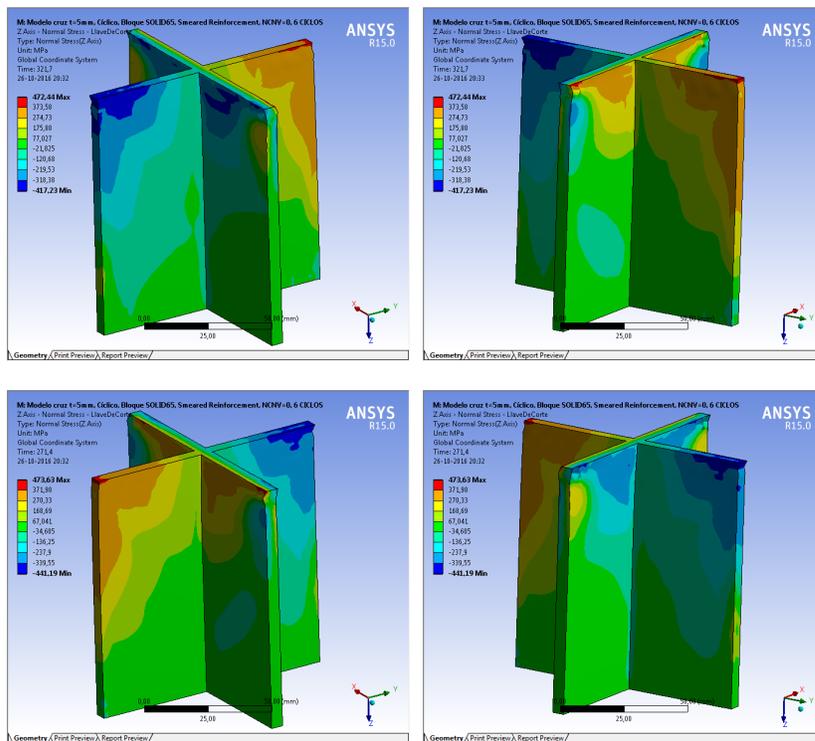


Figura 4.12: Tensión Normal eje Z , llave N° 1

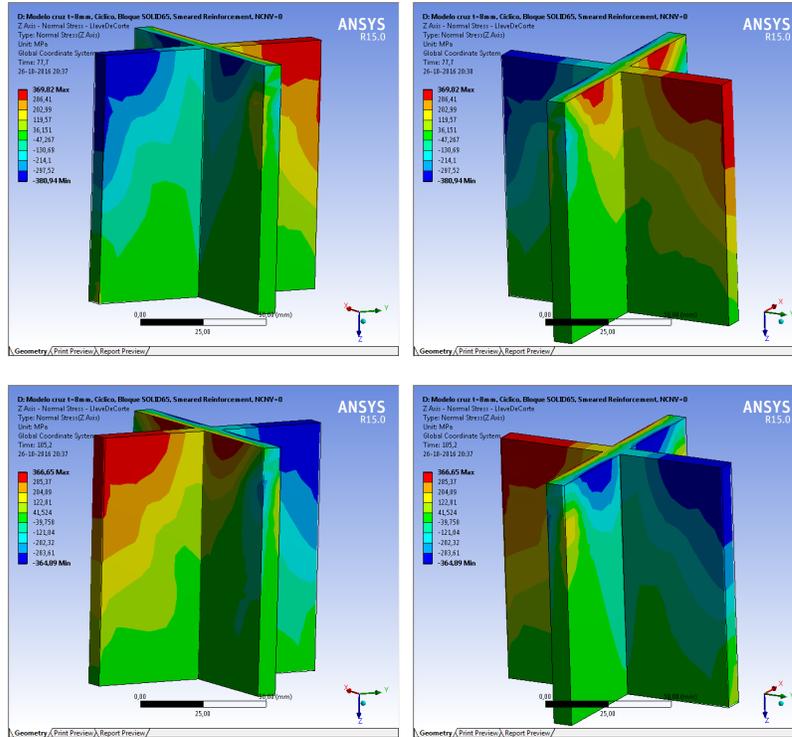
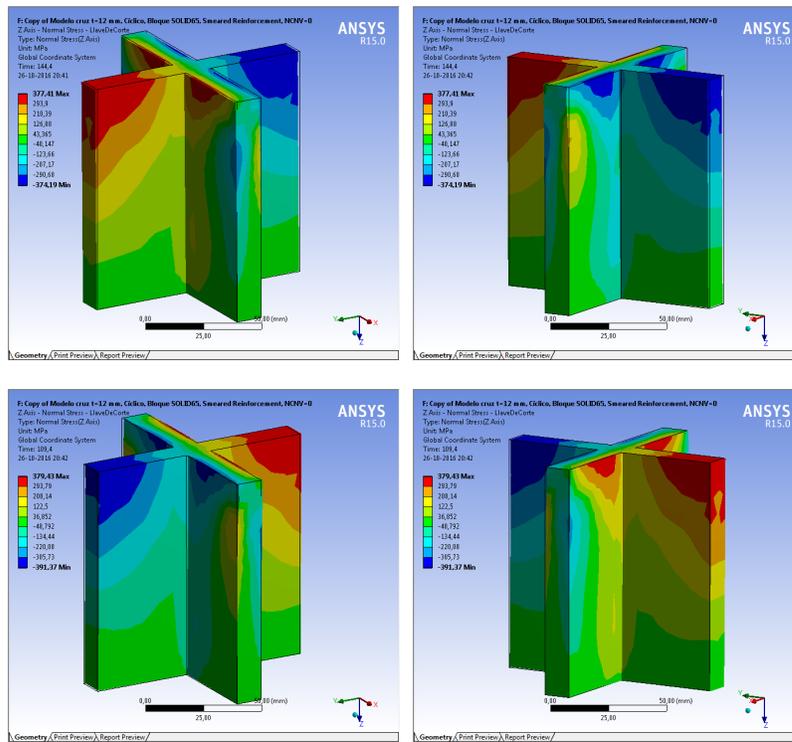


Figura 4.13: Tensión Normal eje Z, llave N° 4



(c) Vista anterior

(d) Vista posterior

Figura 4.14: Tensión Normal eje Z, llave N° 6

De acuerdo a la notación empleada por el programa, en azul se destacan las tensiones de compresión y en rojo las de tracción. En base a esto, se observa que en las llaves se alcanzan importantes tensiones de compresión en las alas que se ven impedidas en su movimiento, debido a la condición de borde que impone la unión con la placa.

De la misma manera, se tienen importantes tensiones de tracción y compresión en las alas paralelas al eje X , según se vean solicitadas las fibras más extremas. Lo anterior sugiere que existen esfuerzos de flexocompresión en la llave, por lo que las tensiones normales no solo describen el comportamiento a flexión.

Comparativamente, las llaves de mayores espesores son las que desarrollan niveles de tensiones más importantes, lo que coincide con el análisis de la flexión entre la placa y la llave, donde en las llaves N°4 y N°6 se alcanzan sollicitaciones de flexión por sobre el momento de plastificación de la sección transversal.

Tensiones y deformaciones equivalentes de Von Mises

Las tensiones equivalentes de Von Mises permiten comparar el estado tridimensional de tensiones con la tensión de fluencia a la tracción del acero, para determinar si el elemento se encuentra incursionando en el rango elástico o inelástico.

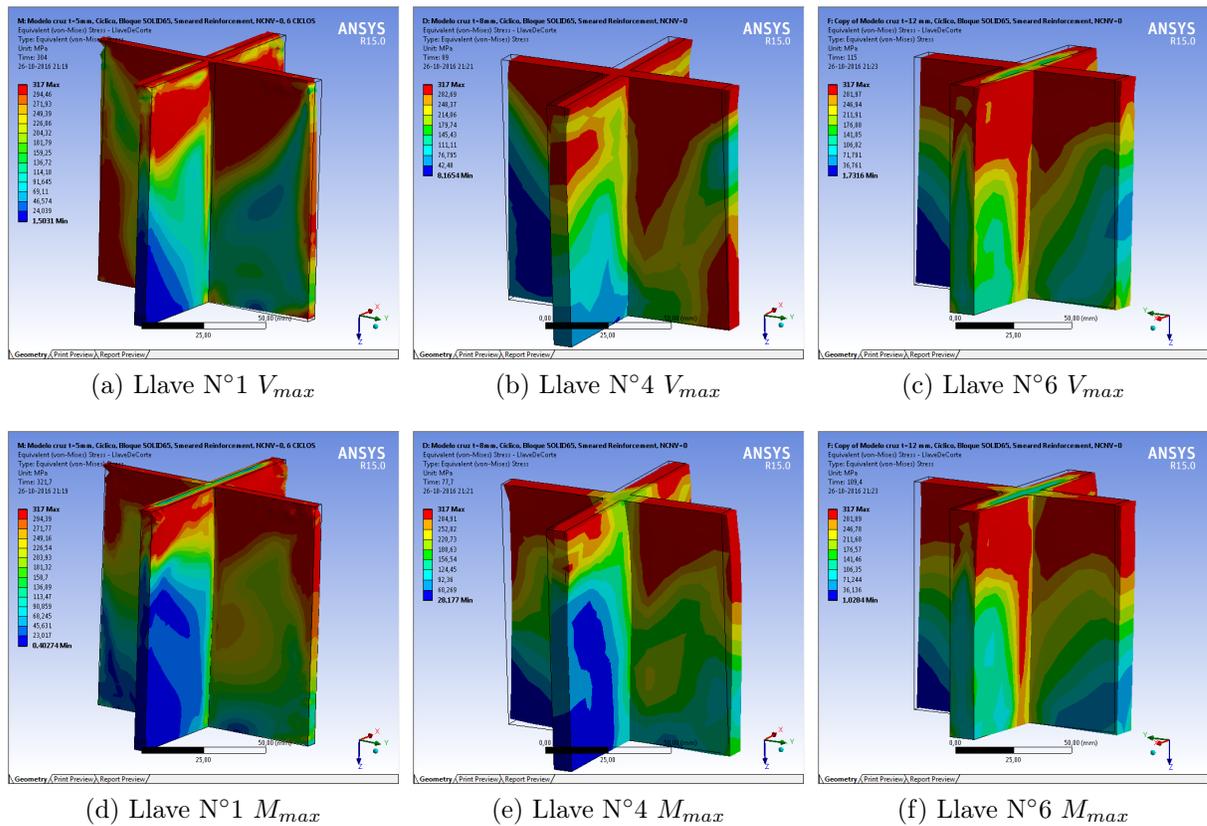


Figura 4.15: Tensiones equivalentes de Von Mises

La figura 4.15 muestra el estado de las tensiones de Von Mises para los instantes de máxima sollicitación de corte y de momento. A partir de éstas, se tiene que gran parte de la llave se encuentra plastificada, partiendo desde la base y distribuyéndose en la altura.

Consecuentemente, el perfil de tensiones máximas posee una forma similar al de las tensiones de corte analizadas previamente, con lo que se deduce que la plastificación por corte juega un rol fundamental en la incursión plástica de las llaves.

Por otra parte, para los instantes de máxima flexión se observa que los extremos de las alas se encuentran también en fluencia, propagándose en la altura de la llave. Del estudio del estado de tensiones de corte y normales, se puede inferir que la sección transversal fluye por la conjugación de los esfuerzos de corte y por los esfuerzos de tracción y compresión que se generan en dicho instante.

Además, existe una porción importante de las alas paralelas al eje X que se encuentra en el límite de la tensión de fluencia, lo que se explica por las tensiones de tracción y compresión generadas en las fibras extremas de las alas, producto de la deformación inducida en ellas.

Deformaciones

La figura 4.16 muestra la deformación en las llaves para los máximos desplazamientos alcanzados. Dado que en general dichos valores resultan bajos, los gráficos de deformación se obtienen con un factor de escala de 3.

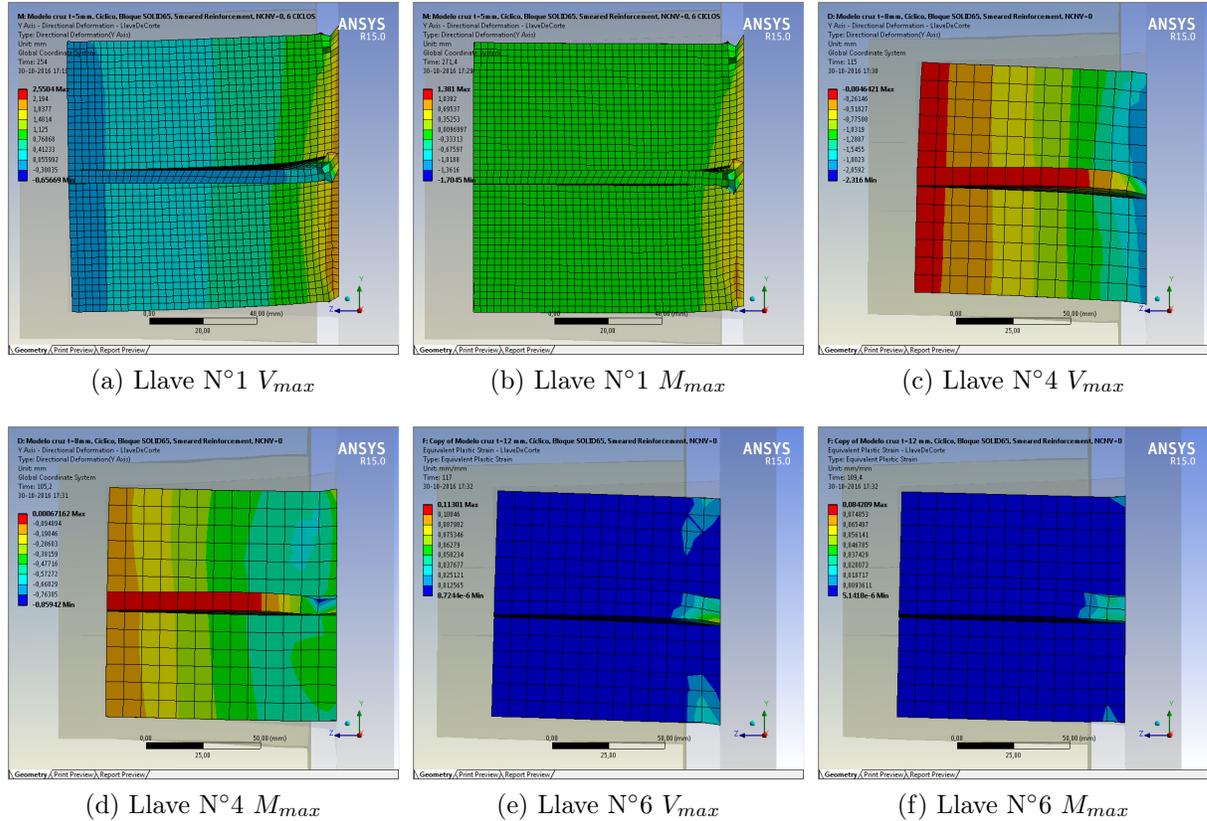


Figura 4.16: Deformada llave de corte

Los resultados expresados en las imágenes se encuentran dentro de lo esperado para los estados de máxima deformación, en base a las conclusiones de los trabajos previos y a la evidencia experimental para los análisis monotónicos. Dado lo anterior, se observa que las llaves presentan deformaciones características de corte, donde los mayores desplazamientos se concentran en las zonas superiores de las llaves. Además, se observa una desangulación de los elementos que se acentúa en la zona donde la llave no está embebida en el bloque de hormigón.

Por otro lado, para el instante de máxima sollicitación de flexión se observa que las deformaciones se concentran en las alas paralelas al eje X conectadas a la placa base, lo cual se condice con el estado de las tensiones de Von Mises en dicho instante.

4.2.3. Comportamiento bloque de hormigón

Dado que el bloque modelado representa la fundación en el sistema estructural, resulta de suma importancia comprobar como afectan las sollicitaciones a dicho elemento, verificando si se ve comprometida o no la integridad estructural.

Tensiones principales

Las figuras 4.17, 4.18 y 4.19 muestran la evolución de las tensiones mínimas en el bloque de hormigón, en los instantes en que se alcanzan los valores peak de desplazamiento. A partir de esto, se observa que los incrementos de tensiones se localizan en las inmediaciones de la casilla. En particular, las zonas con mayor concentración de tensiones corresponden a los vértices que resultan de la unión de las alas, a partir de donde las tensiones crecen según la dirección de carga. Además, el aumento de tensiones en profundidad se relaciona con la deformada de la llave, tema analizado en el apartado previo.

Cabe destacar que de acuerdo a los criterios adoptados para la modelación del comportamiento del bloque de hormigón, se desprecia el aporte a la resistencia y rigidez de todos los elementos que fallen debido al aplastamiento uniaxial, biaxial o triaxial. Gráficamente, esto se representa como zonas en las que no se tiene un estado de tensiones en el material.

Considerando lo anterior, es posible determinar las zonas en que se tiene desprendimiento de material debido al aplastamiento. Para la llave N°1, se observa que para los desplazamientos en el rango elástico no se produce aplastamiento en las zonas inmediatamente contiguas al grout. No obstante, existen tensiones que superan el límite en compresión original del material, modificado para lograr un mejor desempeño de los modelos. Por otro lado, debe tenerse presente que la información que se presenta en las figuras corresponde a un estado multiaxial de tensiones, por lo que no es directamente comparable con el límite a compresión del hormigón. Además, se debe considerar el aporte a la resistencia en tracción y compresión que resulta de la inclusión de un refuerzo distribuido en los elementos.

Por otra parte, para las llaves de mayor espesor se presenta aplastamiento a partir del primer ciclo, debido a que se producen sollicitaciones mayores.

Una vez que el daño por aplastamiento adquiere mayor importancia y se presenta en todas las inmediaciones de la casilla, se tiene que las tensiones presentan una distribución similar para ambos sentidos de desplazamiento máximo en un ciclo, lo que explicaría la estabilización de la resistencia observada en los gráficos de carga-desplazamiento. Además, las zonas dañadas por aplastamiento se distribuyen casi simétricamente respecto al plano que se forma en las alas, según el eje X .

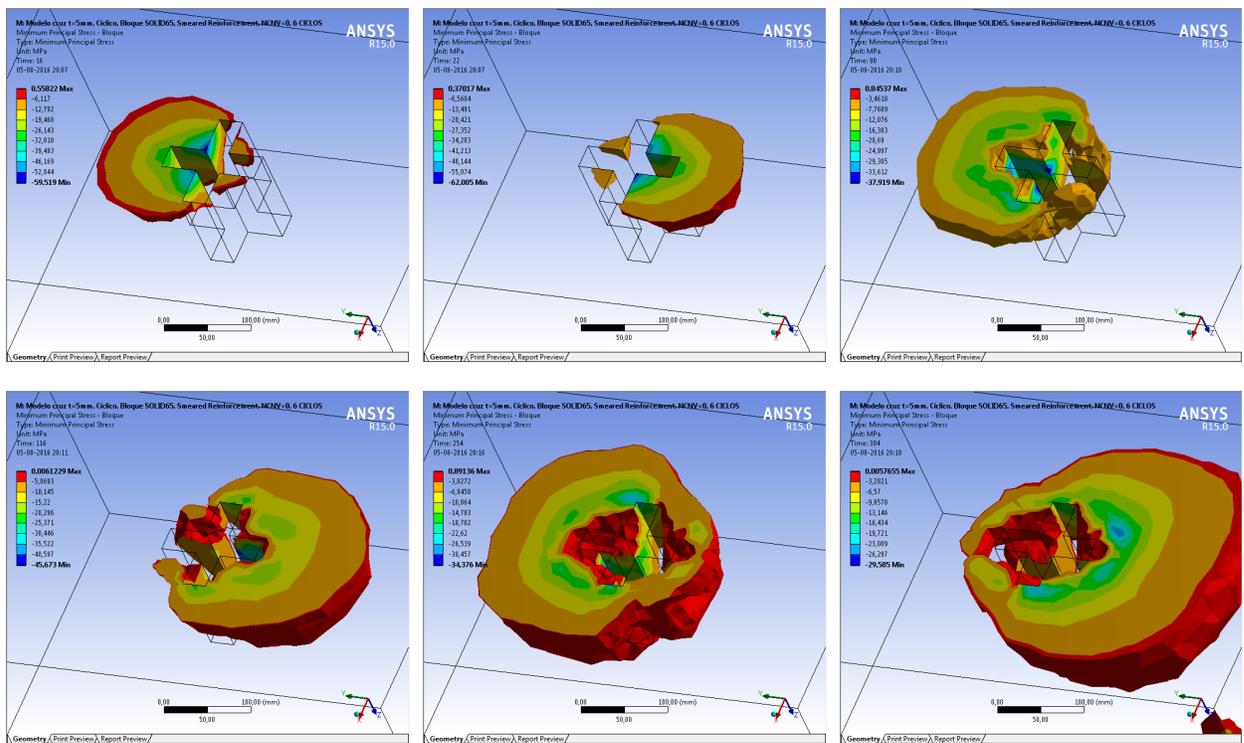


Figura 4.17: Evolución de las tensiones principales mínimas, llave N° 1

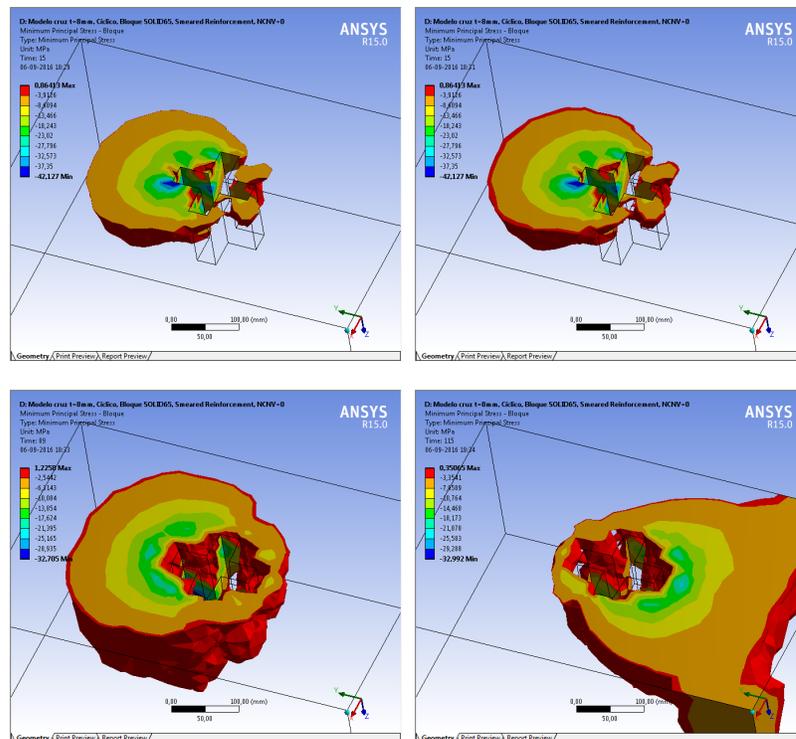


Figura 4.18: Evolución de las tensiones principales mínimas, llave N° 4

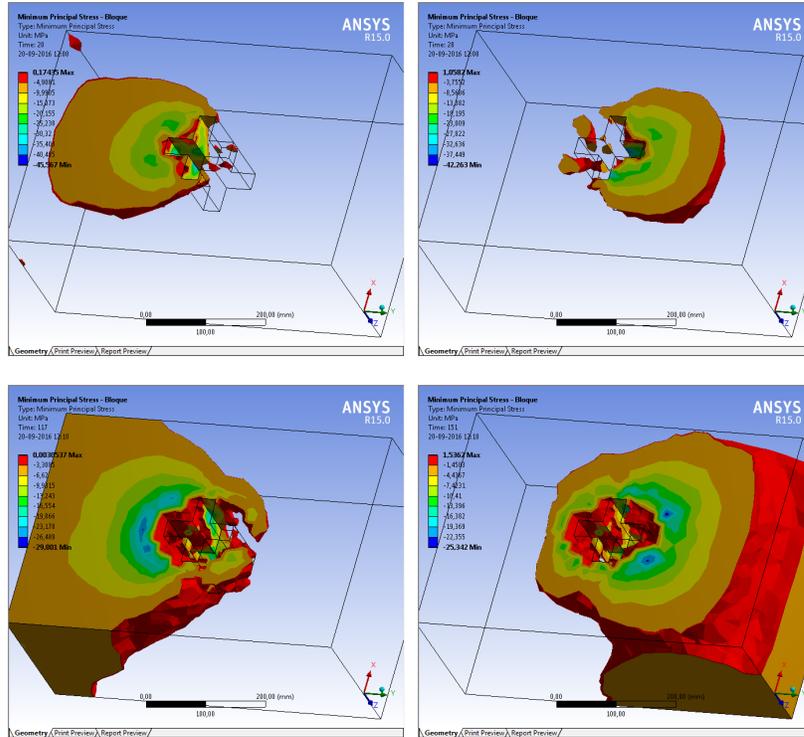


Figura 4.19: Evolución de las tensiones principales mínimas, llave N° 6

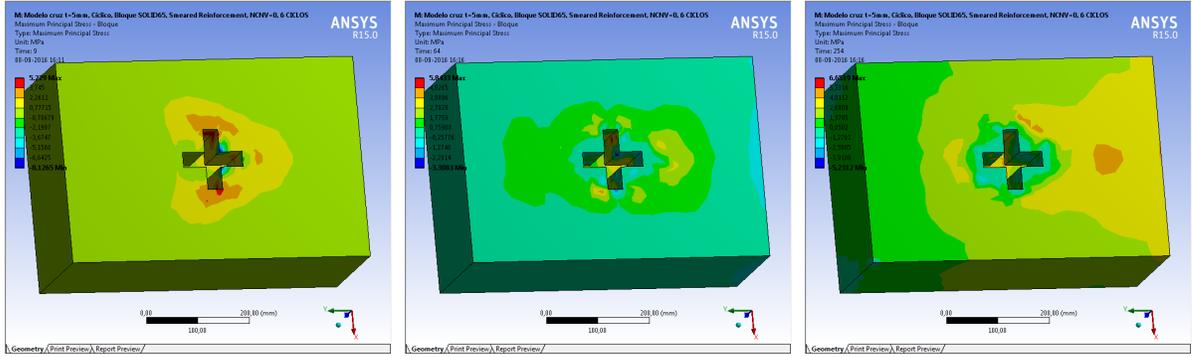
La figura 4.20 muestra las tensiones principales máximas en el bloque de hormigón, en instantes peak de desplazamiento.

Para los primeros ciclos, de bajas amplitudes, existen tensiones máximas de tracción localizadas en las cercanías de la casilla. A medida que el nivel de desplazamiento aumenta, las regiones traccionadas en el bloque en que puede presentarse agrietamiento resultan más significativas.

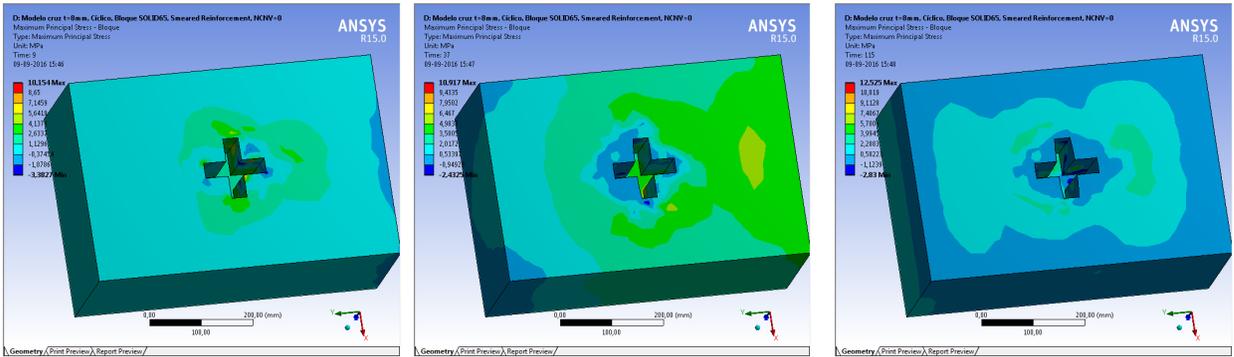
Así, para desplazamientos que generan tracción en el apoyo, existen tensiones positivas en el sector apoyado del bloque. Si bien éstas superan la resistencia a la rotura del hormigón, no es posible asegurar que exista agrietamiento en este sector, dado que debe considerarse el aporte a la resistencia que realiza el refuerzo.

Debe considerarse además, que en cada ciclo existen elementos que fallan debido al aplastamiento del hormigón, con lo que la cantidad de material sometida a esfuerzos de tracción disminuye a lo largo del análisis. Con esto, se pierde el efecto de confinamiento que confiere la armadura en la zona de la casilla.

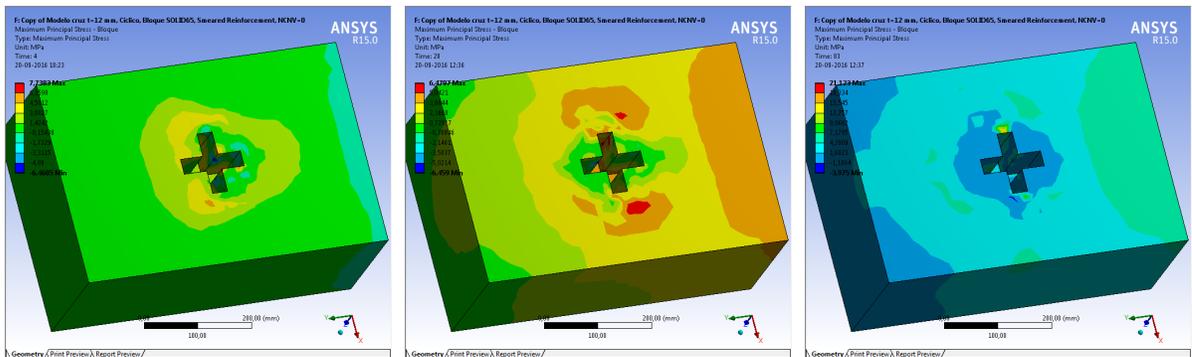
Por lo demás, dado los niveles de tensión alcanzados en los modelos, es de esperar que el agrietamiento del hormigón no genere deficiencias importantes para comprometer la integridad del sistema.



(a) Llave N°1



(b) Llave N°4



(c) Llave N°6

Figura 4.20: Evolución de las tensiones principales máximas, llaves en cruz

Tensiones normales en el apoyo

Aún cuando del análisis de las tensiones principales se desprende que las zonas que presentan daño por aplastamiento se concentran en la vecindad de la casilla, se analiza la distribución de tensiones en la cara del apoyo, para los momentos en que se presentan las máximas solicitaciones en cada modelo.

De la figura 4.21 se desprende que las tensiones normales compresivas que se presentan en el apoyo no representan mayores inconvenientes en términos de la capacidad resistiva del material, y por lo tanto no comprometen la integridad estructural de los sistemas.

No obstante, al analizar las tensiones de tracción se observa que en la zona superior central de la cara apoyada existen concentraciones de tensiones que superan la resistencia a la rotura del material. Además, esta situación confirma que la mayor participación de esfuerzos observados en el estudio de las tensiones principales máximas se debe a tensiones de tracción.

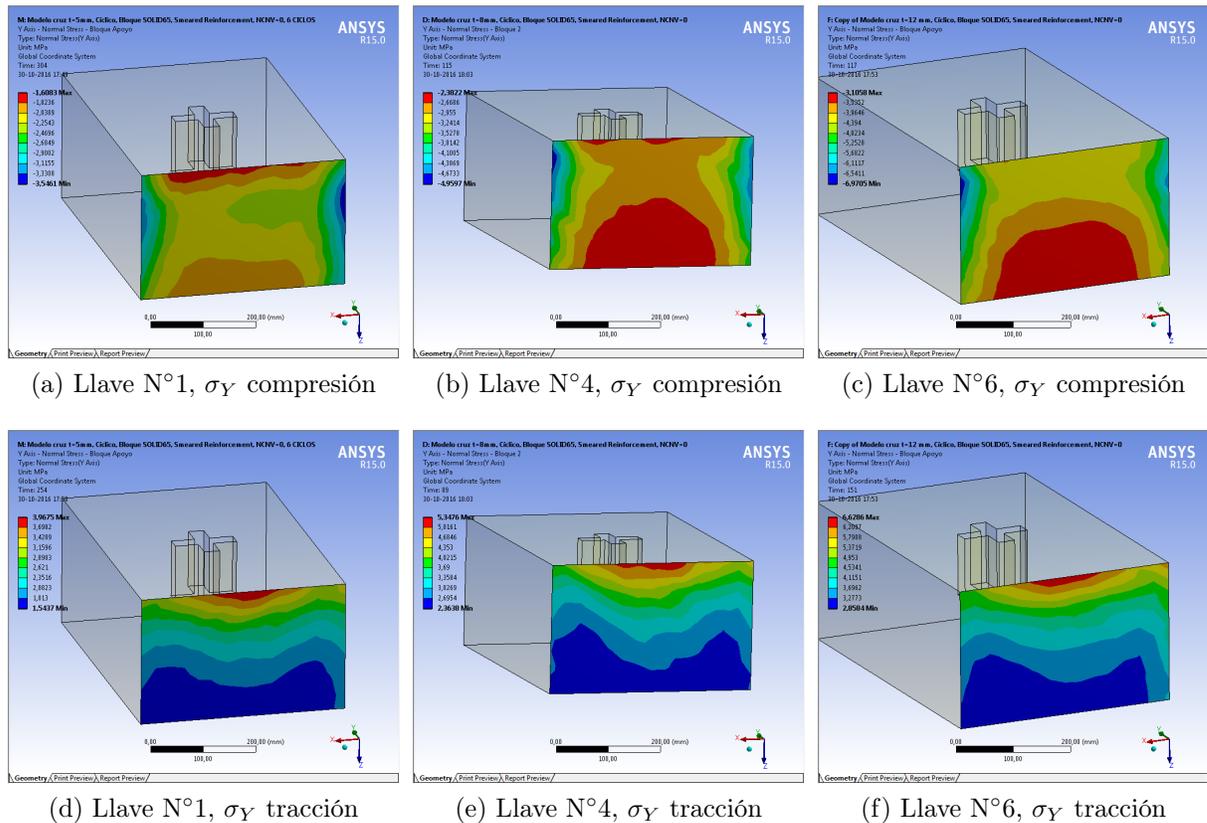


Figura 4.21: Tensiones normales en el apoyo, según dirección Y

Deformaciones

La figura 4.22 muestra el estado de deformaciones en el bloque de hormigón, según la dirección de desplazamiento de la placa base. A partir de los resultados obtenidos, se observa que las mayores deformaciones se concentran en las zonas mayor irregularidad geométrica, correspondiente a la unión de las alas en la llave. Luego, las deformaciones se propagan hacia afuera según la dirección X e Y .

Además, las deformaciones siguen un patrón simétrico respecto al eje X , tanto en los instantes de máximo desplazamiento positivo como negativo, lo que concuerda con el daño reportado en la cercanía de la casilla, generado por la falla compresiva de elementos de hormigón.

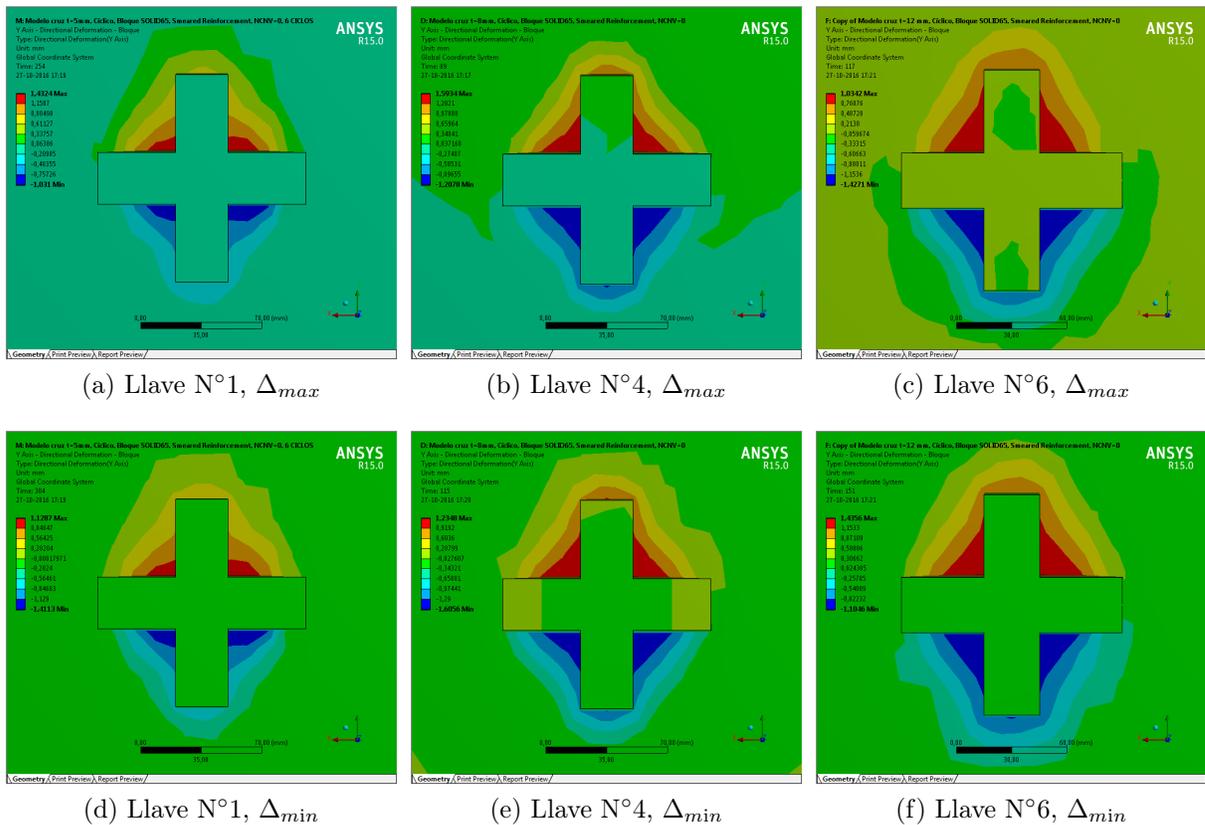


Figura 4.22: Deformaciones en el bloque de hormigón, según dirección Y

4.2.4. Comportamiento grout de nivelación

En esta sección se estudia el comportamiento del grout de nivelación bajo la acción de un desplazamiento cíclico, centrándose en aspectos similares a los estudiados para el bloque de hormigón.

Tensiones principales

Para analizar posibles estados de falla frágil en los elementos del grout se estudia la evolución de las tensiones principales, comparándolas con las resistencias del material. En estricto rigor, debe considerarse que estos resultados representan un estado multiaxial de tensiones, con lo que la comparación no es directa.

Las figuras 4.23, 4.24 y 4.25 muestran las tensiones principales mínimas en los instantes en que se alcanzan los máximos desplazamientos.

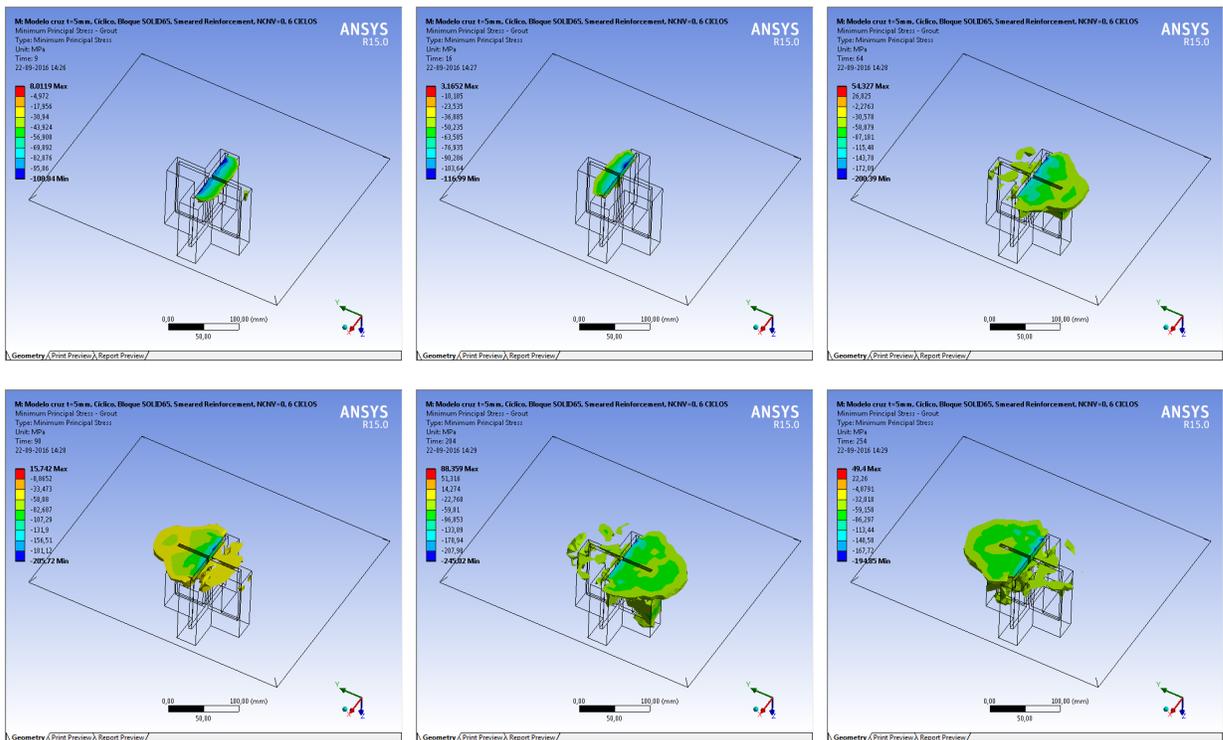


Figura 4.23: Evolución de las tensiones principales mínimas, llave N° 1

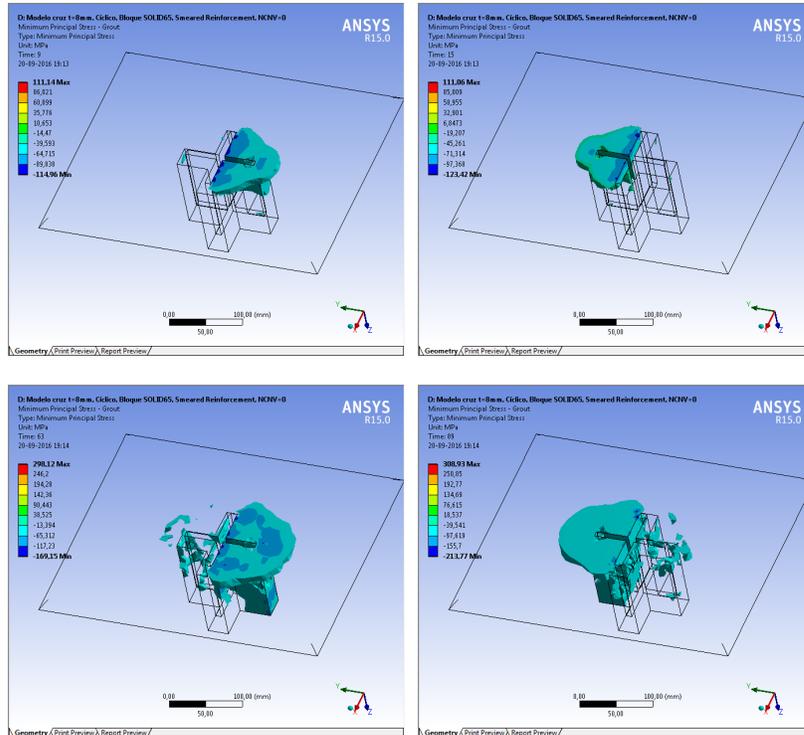


Figura 4.24: Evolución de las tensiones principales mínimas, llave N° 4

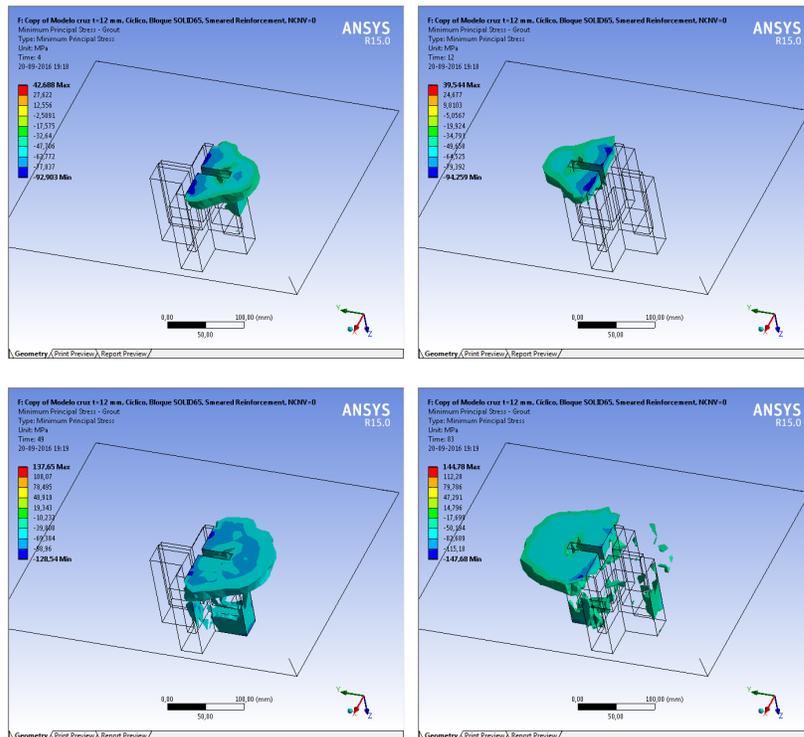


Figura 4.25: Evolución de las tensiones principales mínimas, llave N° 6

Las figuras anteriores muestran las zonas donde las tensiones superan la resistencia a la compresión del grout (f'_c). A partir de esto, es posible suponer que el daño por aplastamiento, de presentarse, se concentra principalmente en las cercanías de la casilla donde se inserta la llave.

En particular, para los primeros ciclos, se observa que las mayores tensiones se concentran en las zonas del grout que se encuentran en contacto directo con las alas de la llave, donde se alcanzan valores muy por sobre la resistencia compresiva del material. Por lo demás, para los ciclos de mayor amplitud, las zonas donde se supera la resistencia a la compresión forman un patrón similar al de los elementos que fallan por aplastamiento en el bloque de hormigón.

De acuerdo a lo observado en el análisis de las deformaciones en la llave, existe una desangulación en la base inferior de la llave (contacto llave-grout). Debido a esto, se obtienen tensiones mayores a las limitantes en la zona inferior del grout en los modelos de las llaves N°4 y N°6. Lo anterior sugiere que es posible que exista un desprendimiento de la zona de la casilla correspondiente al grout.

Además, las zonas donde puede presentarse aplastamiento en el grout se distribuyen casi simétricamente respecto a las alas de la llave orientadas según el eje X .

Las figuras 4.26, 4.27 y 4.28 muestran la evolución de las tensiones principales máximas, considerando aquellas zonas donde se supera la resistencia a tracción en el material (f_r).

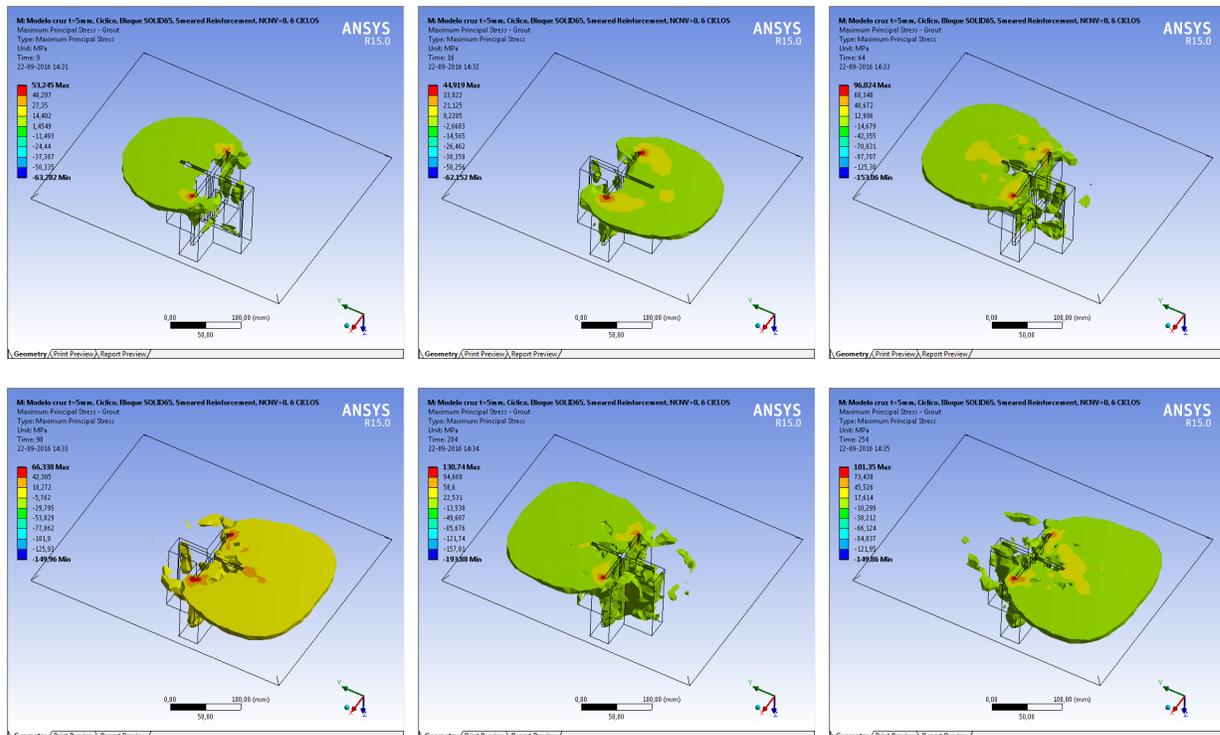


Figura 4.26: Evolución de las tensiones principales máximas, llave N° 1

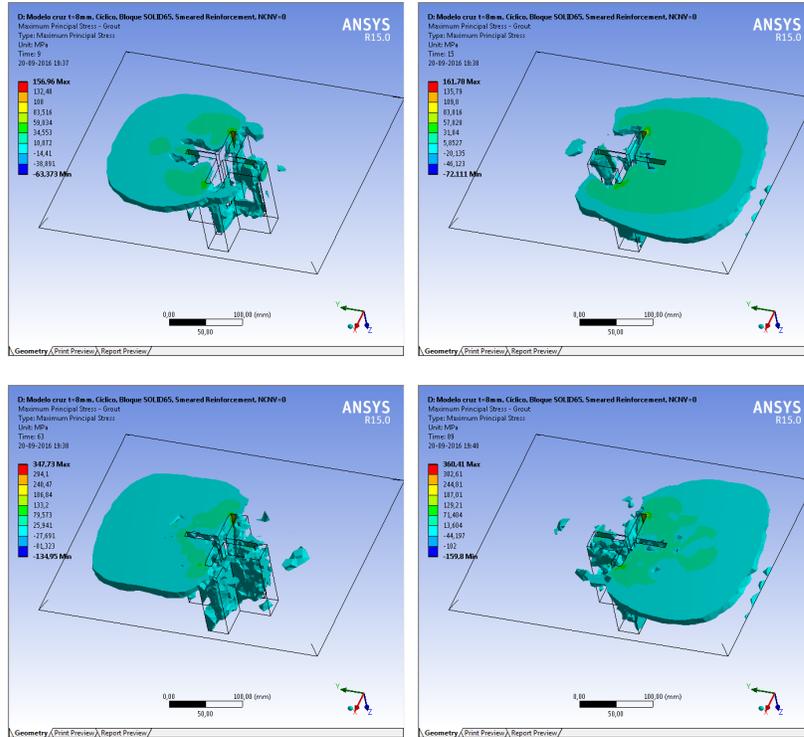


Figura 4.27: Evolución de las tensiones principales máximas, llave N°4

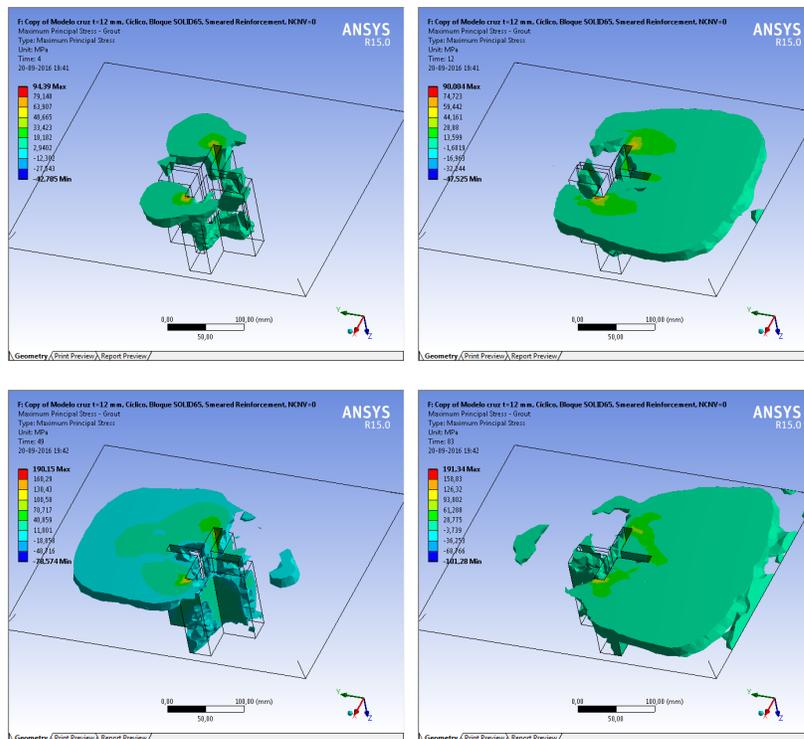


Figura 4.28: Evolución de las tensiones principales máximas, llave N°6

A partir de las figuras previas, se observa que las mayores tensiones se localizan en la zona en contacto con los extremos de las alas, orientadas según el eje X . En particular, la figura 4.28 muestra que las tensiones se propagan desde estos puntos hacia afuera y hacia el lado traccionado en el grout, formando zonas tensionadas como las que se observan para las demás instantes peak.

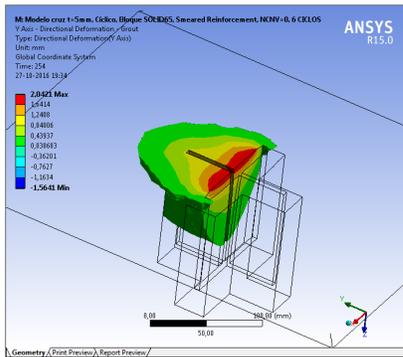
Además, en los tres modelos se tiene una mayor zona con tensiones superiores a las del límite a la rotura, en los desplazamientos que provocan una fuerza de tracción en el apoyo. Este efecto se acentúa al aumentar el espesor de la llave debido a que la carga resistida resulta mayor.

A pesar de esto, las zonas donde se puede presentar agrietamiento se encuentran acotadas a la zona delimitada por el grout, por lo que es de esperar que no exista un compromiso en la integridad estructural del elemento. No obstante, debido a que los desplazamientos alcanzados resultan más bien bajos, no es posible descartar un daño importante por agrietamiento para amplitudes mayores de desplazamiento, especialmente en aquellos donde se provoca tracción en el apoyo.

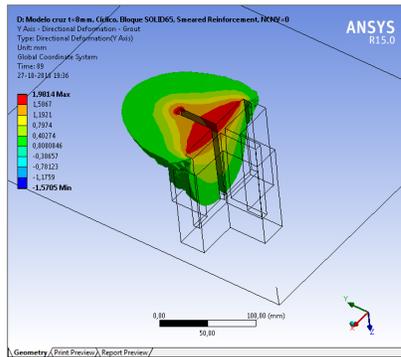
Deformaciones

La figura 4.29 muestra las máximas deformaciones experimentadas por el grout, en ambos sentidos de desplazamiento. De éstas, se observa que las máximas deformaciones se concentran en la zona en contacto con las alas de la llave.

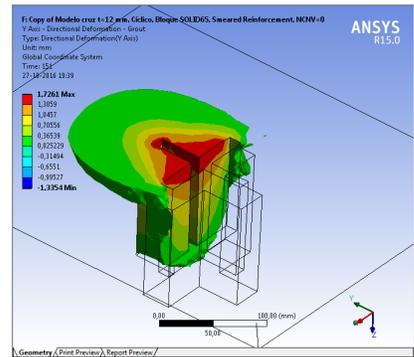
Las deformaciones se propagan también en la vertical, aunque son más importantes en la zona de la llave no embebida en el hormigón. Numéricamente, las máximas deformaciones coinciden con los máximos desplazamientos de la placa, y además, las zonas sujetas a deformación siguen un patrón simétrico para ambos casos de carga, conforme a lo observado en los análisis anteriores.



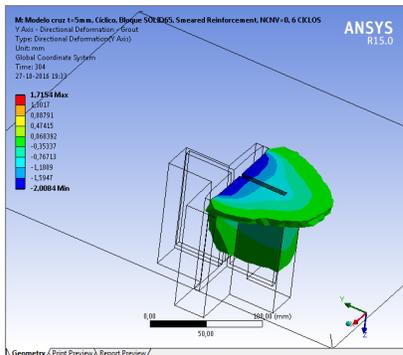
(a) Llave N°1, Δ_{max}



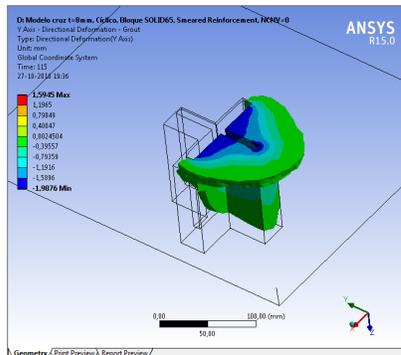
(b) Llave N°4, Δ_{min}



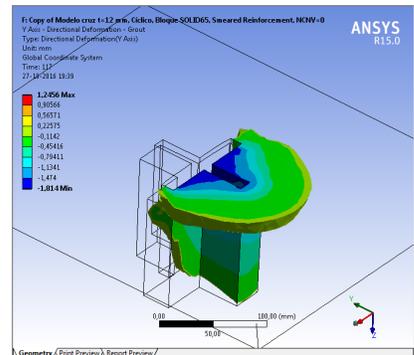
(c) Llave N°6, Δ_{max}



(d) Llave N°1, Δ_{min}



(e) Llave N°4, Δ_{max}



(f) Llave N°6, Δ_{min}

Figura 4.29: Deformaciones en grout de nivelación, según dirección Y

4.3. Llaves de corte en Doble T, cargadas en el eje débil

Se presentan a continuación los resultados de los modelos de llaves de corte en doble T, cargadas según la dirección del eje débil.

Al igual que en el apartado anterior, se analiza en primer lugar la respuesta global de los modelos y luego el comportamiento local de los elementos constituyentes del sistema estructural.

4.3.1. Respuesta global del sistema estructural

De la misma manera que para los modelos anteriores, se estudia el comportamiento global según la resistencia a las fuerzas de corte y flexión en la unión entre la llave y la placa base.

Corte

Las figuras 4.30, 4.31 y 4.32 muestran las curvas carga-desplazamiento para el caso cíclico, en conjunto con el caso monotónico.

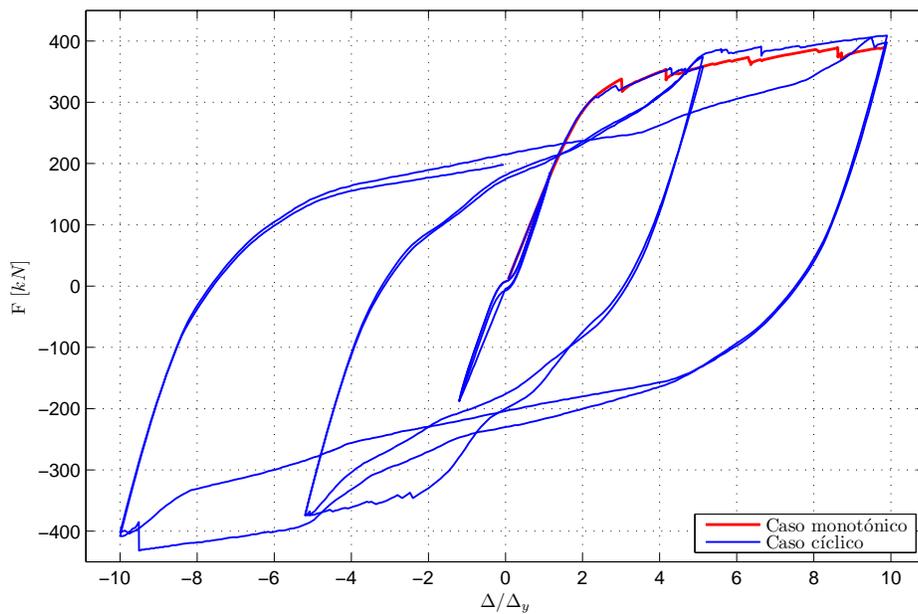


Figura 4.30: Carga vs desplazamiento, Llave N° 1

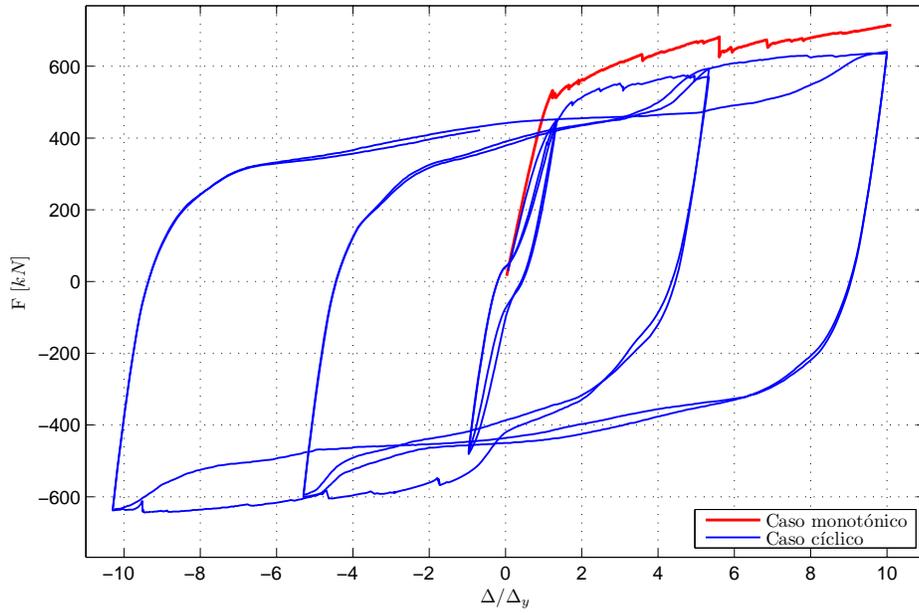


Figura 4.31: Carga vs desplazamiento, Llave N° 7

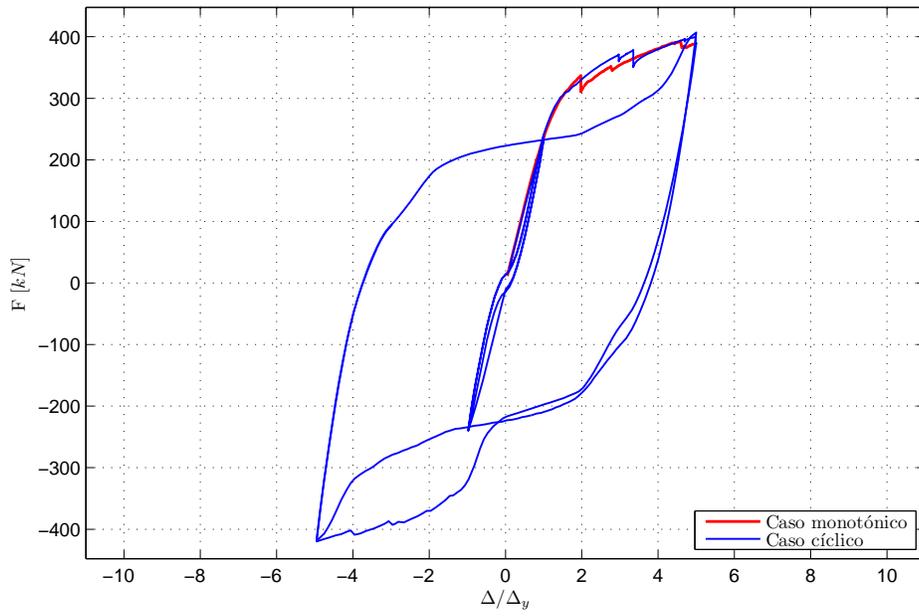


Figura 4.32: Carga vs desplazamiento, Llave N° 8

Los gráficos de las figuras previas muestran que en los casos de las llaves N°1 y N°7 se alcanzan seis ciclos completos, con deformaciones máximas de $10d_y$. Para el caso particular de la llave N°8, se tiene un análisis con cuatro ciclos completos. Cabe destacar que, a diferencia de los modelos de llaves en cruz, en este caso existen diferencias tanto en espesor, como ancho, altura del alma y de la llave.

En cuanto a la información que se obtiene a partir de las curvas se tiene que, al igual que en la geometría estudiada previamente, existe una notoria variación de la rigidez en la fase de carga para los ciclos subsiguientes que alcanzan la misma amplitud.

En particular, existe la formación de una meseta al alcanzar la máxima resistencia del sistema, la cual se mantiene relativamente constante en base a la falla por aplastamiento de elementos de hormigón. Además, la pendiente de la fase de descarga resulta similar a la observada en los desplazamientos donde se tiene comportamiento elástico.

Comparativamente, se observa que la llave N°1 es la que presenta un angostamiento más pronunciado de los aros de histéresis respecto al que se presenta en los otros dos modelos. En base a esto, y considerando que las llaves N°7 y N°8 presentan una mayor altura total de la llave, puede interpretarse que dicho parámetro y el *pinching* del hormigón siguen una relación de proporcionalidad inversa.

Conjuntamente con lo anterior, la variación de la pendiente entre las fases de carga y descarga es mucho menos pronunciada para la llave N°1, lo que permite suponer que el proceso de cierre de grietas y rigidización parcial del hormigón es un proceso mucho más gradual que en las llaves N°7 y N°8.

Otro fenómeno relevante es que, a diferencia de los modelos de las llaves N°1 y N°7, para la llave N°8 se tiene una disminución de la carga máxima resistida por los sistemas, con respecto a la resistencia observada en el caso monotónico.

Flexión

Las figuras 4.33, 4.34 y 4.35 muestran las curvas de flexión - desplazamiento en la unión soldada de las llaves de corte a la placa base.

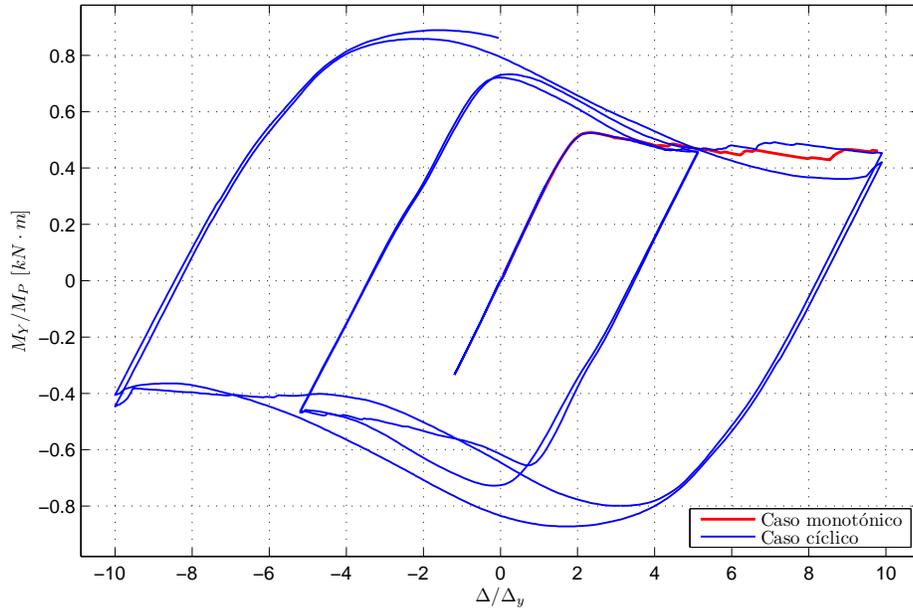


Figura 4.33: Momento vs desplazamiento, Llave N° 1

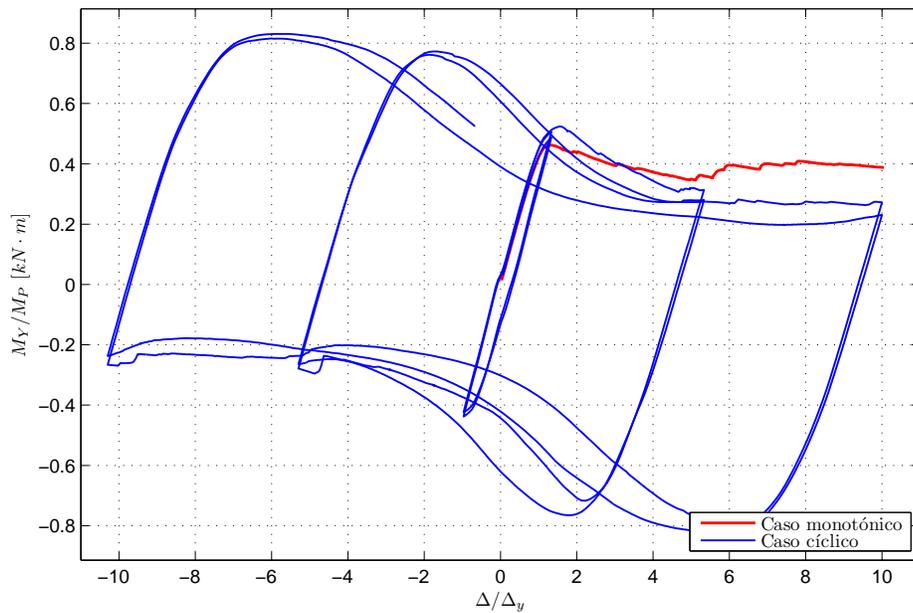


Figura 4.34: Momento vs desplazamiento, Llave N° 7

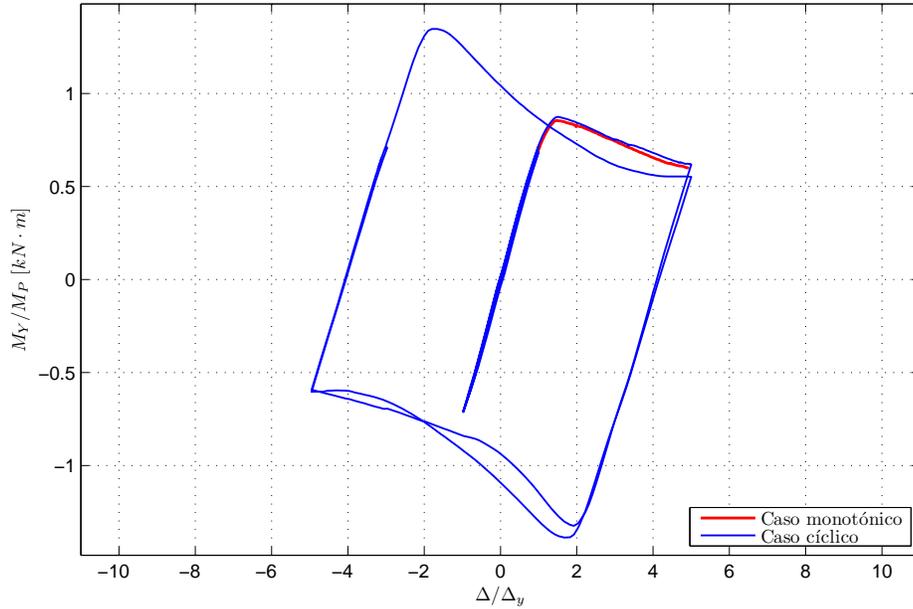


Figura 4.35: Momento vs desplazamiento, Llave N° 8

Del análisis de los gráficos anteriores se desprende que, al igual que en el caso de las llaves en cruz, al aumentar la amplitud de desplazamientos a lo largo del análisis cíclico las solicitaciones de momento alcanzan valores de mayor importancia. Cabe destacar que en las curvas anteriores, se ponderan los resultados por el momento de plastificación de la sección transversal.

Comparativamente, se observa que al aumentar el espesor de la llave disminuye el porcentaje del momento plástico alcanzado, llegando al 80 % en la llave N°7, y sobrepasando el 100 % para la llave N°8., fenómeno esperable considerando que a secciones más robustas aumenta la capacidad a flexión.

Por otro lado, se tiene que para las llaves N°1 y N°8 las curvas de flexión decaen siguiendo un comportamiento similar, coincidente aproximadamente con la envolvente generada en el caso monotónico.

Para la llave N°7, en cambio, existe un pronunciado angostamiento, generado por el rápido decaimiento de la curva de flexión, desde el momento máximo hasta el momento último, que permanece relativamente constante entre ciclos.

4.3.2. Comportamiento llave de corte

A continuación se estudia la evolución de las tensiones y deformaciones experimentadas por las llaves de corte.

Tensiones de corte

Para comprender el comportamiento de las llaves en relación a las solicitaciones por corte, se analizan las tensiones según la dirección X en un plano normal al eje Z . Las figuras 4.36, 4.37 y 4.38 muestran la evolución de las tensiones de corte experimentadas por las llaves, en los momentos en que se alcanzan los máximos desplazamientos.

A partir de dichas figuras se observa que para los ciclos a desplazamientos elásticos las mayores concentraciones de tensiones se localizan en los extremos superiores de las alas, donde la llave se une a la placa base. No obstante, las tensiones alcanzadas se encuentran aún en el rango elástico del material. Luego, para los ciclos a desplazamientos de cinco veces el valor del de fluencia, se tiene que las mayores tensiones se concentran en las alas, en las zonas de unión con el alma, extendiéndose tanto en profundidad a lo largo de la llave como hacia los extremos de las alas. Dichas direcciones de propagación de las tensiones producen que los valores máximos se concentren en un perfil parabólico, de manera similar a lo observado para las llaves en cruz.

Además, se observa que las máximas tensiones alcanzadas corresponden a $193[MPa]$, valor que coincide con la tensión de fluencia al corte, para $f_y = 335[MPa]$ (ver ecuación 2.7).

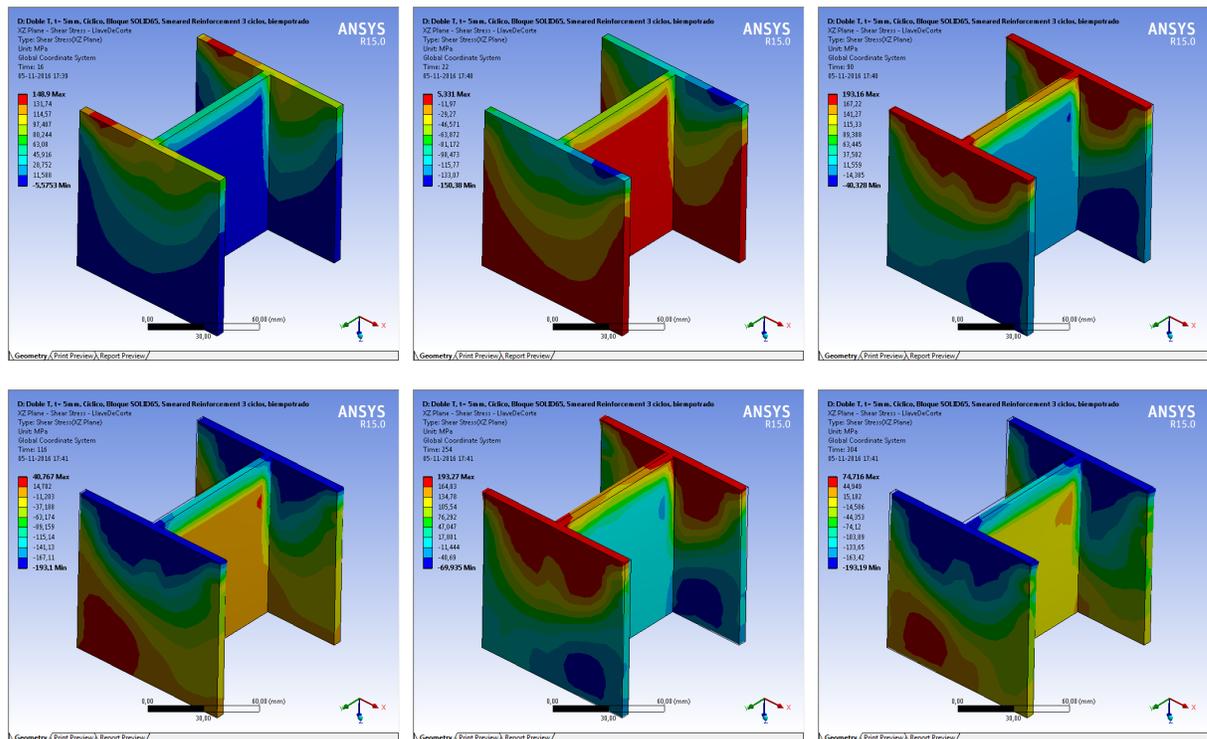


Figura 4.36: Evolución de las tensiones de corte τ_{XZ} , llave N° 1

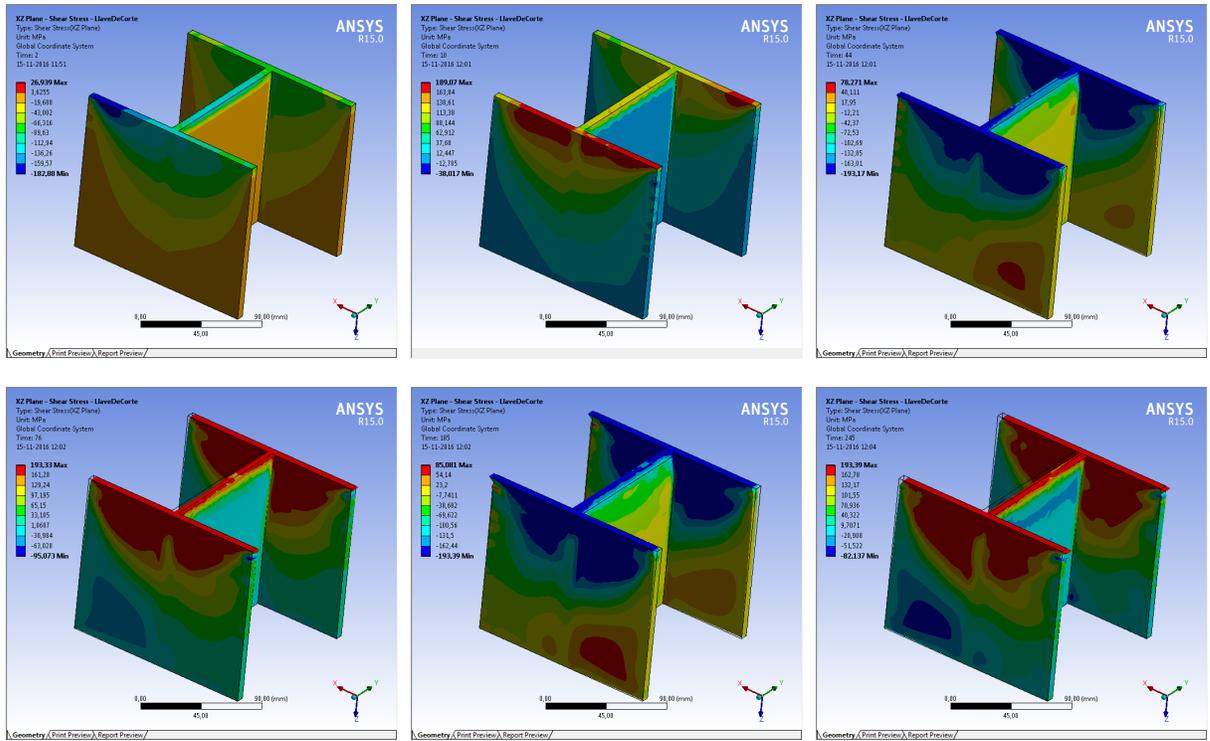


Figura 4.37: Evolución de las tensiones de corte τ_{XZ} , llave N° 7

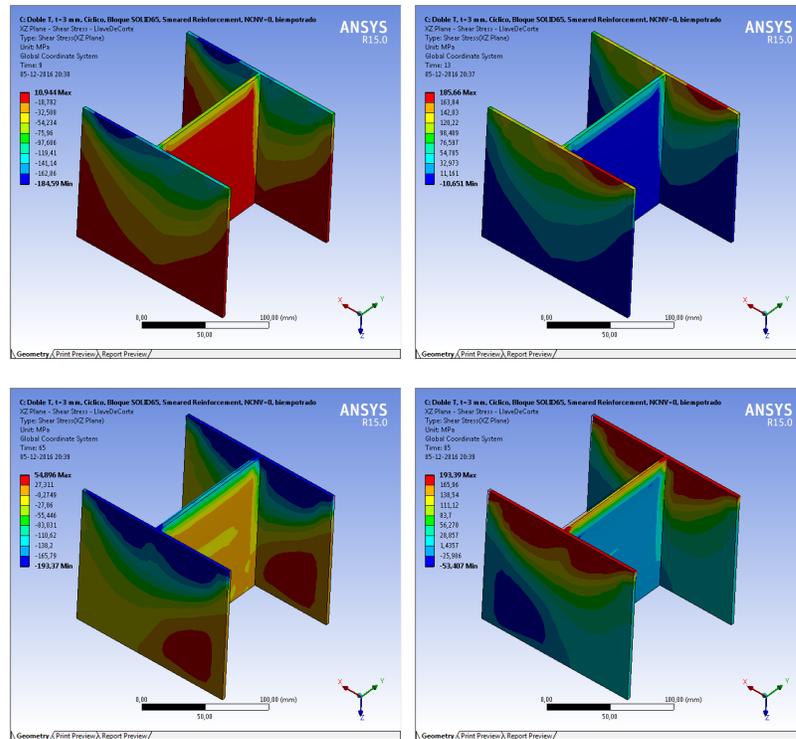


Figura 4.38: Evolución de las tensiones de corte τ_{XZ} , llave N° 8

Tensiones normales

Al igual que lo realizado para los modelos en cruz, para caracterizar el comportamiento a flexión de la llave se analizan las tensiones normales según la dirección Z . Las figuras 4.39, 4.40 y 4.41 muestran el estado de tensiones normales en los instantes de máximo momento, de acuerdo a lo observado en los gráficos de las figuras 4.33, 4.34 y 4.35, respectivamenmte.

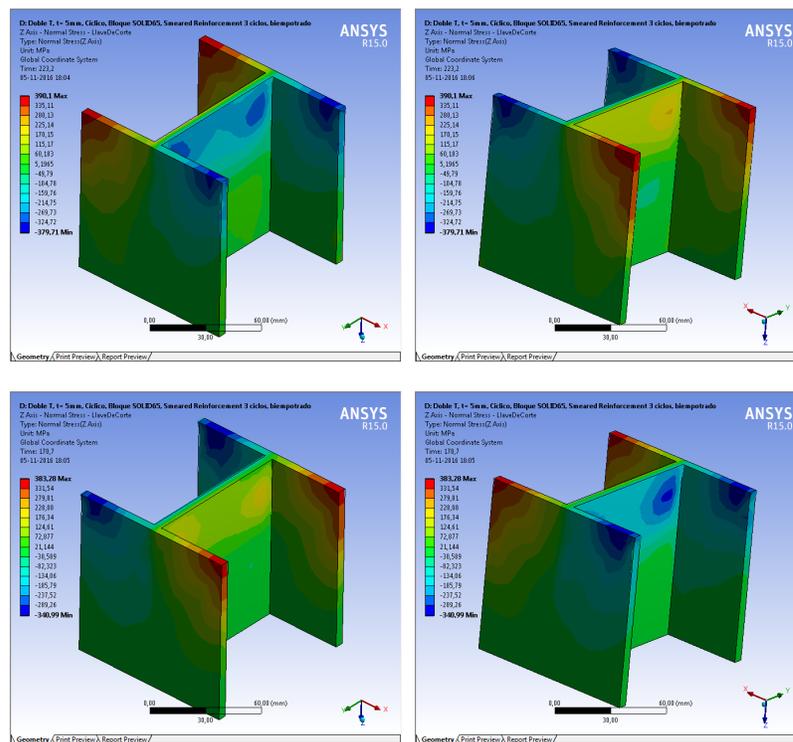


Figura 4.39: Tensión Normal eje Z , llave N° 1

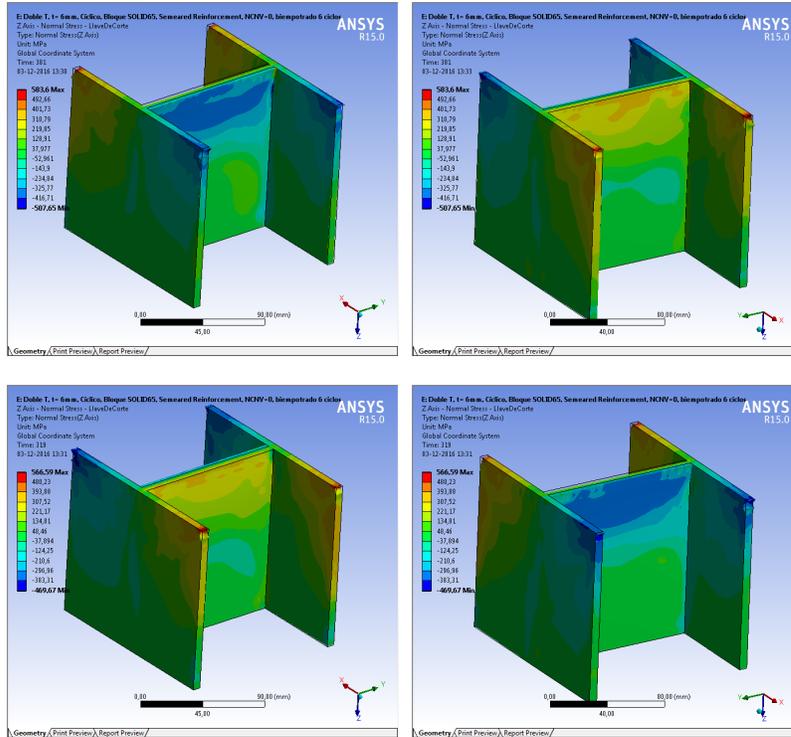


Figura 4.40: Tensión Normal eje Z, llave N° 7

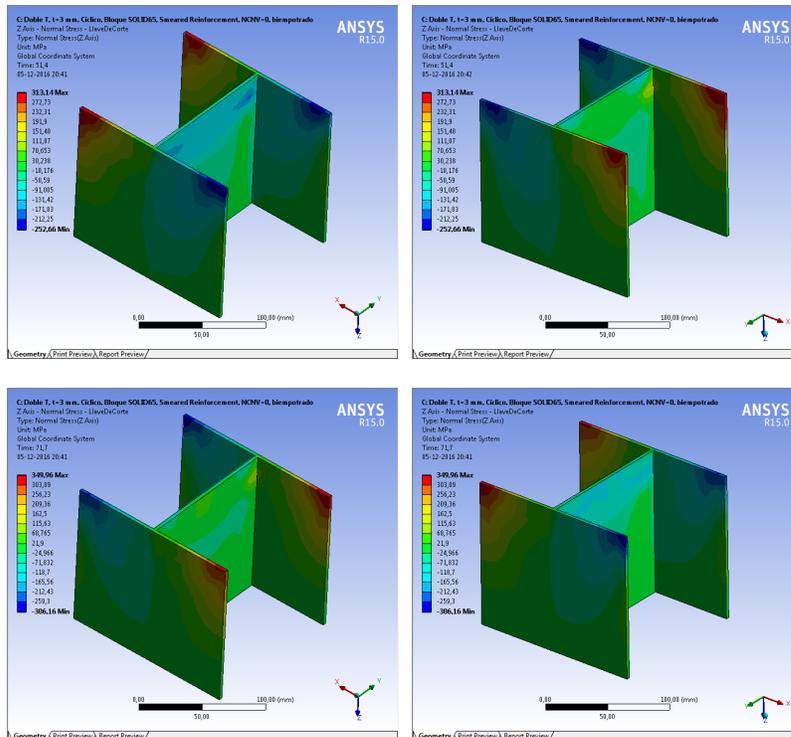


Figura 4.41: Tensión Normal eje Z, llave N° 8

De los resultados obtenidos se observa un comportamiento similar al que experimentan las llaves en cruz, donde existe una concentración de tensiones compresivas en los extremos de las alas que se ubican en la zona trasera de la llave, respecto del sentido de desplazamiento.

En las llaves N°1 y N°8 existe una mayor porción de las alas sujeta a las máximas tensiones alcanzadas respecto de la llave N°7, aún cuando numéricamente se alcanzan mayores valores en ésta última. Además, existen tensiones de compresión y tracción en las fibras extremas del alma de las llaves, aunque la participación de ésta queda supeditada a las condiciones de borde que impone el apoyo.

Tensiones y deformaciones equivalentes de Von Mises

En la figura 4.42 se muestra el estado de las tensiones equivalentes de Von Mises en las llaves de corte, para los instantes de máxima sollicitación de corte y de momento.

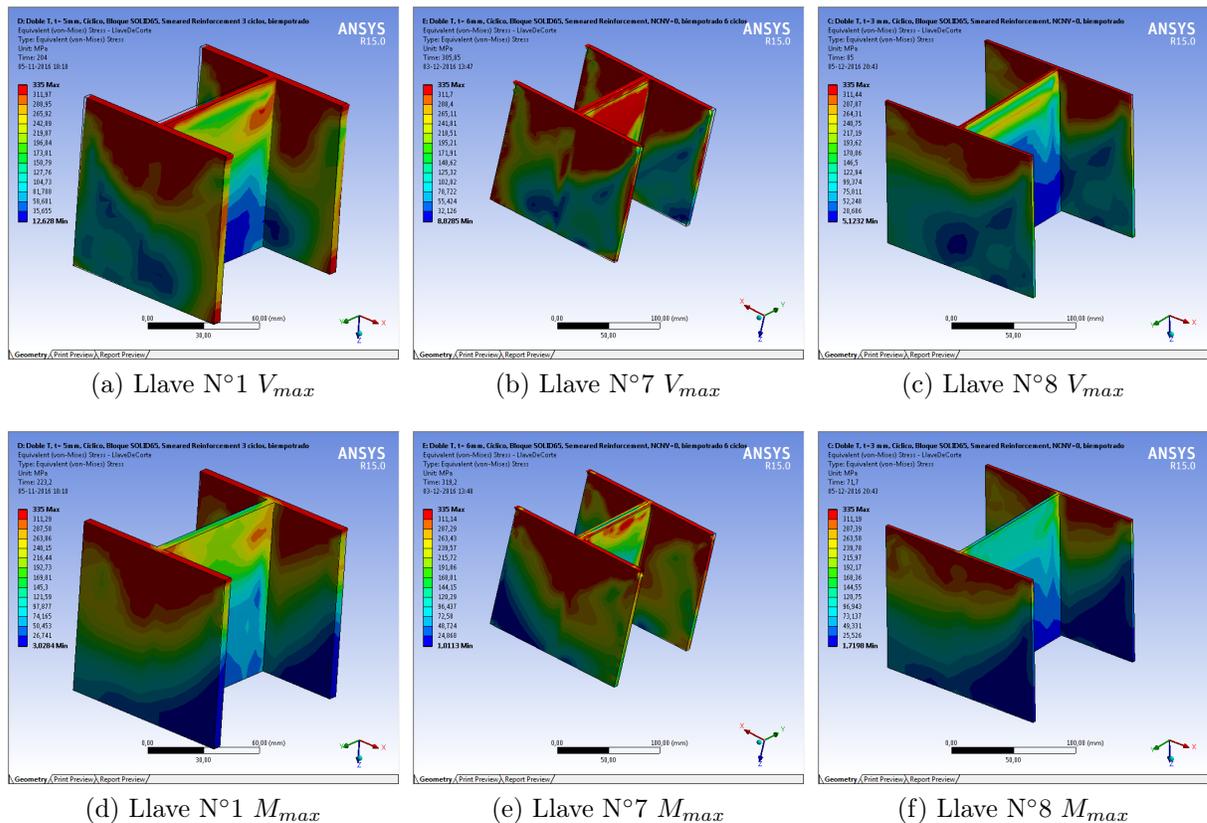


Figura 4.42: Tensiones equivalentes de Von Mises

A diferencia del caso de las llaves en cruz, entre ambos instantes de sollicitación no existen grandes diferencias en cuanto a la distribución de tensiones máximas, al menos en los casos de las llaves N°1 y N°7, donde los desplazamientos aplicados al modelo no son suficientes para alcanzar la plastificación por flexión. En el caso de las llave N°8, en tanto, se observa una mayor porción de las alas alcanzando la tensión de fluencia, localizada principalmente en los extremos de éstas. Lo anterior, es atribuible principalmente a las tensiones normales en

dichos sectores.

No obstante, en cuanto al perfil de tensiones en la llave, se observa que la mayor porción del elemento que alcanza la tensión de fluencia se concentra en las alas de la doble T, con una distribución que confirma que el principal agente que induce comportamiento inelástico en la llave corresponde a los esfuerzos de cortante puro.

Deformaciones

La figura 4.43 muestra la deformación direccional en las llaves de corte, según la dirección de desplazamiento de la placa base.

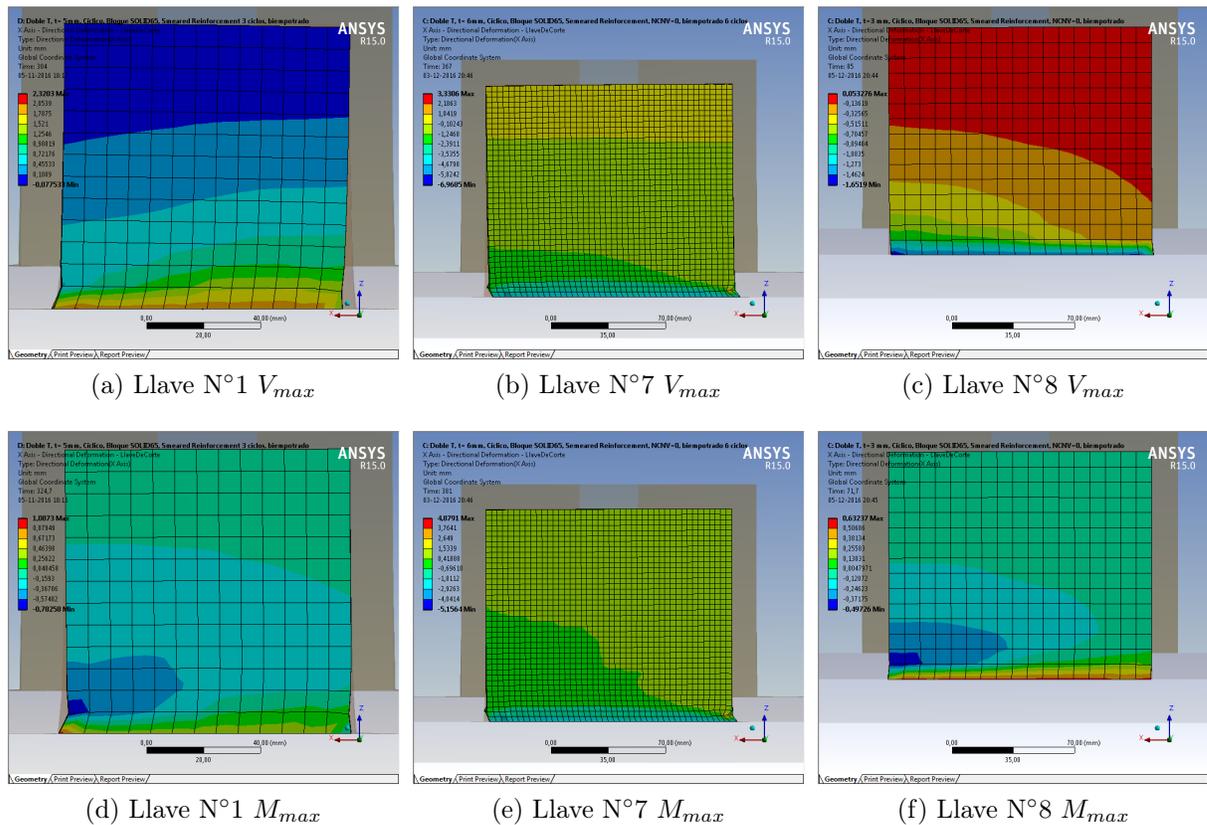


Figura 4.43: Deformada llave de corte

En cuanto a la deformación observada, se tiene que el comportamiento de las llaves sigue el mismo patrón que el existente en las llaves en cruz analizadas previamente y donde, para los máximos desplazamientos de la placa, se tiene una desangulación de los elementos de la llave comprendidos entre la base y la zona embebida en el bloque de hormigón. Por lo tanto, la deformada de la llave responde principalmente a los esfuerzos de corte.

Para los instantes de máximo momento, existe una desangulación de las llaves generada al intentar llevar a ésta desde su máxima deformación por corte a su estado inicial.

4.3.3. Comportamiento bloque de hormigón

Se analiza a continuación el comportamiento del bloque de hormigón, estudiando la evolución de sus tensiones principales, tensiones normales y deformaciones.

Tensiones principales

Las figuras 4.44, 4.45 y 4.46 muestran la evolución de las tensiones principales mínimas para los bloques de las llaves N°1, N°7 y N°8, respectivamente.

Para los desplazamientos del rango elástico se observa que existe una concentración de tensiones a lo largo del alma de las llaves. A pesar de esto, las mayores concentraciones de tensiones se generan en la zona de unión entre el alma y las alas de la llave.

A mayores amplitudes de deformación, es posible observar el daño localizado de elementos de hormigón producto de fallas por aplastamiento. Los sectores afectos a dicha condición corresponden principalmente a los elementos en contacto con el alma de la llave. Para amplitudes de $10d_y$ se tiene que la mayor parte del material comprendido entre las alas y el alma ha fallado producto de esfuerzos compresivos, observándose también zonas dañadas en las áreas en contacto con los extremos de las alas.

Respecto de la propagación de las tensiones, se tiene que éstas siguen un patrón decreciente en la dirección de carga, expandiéndose desde las zonas en contacto con el alma hacia los bordes del bloque de hormigón. Además, a diferencia de los modelos de llaves en cruz, existen zonas en compresión en los extremos del bloque que se encuentran más cercanos a la zona de la casilla, correspondientes a los de su dirección corta. Dicho fenómeno resulta esperable, dada la menor cantidad de material resistente en esta configuración.

Por último, y al igual que para los modelos en cruz, se observa una simetría del daño por aplastamiento en el hormigón, respecto del eje determinado por el alma de las llaves. Lo anterior guarda estrecha relación con la forma de las curvas de histéresis (fig. 4.30, 4.31 y 4.32).

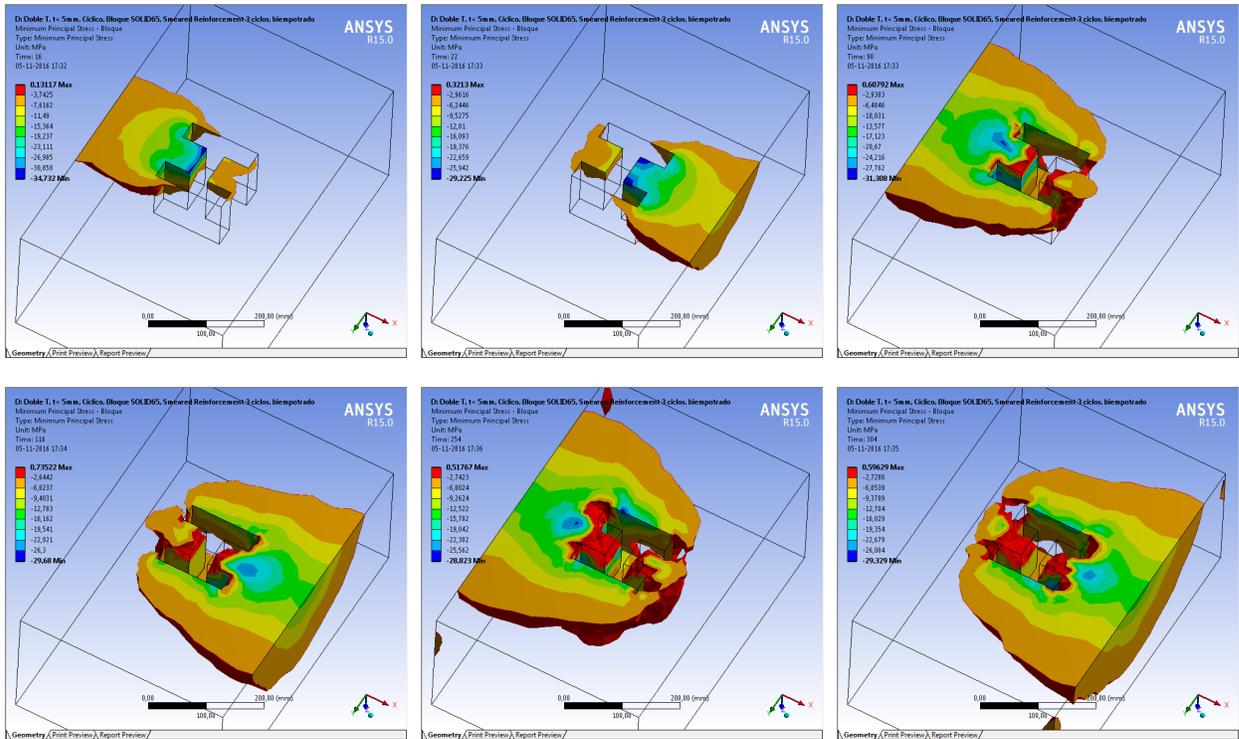


Figura 4.44: Evolución de las tensiones principales mínimas, llave N° 1

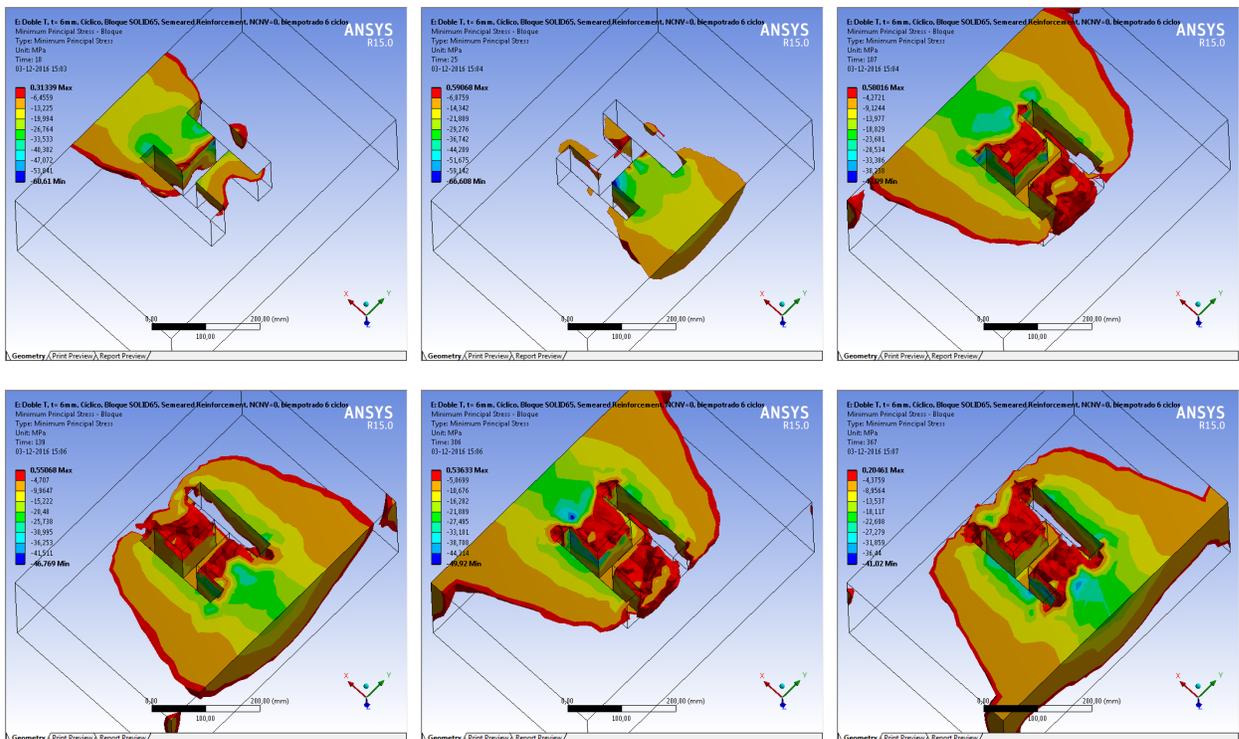


Figura 4.45: Evolución de las tensiones principales mínimas, llave N° 7

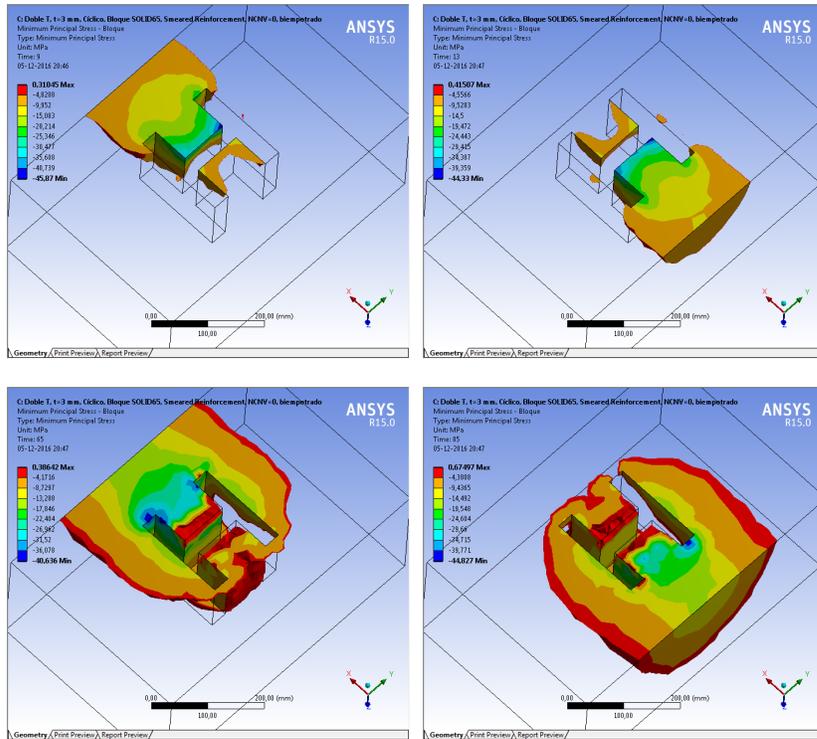
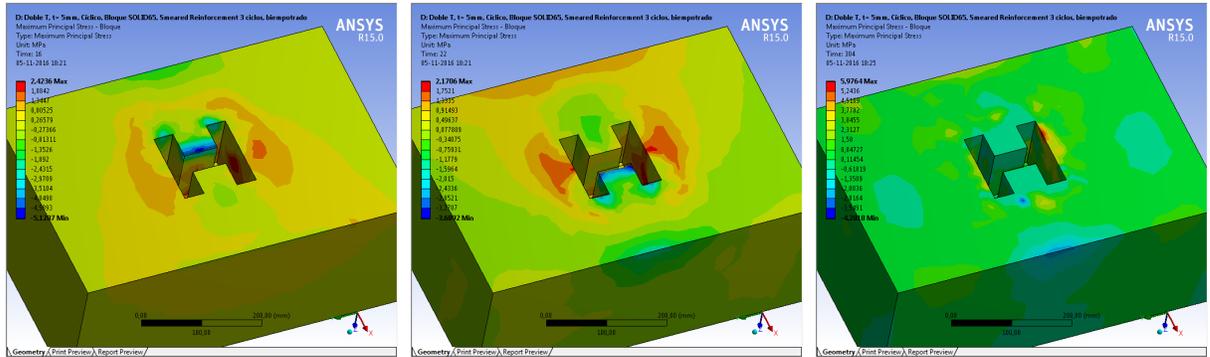


Figura 4.46: Evolución de las tensiones principales mínimas, llave N° 8

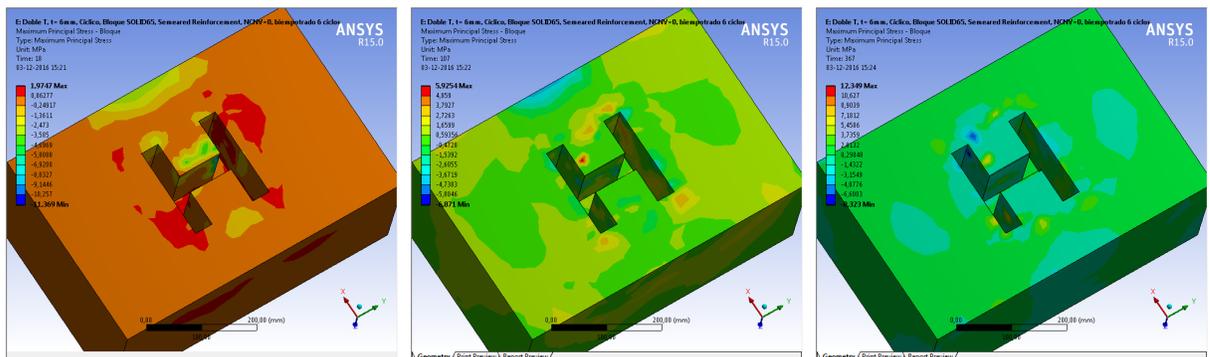
La evolución de las tensiones principales máximas en el bloque se muestra en la figura 4.47. Puede observarse que para los primeros ciclos se obtienen tensiones compresivas en las zonas en contacto con el alma de las llaves, de mayores magnitudes, como también se observa compresión en la zona central superior de la cara empotrada sometida a compresión, aunque con magnitudes menores. Además, las tensiones máximas de tracción se concentran en las zonas en contacto con las alas, generadas por la fricción entre éstas y el bloque de hormigón.

El comportamiento anterior es más notorio en las llaves de menor sección transversal, las que coincidentemente presentan mayores niveles de angostamiento en los aros de histéresis. En particular, el fenómeno es más visible para la llave N°1.

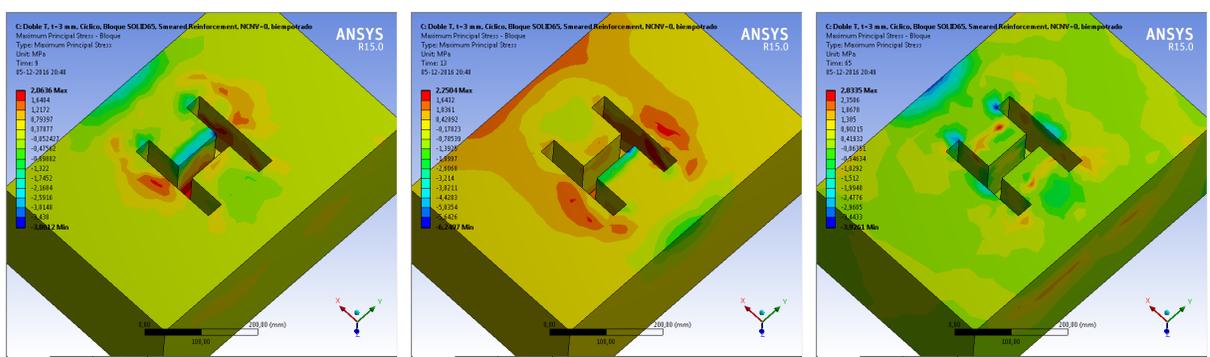
Además, se observan importantes concentraciones de tensiones en el extremo superior de la cara apoyada sometida a tracción, donde se alcanzan valores por sobre la resistencia a la tracción del material, en conjunto con zonas en tracción en la casilla donde se insertan las alas de la llave.



(a) Llave N°1



(b) Llave N°7



(c) Llave N°8

Figura 4.47: Evolución de las tensiones principales máximas, llaves en doble T cargadas en el eje débil

Tensiones normales en el apoyo

Para verificar la integridad de la cara apoyada del bloque se analizan las tensiones normales a ésta. La figura 4.48 muestra el estado tensional en los instantes de máximo desplazamiento de tracción y compresión en una de las caras empotradas.

La información proporcionada por los modelos indica que existen tensiones de compresión distribuidas sobre la zona superior central. Además, en las zonas más cercanas a la casilla, se alcanzan valores que, si bien no superan los límites compresivos del material, resultan importantes. Sin embargo, es de esperar que, en caso de presentarse aplastamiento en esta cara del bloque, el daño se concentre en la zona superior central y no se vea comprometida la integridad estructural del mismo.

Por otro lado, un análisis de las tensiones en situación de tracción indica que las mayores concentraciones siguen un patrón cuasi parabólico, en un área puede asimilarse a una envolvente de las zonas sometidas a mayores tensiones de compresión, cuando los desplazamientos son en sentido inverso. Si bien los máximos valores no superan la resistencia a la rotura del material, es de esperar que a mayores amplitudes de desplazamiento exista daño por agrietamiento siguiendo un patrón similar al que se experimenta en este caso.

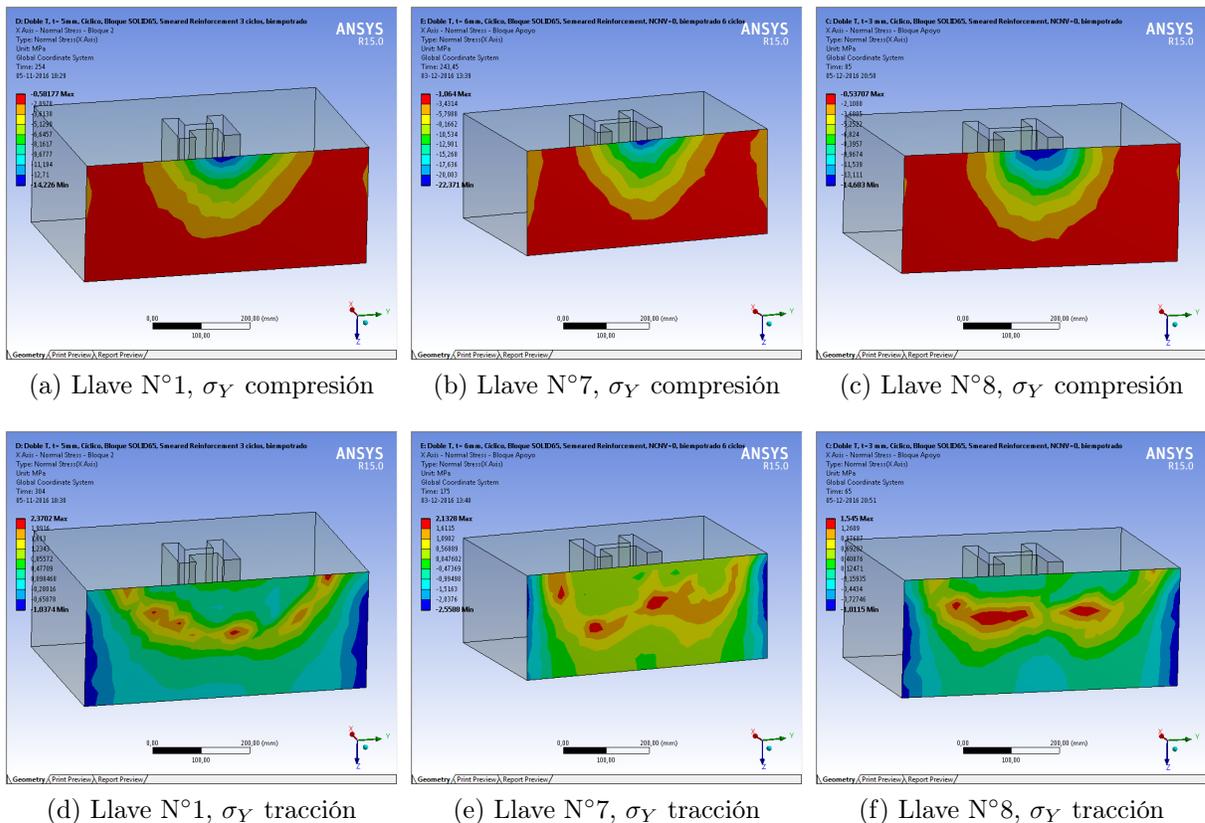


Figura 4.48: Tensiones normales en el apoyo, según dirección X

Deformaciones

Al analizar las deformaciones según el sentido del eje X , a partir de los resultados mostrados en la figura 4.49, se tiene que los mayores desplazamientos se generan en la zona en contacto con el grout a nivel del alma de las llaves.

Para los modelos con desplazamientos de hasta $10d_y$ se tiene que también existen deformaciones en las zonas en contacto con los extremos de las alas, lo que es consistente con el análisis de las tensiones principales. Para el modelo de la llave N°8, las deformaciones se concentran exclusivamente en las zonas en contacto con el alma, donde se alcanzan desplazamientos de hasta $5d_y$.

Lo anterior conlleva a que los desplazamientos sigan un patrón simétrico, como era de esperar, dado el análisis de las tensiones principales máximas y mínimas realizado en apartados anteriores.

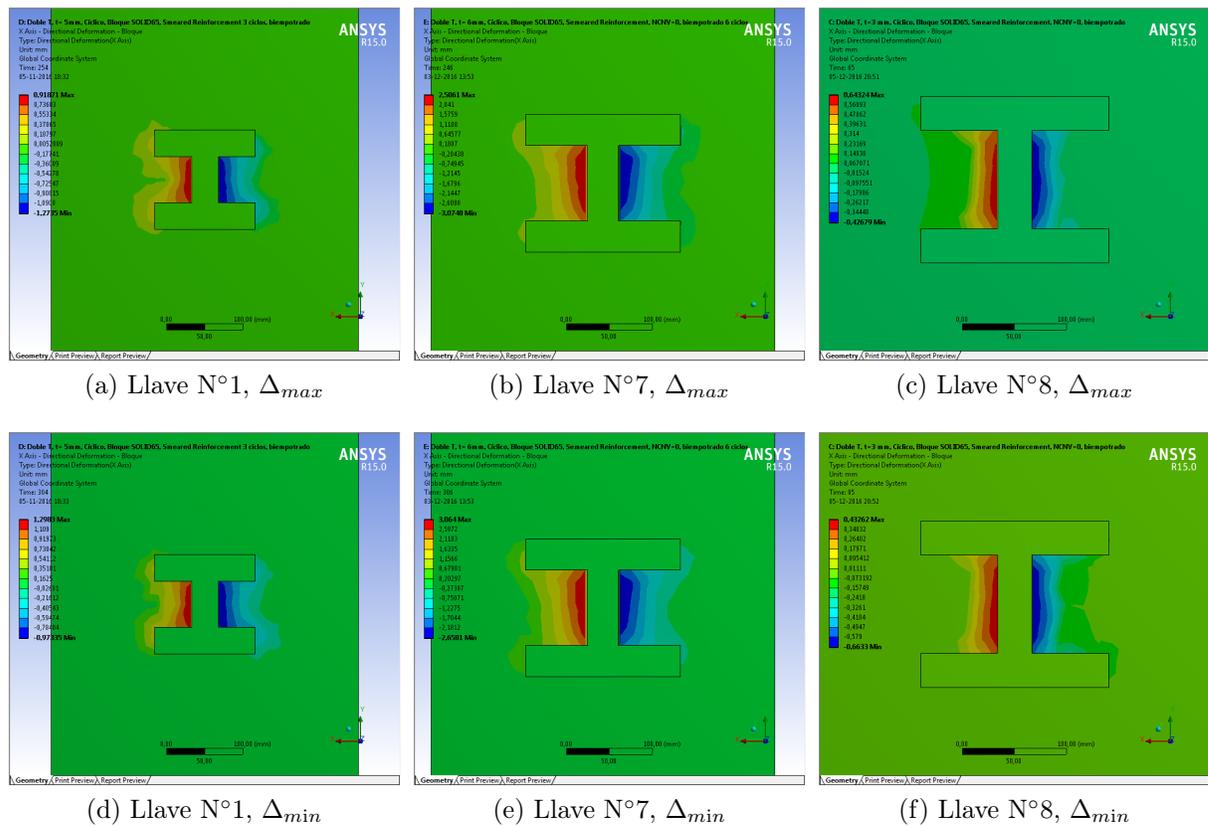


Figura 4.49: Deformaciones en el bloque de hormigón según dirección X

4.3.4. Comportamiento grout de nivelación

Dado que no se consideran modos de falla frágil para el grout de nivelación, se realiza un estudio del estado de las tensiones principales máximas y mínimas, contrastándolas con los límites resistentes del material. Además, se estudia el comportamiento de las deformaciones del elemento.

Tensiones principales

En las figuras 4.50, 4.51 y 4.52 se estudia la evolución de las tensiones principales mínimas para las llaves N°1, N°7 y N°8, respectivamente. Los resultados se presentan considerando aquellos valores que superan el límite de resistencia a la compresión del material (f'_c).

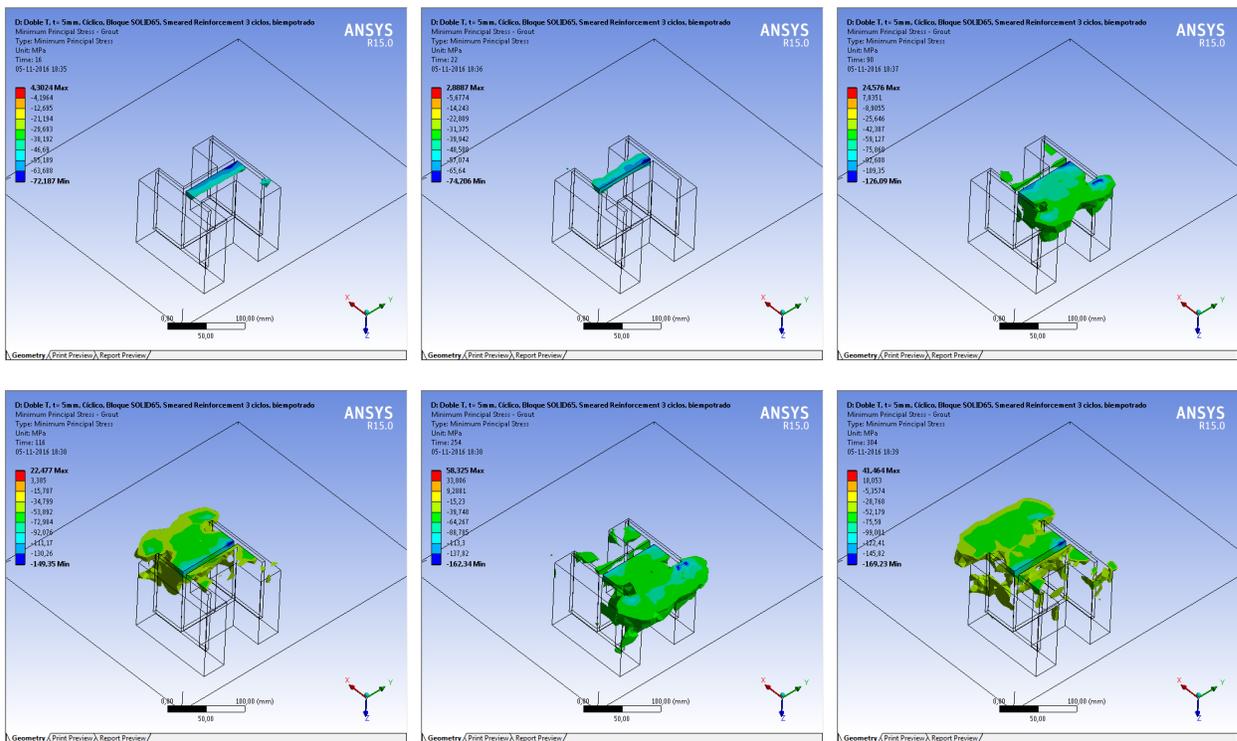


Figura 4.50: Evolución de las tensiones principales mínimas, llave N° 1

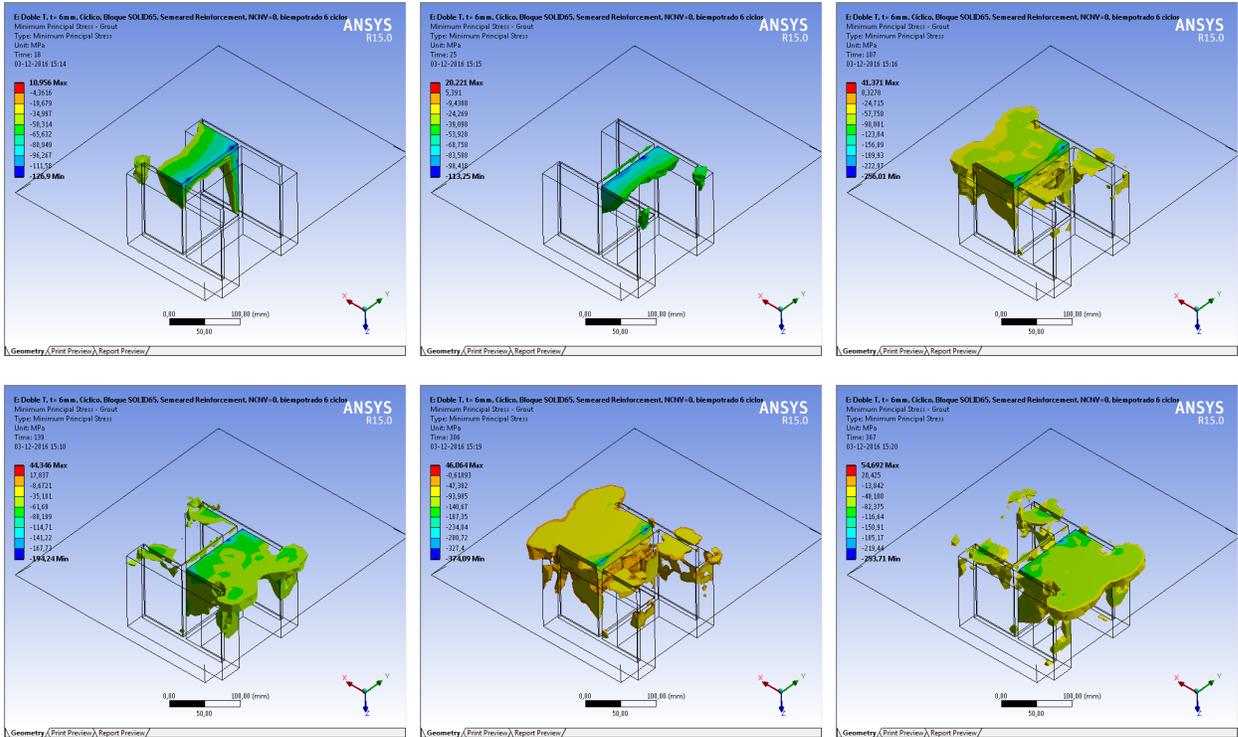


Figura 4.51: Evolución de las tensiones principales mínimas, llave N° 7

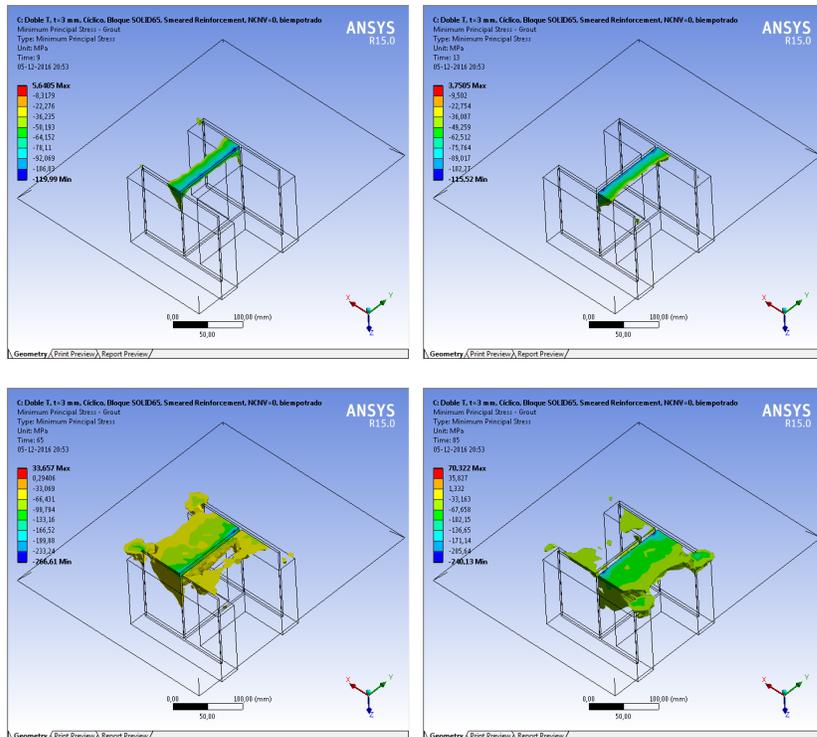


Figura 4.52: Evolución de las tensiones principales mínimas, llave N° 8

A partir de las figuras previas, se observa que existiría daño provocado por aplastamiento a partir de los primeros desplazamientos a d_y , el cual se concentra en la zona en contacto con el alma de la llave y aumenta al tener llaves más robustas.

Una vez que los desplazamientos alcanzan valores de $5d_y$, los sectores donde las tensiones superan al valor limitante de resistencia se ubican en el área encerrada entre el alma y las alas de la llave. El fenómeno anterior se enmarca dentro de lo esperable, dada las observaciones previas del comportamiento general del sistema y del estado de tensiones y deformaciones del bloque.

Las figuras 4.53, 4.54 y 4.55 muestran las tensiones principales máximas, cuando se alcanzan los máximos valores de desplazamiento.

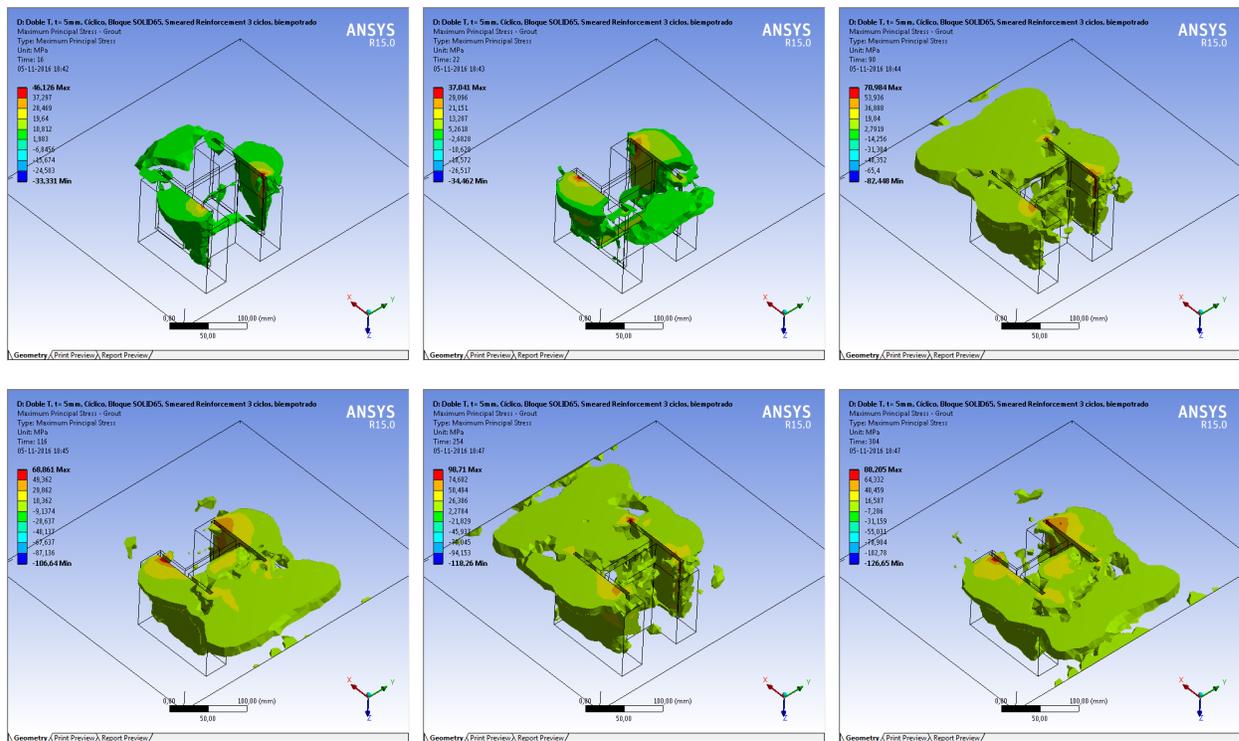


Figura 4.53: Evolución de las tensiones principales máximas, llave N° 1

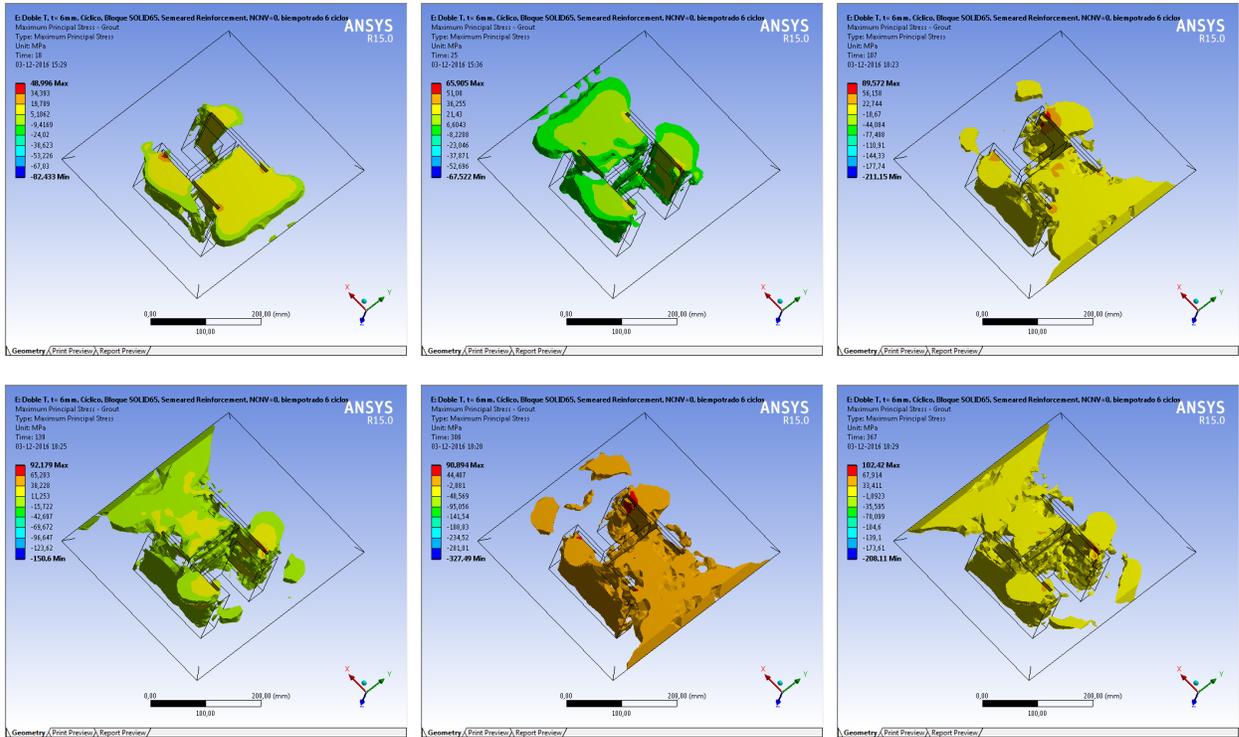


Figura 4.54: Evolución de las tensiones principales máximas, llave N° 7

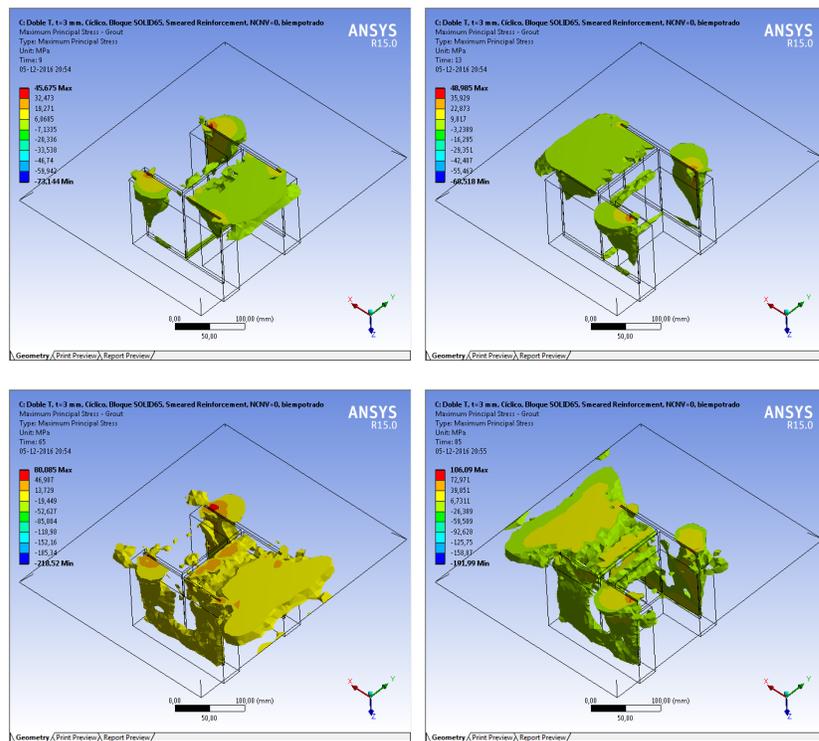


Figura 4.55: Evolución de las tensiones principales máximas, llave N° 8

Al analizar la evolución de las tensiones principales máximas, es posible identificar que en un comienzo la fricción entre las alas y el grout es la que genera esfuerzos de tracción en el material. Cabe señalar que en los resultados se destacan las tensiones por sobre la tensión de rotura definida para el material.

Al alcanzar desplazamientos de $5d_y$ se tiene una concentración de tensiones que superan la resistencia a la tracción en importantes sectores del grout, con lo que es de esperar que el daño por agrietamiento sea considerable.

Deformaciones

La figura 4.56 muestra la deformada direccional según el eje de desplazamiento de la placa, coincidente con el eje X .

El comportamiento observado obedece a las consideraciones realizadas previamente para el sistema, donde se tiene una distribución simétrica de las deformaciones, respecto del eje impuesto por el alma de las llaves, concentrada principalmente en el material contenido entre las alas y el alma.

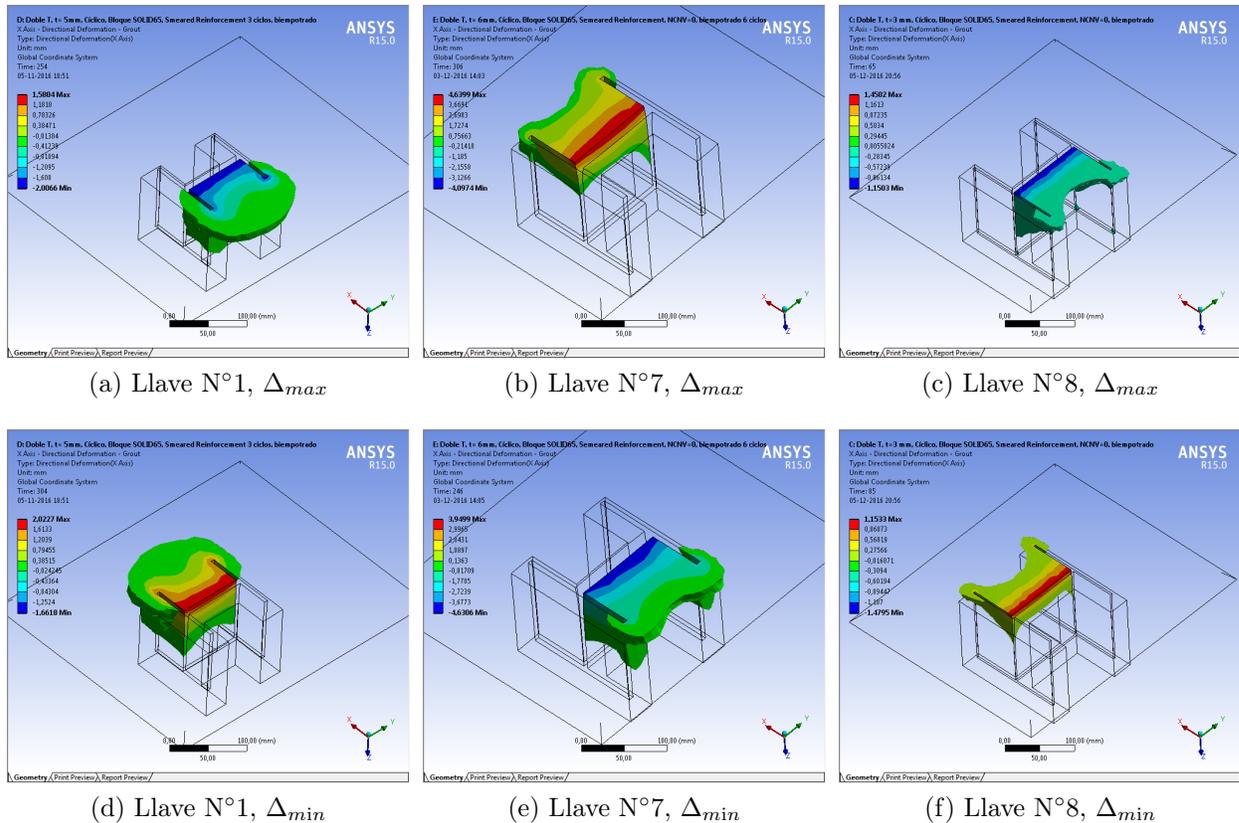


Figura 4.56: Deformaciones en grout de nivelación, según dirección X

4.4. Llaves de corte Doble T cargadas en el eje fuerte

En esta sección se presentan y discuten los resultados obtenidos para los modelos de llaves de corte en doble T, cargadas según su eje fuerte. La estructura de análisis sigue los lineamientos de los apartados previos.

4.4.1. Respuesta global del sistema estructural

El comportamiento global se caracteriza mediante las curvas de carga-desplazamiento y momento-desplazamiento. Cabe destacar que, como se menciona en la sección 3.4.6, la principal causa de no convergencia en los modelos se debe a la excesiva penetración entre los elementos, la que se vuelve más importante al aumentar la cantidad de material que falla por aplastamiento.

Debido a la configuración que se tiene en este caso, las zonas del bloque sometidas a aplastamiento por compresión resultan considerablemente mayores que en los modelos antes estudiados. Debido a lo anterior, de los tres modelos sólo se logra un análisis de cuatro ciclos completos para el de la llave N°8.

Corte

La figura 4.57 muestra la curva de carga-desplazamiento para la llave N°8, en los casos monotónico y cíclico.

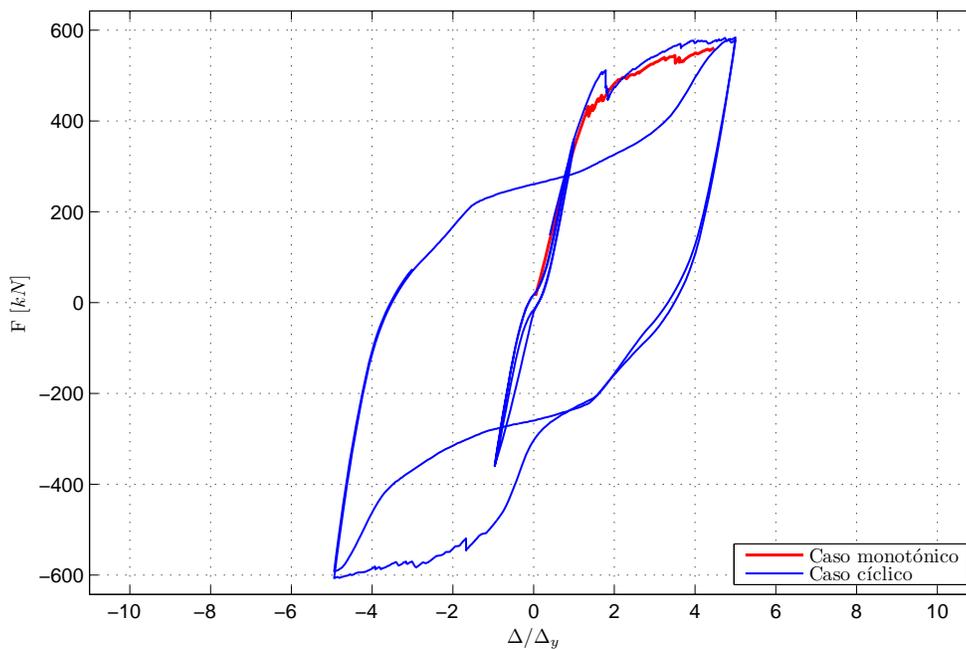


Figura 4.57: Carga vs desplazamiento, Llave N°8, geometría Doble T, cargada en el eje fuerte

Como se menciona anteriormente, el gráfico anterior muestra que para el modelo da la llave N°8 se logra un total de cuatro ciclos completos, a desplazamientos máximos de $5d_y$.

En cuanto al comportamiento observado, la curva del gráfico 4.57 obedece a los mismos patrones identificados tanto para las llaves en cruz, como para las llaves en doble T, cargadas en su eje débil.

Comparando con estas últimas, no obstante, se observa un mayor angostamiento de los aros de histéresis que el reportado para las llaves N°7 y N°8 (fig. 4.31 y 4.32), aun cuando en este caso la llave es más alta y ancha. Además, la rigidización parcial del hormigón es mas notoria al acercarse el valor de desplazamiento máximo, para los segundos ciclos a desplazamientos iguales a $5d_y$.

Este fenómeno se produce porque el cierre gradual de las grietas se realiza a desplazamientos cercanos a los peaks, lo que indica una mayor presencia de material fallando por aplastamiento en compresión.

Respecto de la fase de descarga, se tiene que la pendiente es similar a la observada en el rango elástico, resultado que es consistente con los de los modelos analizados anteriormente.

Flexión

La figura 4.58 muestra la curva de momento en la unión placa-llave, en función del desplazamiento de esta última. Los resultados se muestran ponderados por el momento de plasticificación de la sección transversal.

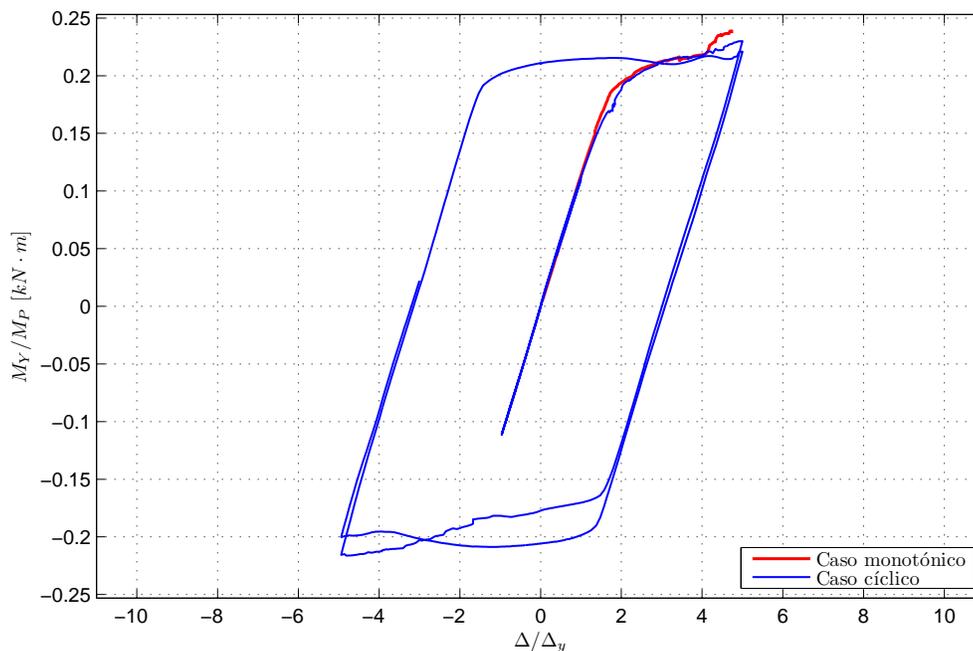


Figura 4.58: Momento vs desplazamiento, Llave N°8, geometría Doble T, cargada en el eje fuerte

De la figura anterior, se tiene que las solicitaciones de flexión no son importantes, en relación a una posible falla asociada a este mecanismo.

Comparativamente, no se observa un decaimiento importante desde el momento máximo al momento último, como si se observa en las otras configuraciones (fig 4.6 a 4.8 y 4.33 a 4.35). No obstante, este resultado es consistente con el comportamiento flexural observado en el caso monotónico, donde la llave N°8 presenta el menor decaimiento entre ambos estados de carga, respecto de las demás llaves analizadas (Ramaciotti, 2014).

El mejor desempeño a flexión en esta configuración se enmarca dentro de lo esperable, dada la mayor capacidad asociada a la orientación de la sección transversal y su relación con la dirección de las solicitaciones

4.4.2. Comportamiento llave de corte

A continuación, se analizan los estados de tensiones y deformaciones a los que es sometida la llave de corte.

Tensiones de corte

Se analizan las tensiones de corte según la dirección del eje Y , en un plano normal al eje Z , dado que así es posible caracterizar los esfuerzos de corte que impone el sentido del desplazamiento. La figura 4.59 muestra el estado de tensiones en la llave para los instantes de máximo desplazamiento de la placa base.

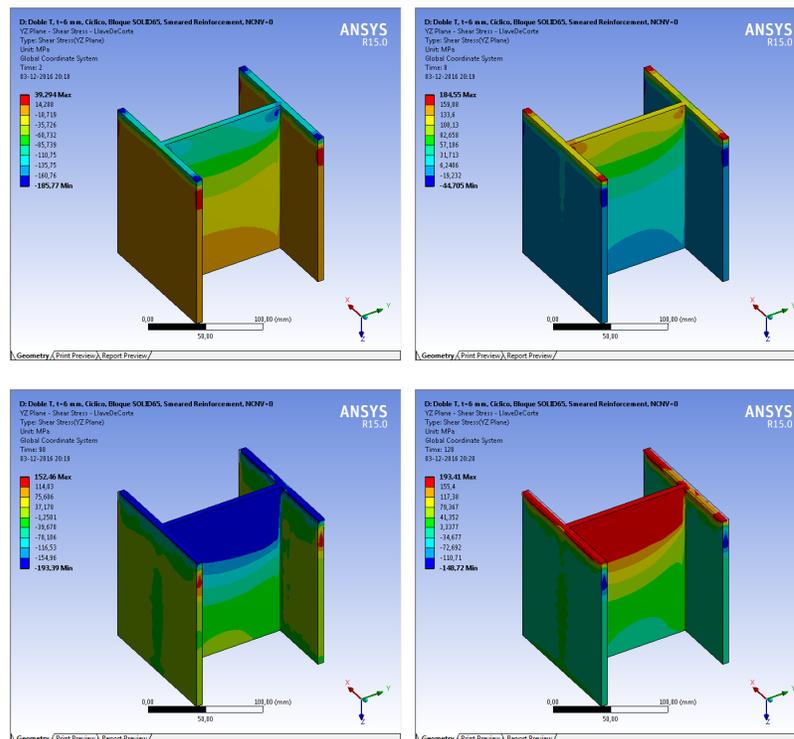


Figura 4.59: Evolución de las tensiones de corte τ_{XZ} , llave N°8

De la figura anterior se desprende que, en los primeros ciclos a desplazamientos elásticos, las tensiones máximas de corte se concentran en los extremos de las alas y del alma, en las zonas cercanas a la conexión con la placa base.

Luego, al incursionar en el rango inelástico se observa que se alcanzan valores máximos limitados por la tensión de fluencia al corte dada por $193[MPa]$, considerando $f_y = 335[MPa]$ en la ecuación 2.7. En cuanto a la distribución de tensiones, se observa que la mayor parte de la sección transversal de la base de la llave alcanza el valor de fluencia, y que las tensiones de corte se distribuyen en altura exclusivamente por el alma de la llave, lo que resulta consistente con lo observado en las demás configuraciones.

Tensiones normales

Para caracterizar el comportamiento a flexión de la llave, se analizan las tensiones normales según el eje vertical, detalladas en la figura 4.60.

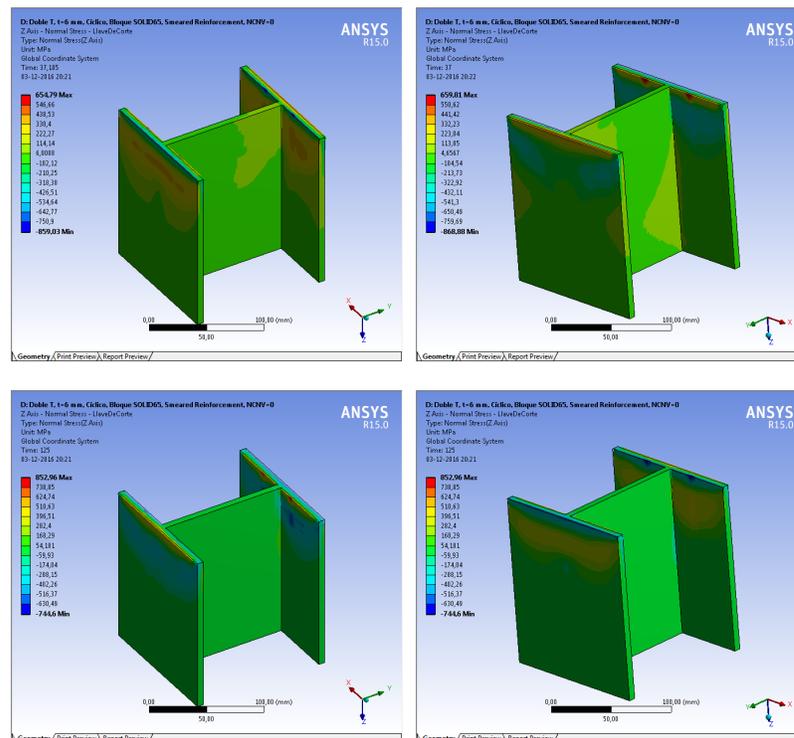


Figura 4.60: Tensión Normal eje Z, llave N° 8

Se observa una se tiene una baja concentración de tensiones normales. Los sectores más solicitados corresponden a los bordes superior e inferior de las alas de la llave, sometidos a esfuerzos de tracción y compresión, inducidos por la deformación que impone la placa base.

Además, existen tensiones localizadas en las alas, a profundidades cercanas a la zona donde existe la presencia de hormigón. Esto indica que las deformaciones se concentran desde la base de la llave hasta el comienzo del bloque, en un sector determinado aproximadamente por el espesor del grout de nivelación. Lo anterior guarda relación con las bajas solicitaciones de momento que se presentan (fig. 4.58).

Tensiones y deformaciones equivalentes de Von Mises

La figura 4.61 muestra el estado de las tensiones de von Mises en los instantes de máxima sollicitación de corte y de momento.

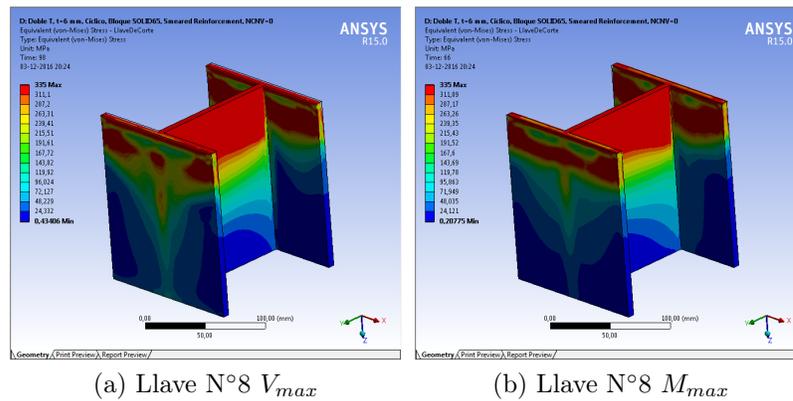


Figura 4.61: Tensiones equivalentes de Von Mises

Tomando en consideración lo observado en la figura 4.61 se tiene que las zonas de la llave donde se alcanzan tensiones de fluencia se concentran principalmente en el ala de la misma, desde la base conectada a la placa hasta aproximadamente un tercio de su profundidad. Además, existen sectores plastificados en las alas de la llave, en una profundidad cercana a la zona en contacto con el bloque de hormigón.

Esta distribución de las tensiones se explica de acuerdo a lo observado en los análisis de las tensiones normales y de corte.

Deformaciones

La figura 4.62 muestra la deformación en la llave según la dirección de carga, en los instantes que se tienen los desplazamientos de máxima sollicitación de corte y momento. Debido a que las deformaciones alcanzadas son bajas, se amplifica tres veces los resultados, para lograr una mejor visualización.

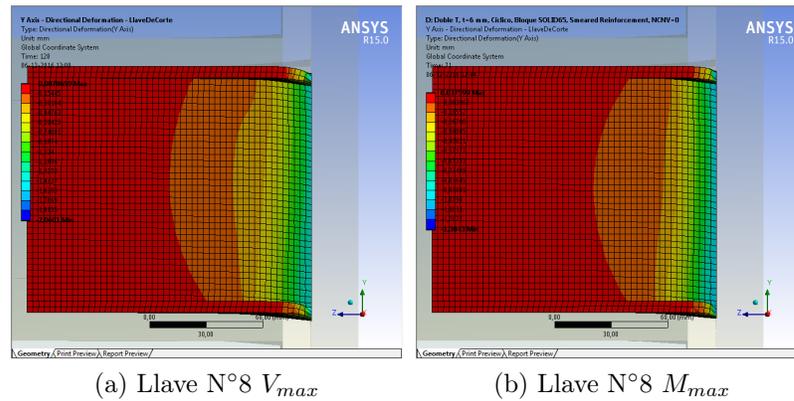


Figura 4.62: Deformada llave de corte

De la figura anterior se desprende que las mayores deformaciones se concentran en el extremo de la llave que se encuentra conectado a la placa base, observándose nulos desplazamientos en las zonas embebidas en el hormigón. Del patrón observado, se concluye que la deformada de la llave obedece a sollicitaciones de cortante.

Además, al igual que en los casos antes analizados, las mayores sollicitaciones de flexión ocurren en la fase de descarga, cuando la llave vuelve de su posición de máxima deformación.

4.4.3. Comportamiento bloque de hormigón

A continuación, se analiza el estado de tensiones y deformaciones del bloque de hormigón, identificando los mecanismos de falla asociados.

Tensiones principales

La figura 4.63 muestra la evolución de las tensiones principales mínimas en el bloque de hormigón a lo largo del análisis. Los resultados se presentan en los momentos de máximo desplazamiento.

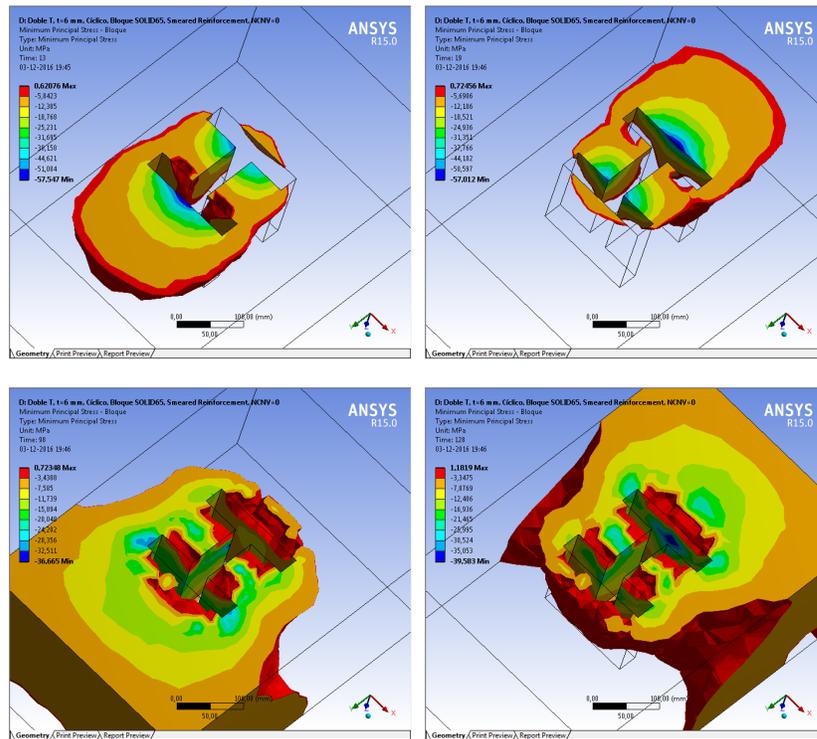


Figura 4.63: Evolución de las tensiones principales mínimas, llave N° 8

Del análisis de la distribución de las tensiones, se tiene que existen dos sectores afectos a mayores concentraciones. El primero de ellos corresponde al extremo exterior de las alas, en relación al sentido de carga. Para los ciclos iniciales se observa que las tensiones se distribuyen desde el centro del ala hacia el exterior, siguiendo un patrón casi parabólico.

El segundo corresponde al hormigón ubicado en las zonas de conexión entre el alma y el ala más lejana del apoyo que se comprime. En este caso, la distribución es similar a lo observado para las llaves en cruz (fig. 4.17, 4.18 y 4.19).

Para los ciclos de amplitudes $5d_y$ puede observarse daño por aplastamiento precisamente en las zonas donde se observaban las mayores concentraciones de tensiones, para los desplazamientos en el rango elástico de la llave. En cuanto a la variación en profundidad, el daño se localiza en el extremo superior de la casilla, lo que concuerda con el patrón de deformaciones observado en la llave de corte.

Por otra parte, dada la geometría de la llave y la dirección de carga, existe una mayor cantidad de elementos fallando por aplastamiento, lo que explica la mayor dificultad para lograr la convergencia en un número razonable de ciclos para los modelos con esta configuración.

A continuación, se presenta la evolución de las tensiones principales máximas en el bloque de hormigón.

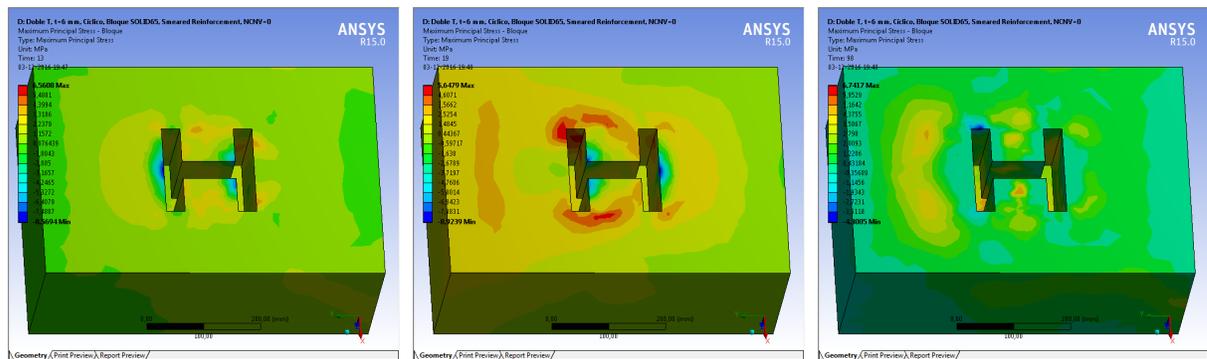


Figura 4.64: Evolución de las tensiones principales máximas, llaves en doble T N° 8 cargada en el eje fuerte

A partir de la figura 4.64, se tiene que para los ciclos de menor amplitud las tensiones de tracción siguen una distribución similar a la observada en los casos previos. Además, se observan concentraciones de tensiones en zonas paralelas pero no inmediatamente contiguas a las alas de la llave.

Lo anterior sugiere que puede presentarse agrietamiento del hormigón en dichos sectores, especialmente si se aplican desplazamientos de mayor consideración.

Tensiones normales en el apoyo

Para verificar la integridad de los sectores restringidos al desplazamiento en el bloque, se analizan las tensiones normales en una de las caras apoyadas, para los casos en que se tiene máxima tracción y máxima compresión.

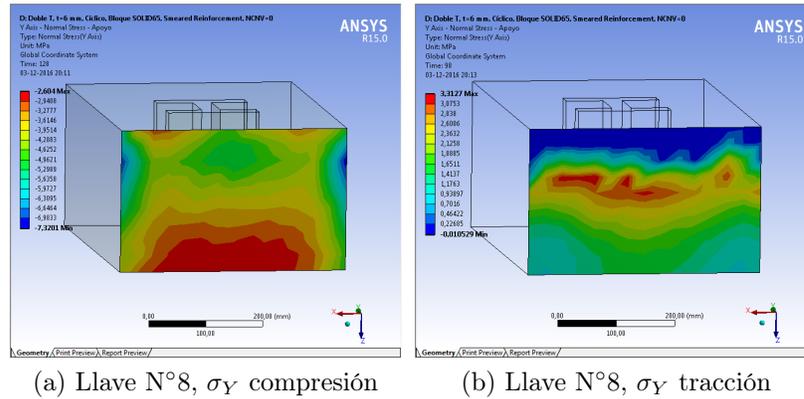


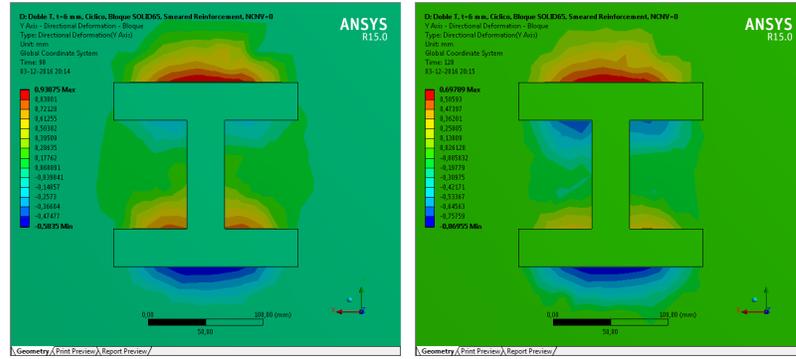
Figura 4.65: Tensiones normales en el apoyo, según dirección Y

De la figura 4.65 se desprende que, para los casos en que el desplazamiento se aplica hacia la cara apoyada, la totalidad de la cara del bloque se encuentra afectada a tensiones compresivas, alcanzándose los mayores valores hacia los bordes laterales, aproximadamente a dos tercios de la altura del bloque.

Para las tensiones de tracción, se observa que los máximos valores se concentran en una franja de tensiones localizada en el tercio superior del bloque, siguiendo un comportamiento similar al observado en las llaves en doble T cargadas según su eje débil. No obstante, las tensiones alcanzadas no superan la resistencia a la rotura del material.

Deformaciones

En la figura 4.66 se muestran las deformaciones en el bloque de hormigón según el eje X , correspondiente la dirección de aplicación de carga.



(a) Llave N°8, Δ_{max}

(b) Llave N°8, Δ_{min}

Figura 4.66: Deformaciones en el bloque de hormigón según dirección Y

Se observa que las mayores deformaciones se concentran en las zonas en contacto con las alas de la llave de corte, alcanzándose los máximos valores en el eje que determina el alma. Además, en menor medida, existen deformaciones concentradas en las zonas del bloque en contacto con la unión entre las alas y el alma.

La información de la figura anterior es consistente con lo observado para el estado de las tensiones principales y el daño reportado debido al aplastamiento del hormigón.

4.4.4. Comportamiento grout de nivelación

Se analiza a continuación el desempeño del grout de nivelación, de acuerdo a los parámetros definidos para las configuraciones anteriores.

Tensiones principales

Dado que no se reproducen las fallas frágiles del grout en los modelos, se comparan las tensiones principales con los límites resistentes definidos para el material.

La figura 4.63 muestra la evolución de las tensiones principales mínimas en el grout de nivelación, acotadas por la resistencia a la compresión.

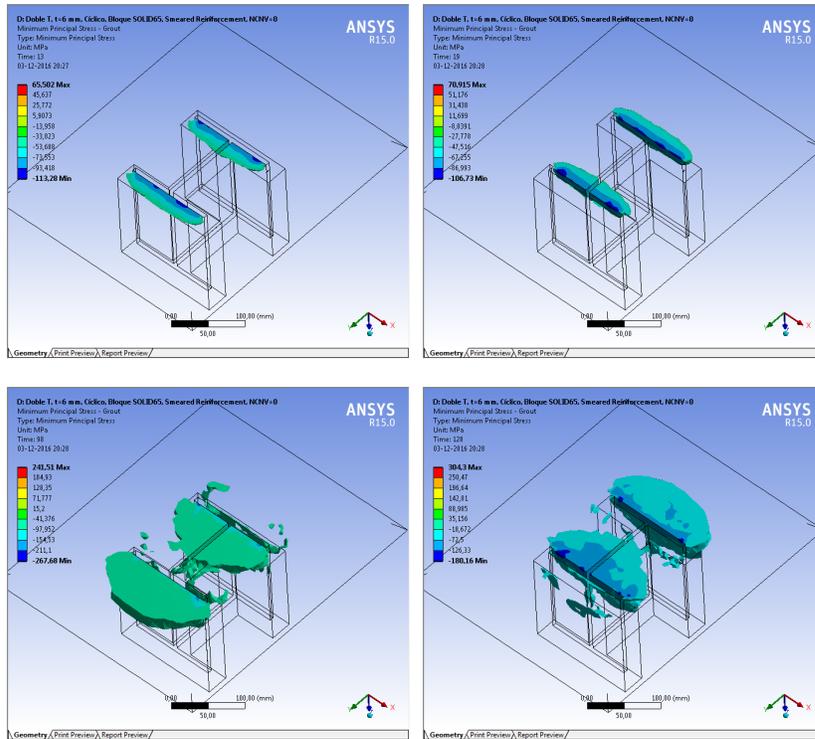


Figura 4.67: Evolución de las tensiones principales mínimas, llave N° 8

De la distribución de las tensiones se desprende que el daño por aplastamiento en el grout se concentraría en las zonas en contacto con las alas, de manera similar a lo observado para el bloque de hormigón. No obstante, para los ciclos iniciales se observa un patrón mas uniforme a lo largo de las alas, a diferencia de la forma en que se propagan las tensiones en el bloque para las mismas amplitudes de desplazamiento.

En la figura 4.68 se presenta la evolución de las tensiones principales máximas en el grout, en los instantes de máximo desplazamiento. Del análisis de ésta se desprende que puede existir daño por agrietamiento en toda la zona circundante a la llave de corte, fenómeno que se presenta ya a partir de los primeros ciclos de desplazamiento, aumentando luego la magnitud y cantidad de material afectada. Si bien lo anterior sugiere que puede verse comprometida la integridad del grout, el hecho de encontrarse confinado tanto por el bloque como por la placa base permite inferir que de ocurrir una falla frágil en este componente, el sistema sería capaz de seguir resistiendo las solicitaciones.

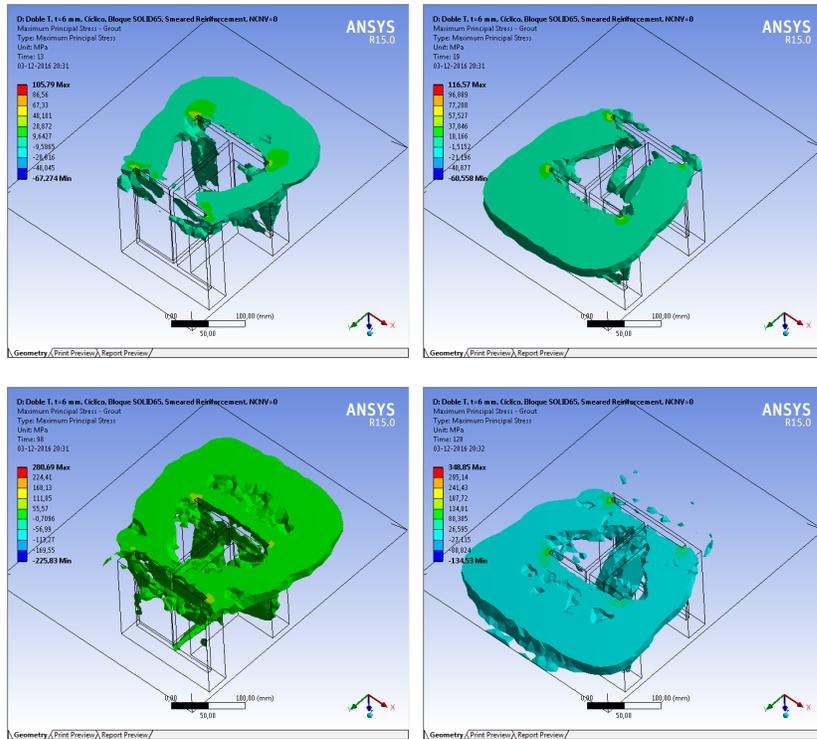
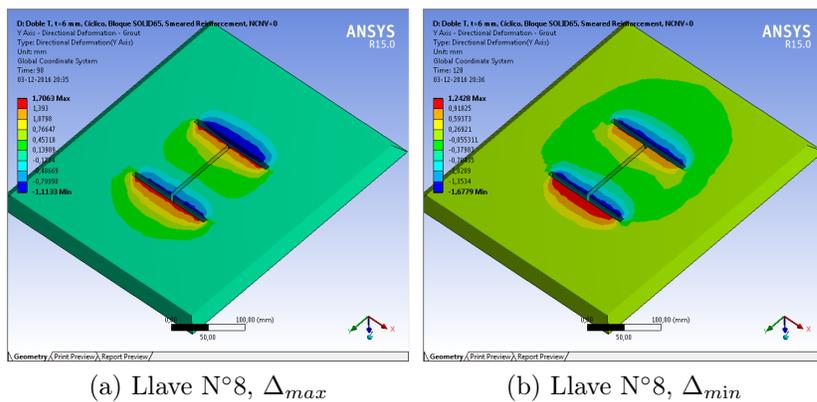


Figura 4.68: Evolución de las tensiones principales máximas, llave N° 8

Deformaciones

La figura 4.69 muestra las deformaciones en el grout de nivelación, donde se observa que las mayores deformaciones se concentran en los sectores que se encuentran en contacto con las alas de la llave, siendo consistente con la distribución de tensiones analizada en el apartado previo.



(a) Llave N°8, Δ_{max}

(b) Llave N°8, Δ_{min}

Figura 4.69: Deformaciones en grout de nivelación, según dirección Y

4.5. Degradación de la respuesta

A partir de las curvas de histéresis obtenidas para cada uno de los modelos, se analiza el deterioro de la rigidez y la resistencia del sistema estructural a lo largo del historial de desplazamiento cíclico, considerando el aporte realizado por la llave de corte.

4.5.1. Resistencia

Para evaluar la modificación de resistencia se comparan los máximos valores de carga obtenidos en cada ciclo, detallados en las tablas 4.1, 4.2 y 4.3. Dado que en los modelos es posible analizar la conexión llave-placa, se detallan también los valores máximos de fuerza de corte resistidos por dicha unión.

Tabla 4.1: Carga máxima por ciclo, llaves en cruz

Llave	Desplazamiento	Ciclo	Carga máxima	
			Apoyo [kN]	Llave [kN]
N°1	d_y	1	163.70	135.79
		2	163.25	135.44
	$5d_y$	3	231.34	170.11
		4	230.11	172.88
	$10d_y$	5	244.48	173.24
		6	231.50	169.45
N°4	d_y	1	278.12	268.49
		2	272.04	261.94
	$5d_y$	3	341.57	323.09
		4	318.45	301.94
N°6	d_y	1	315.12	308.51
		2	321.40	310.98
	$5d_y$	3	410.84	393.06
		4	404.15	385.01

Tabla 4.2: Carga máxima por ciclo, llaves en doble T cargadas en el eje débil

Llave	Desplazamiento	Ciclo	Carga máxima	
			Apoyo [kN]	Llave [kN]
N°1	d_y	1	182.45	178.00
		2	185.25	179.00
	$5d_y$	3	358.49	341.15
		4	374.16	344.02
	$10d_y$	5	409.56	372.15
		6	406.00	363.78
N°7	d_y	1	449.05	434.51
		2	442.78	418.41
	$5d_y$	3	575.16	535.99
		4	593.07	534.90
	$10d_y$	5	569.38	570.59
		6	563.46	567.14
N°8	d_y	1	230.81	224.61
		2	240.24	229.78
	$5d_y$	3	400.55	371.47
		4	407.10	361.01

Tabla 4.3: Carga máxima por ciclo, llaves en doble T cargadas en el eje fuerte

Llave	Desplazamiento	Ciclo	Carga máxima	
			Apoyo [kN]	Llave [kN]
N°8	d_y	1	349.26	344.85
		2	360.45	354.03
	$5d_y$	3	583.45	477.65
		4	584.03	518.93

De la información proporcionada por las tablas anteriores, se desprende que los modelos no indican la existencia de una degradación significativa en la carga máxima resistida por el sistema estructural. No obstante, para las llaves en cruz se observa una leve disminución para ciclos a un mismo desplazamiento, aunque la máxima variación no alcanza a superar el 7%. Para las llaves en doble, T cargadas en el eje débil, el comportamiento es menos regular, observándose tanto aumentos como disminuciones de la resistencia. En la llave cargada en el eje fuerte, en tanto, se observa un aumento de un 3% en la carga máxima resistida en ciclos a un mismo desplazamiento.

Complementariamente, debe considerarse que en la mayoría de los modelos sólo se tiene información de dos a cuatro ciclos posteriores al inicio del comportamiento no lineal de la llave. No obstante, al considerar también el comportamiento monótonico de las curvas calibradas, se descarta la presencia de un deterioro de la resistencia.

Por otro lado, se debe tener presente que en la modelación no se reproduce la falla por agrietamiento ni aplastamiento de los elementos del grout de nivelación, lo que podría repercutir en la carga máxima resistida por ciclo, tal como se ha observado en estudios experimentales de placas bases bajo cargas cíclicas (Kanvinde et al., 2009).

Respecto del comportamiento de las llaves de corte, se observa que las cargas resistidas por estos elementos alcanzan valores cercanos a los reportados en los apoyos del sistema, tomando al rededor de un 95 % de la carga máxima en los modelos de cruz, cerca de un 92 % de la carga máxima en los de doble T cargados en el eje débil y un 89 % en las llaves cargadas en el eje fuerte. Dadas las características y propósitos de las llaves, este comportamiento resulta ideal.

Para el caso de la llave N°1 en cruz se tiene una diferencia de un 38 %, escapando de la tendencia anterior. No obstante, dado que es uno de los modelos con mayor número y amplitud de ciclos completos, es posible que se esté subestimando su capacidad de carga al no considerar endurecimiento, debido al alto grado de incursión en el rango no lineal.

El gráfico de la figura 4.70 muestra los niveles de carga máxima resistidos por las llaves de corte y por el sistema en su totalidad.

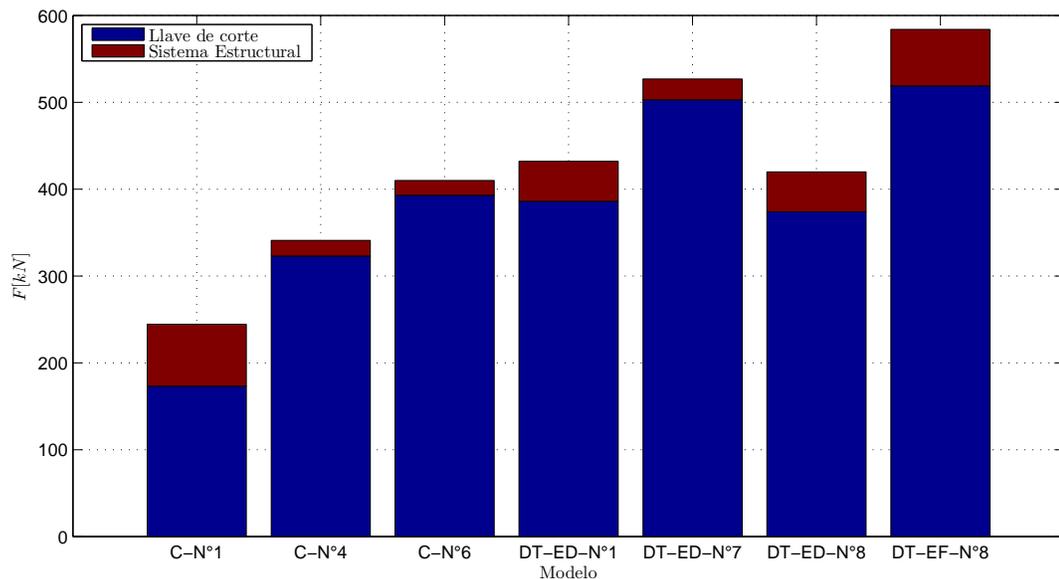


Figura 4.70: Carga resistida por la llave y por el sistema global

4.5.2. Rigidez

Para cuantificar la variación de rigidez se calcula la rigidez secante K_s en cada ciclo. En este análisis, se considera la rigidez secante como la razón entre la carga última alcanzada y su respectivo desplazamiento medido entre los peaks de un mismo ciclo. El parámetro de comparación corresponde a la rigidez elástica o rigidez tangente inicial K_e , la que se considera como la obtenida en los desplazamientos iniciales a d_y en la llave.

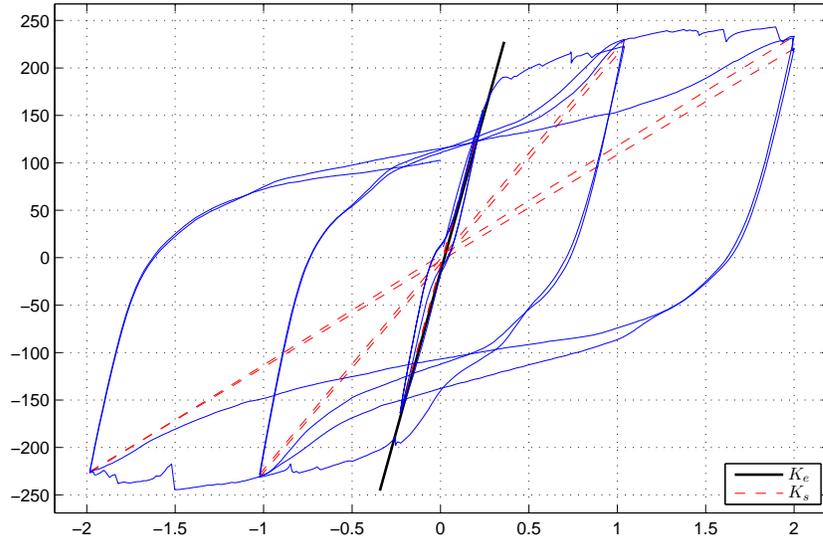


Figura 4.71: Rigidez tangente y secante

Las tablas 4.4, 4.5 y 4.6 muestran la degradación de rigidez experimentada en cada ciclo de carga.

Tabla 4.4: Degradación de la rigidez por ciclo, llaves en cruz

Llave	Desplazamiento	Ciclo	Rigidez secante [kN/mm]	$\frac{K_i}{K_e}$	Pérdida de rigidez [%]
N°1	d_y	1	673.62	1.00	0
		2	680.64	1.01	-1.04
	$5d_y$	3	220.14	0.33	67.32
		4	222.15	0.33	67.02
	$10d_y$	5	115.47	0.17	82.86
		6	111.89	0.16	83.39
N°4	d_y	1	614.16	1.00	0
		2	611.74	1.01	-0.93
	$5d_y$	3	162.25	0.26	73.58
		4	158.37	0.25	74.21
N°6	d_y	1	806.00	1.00	0
		2	813.52	1.01	-0.93
	$5d_y$	3	238.29	0.30	70.44
		4	234.95	0.29	70.85

Tabla 4.5: Degradación de la rigidez por ciclo, llaves en doble T cargadas en el eje débil

Llave	Desplazamiento	Ciclo	Rigidez secante [kN/mm]	$\frac{K_i}{K_e}$	Pérdida de rigidez [%]
N°1	d_y	1	781.43	1.00	0
		2	789.90	1.01	-1.08
	$5d_y$	3	354.394	0.45	54.65
		4	2362.33	0.46	53.63
	$10d_y$	5	205.28	0.26	73.73
		6	201.03	0.26	74.27
N°7	d_y	1	898.18	1.00	0
		2	885.59	0.99	1.40
	$5d_y$	3	244.81	0.27	72.74
		4	248.37	0.28	72.34
	$10d_y$	5	139.61	0.16	84.46
		6	139.86	0.16	84.43
N°8	d_y	1	792.89	1.00	0
		2	810.55	1.02	-2.23
	$5d_y$	3	271.29	0.34	65.79
		4	222.15	0.35	65.18

Tabla 4.6: Degradación de la rigidez por ciclo, llaves en doble T cargadas en el eje fuerte

Llave	Desplazamiento	Ciclo	Rigidez secante [kN/mm]	$\frac{K_i}{K_e}$	Pérdida de rigidez [%]
N°8	d_y	1	1202.00	1.00	0
		2	1221.94	1.02	-1.65
	$5d_y$	3	397.42	0.33	66.94
		4	394.37	0.33	67.19

Respecto de la evolución de la rigidez, en las tablas anteriores se cuantifica la relación entre la rigidez secante por ciclo versus la rigidez tangente inicial. Porcentualmente, las llaves en cruz son las que muestran, en promedio, una mayor variación para los primeros ciclos a $5d_y$, donde se alcanzan valores cercanos al 70 % para los tres modelos. Para la llave N°1, además, se tiene información de los ciclos con desplazamientos a $10d_y$, donde se observa una reducción cercana al 80 %.

Los modelos de llaves en doble T, cargados en el eje débil, alcanzan reducciones de hasta un 84 % de la rigidez inicial, en el caso de la llave N°7, la más robusta de las tres analizadas. Para la llave cargada en el eje fuerte la reducción de rigidez alcanza porcentajes cercanos al 67 %

Considerando ciclos de iguales desplazamientos, la degradación existe, pero a niveles poco significativos. Lo anterior, sumado a la formulación de la rigidez secante, confirma que la reducción de la resistencia no es relevante.

En las llaves N°1 y N°6 en cruz, N°1 en doble T, cargada tanto en su eje débil, y N°8 cargada según su el eje fuerte, se observa un valor negativo en la variación para el segundo ciclo a desplazamiento elástico de la llave, lo que indica una leve rigidización de la respuesta. No obstante, este efecto puede estar relacionado con variaciones en la carga máxima resistida en ambas ramas de los primeros ciclos de la curva de histéresis, dado los nulos o muy bajos niveles de aplastamiento en el hormigón que se alcanzan en dicho instante.

La figura 4.72 muestra la variación de la rigidez en función del desplazamiento aplicado, para los distintos modelos analizados.

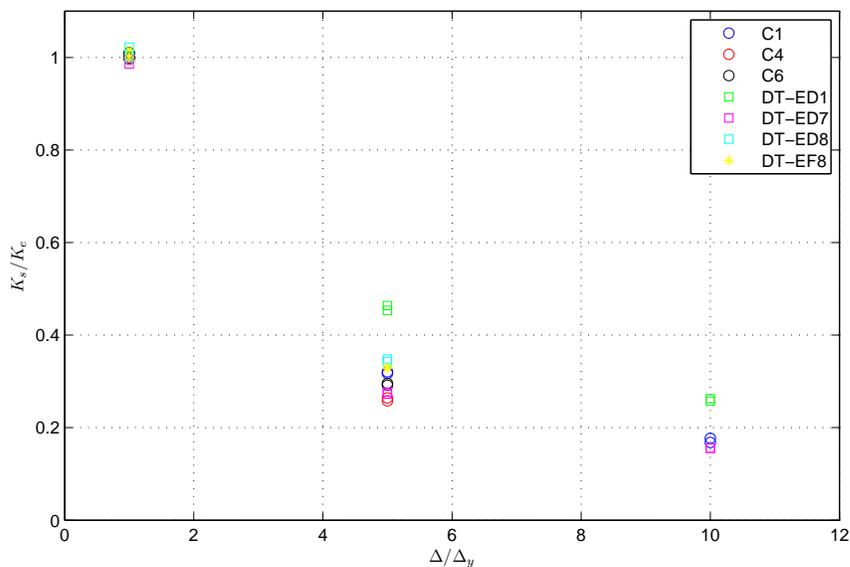


Figura 4.72: Variación porcentual de la rigidez secante respecto del desplazamiento

4.6. Energía histerética

Como una medida para analizar la capacidad de disipación de energía de los sistemas modelados, se estudia el comportamiento de la energía de histéresis y su variabilidad a lo largo de los ciclos desarrollados.

Las tablas 4.7, 4.8 y 4.9 detallan la energía asociada a cada aro de la curva de histéresis, como también su variación porcentual entre ciclos al mismo nivel de desplazamiento. Además, los gráficos de las figuras 4.73, 4.74 y 4.75 muestran este último fenómeno.

Tabla 4.7: Energía histerética disipada por ciclo, llaves en cruz

Llave	Desplazamiento	Ciclo	Energía Disipada [J]	Variación [%]
N°1	d_y	1	14.973	35.97
		2	9.587	
	$5d_y$	3	441.124	14.57
		4	376.857	
	$10d_y$	5	993.786	19.12
		6	803.781	
N°4	d_y	1	70.077	49.70
		2	35.250	
	$5d_y$	3	1190.102	29.45
		4	839.587	
N°6	d_y	1	57.086	65.56
		2	19.659	
	$5d_y$	3	1098.354	38.19
		4	678.849	

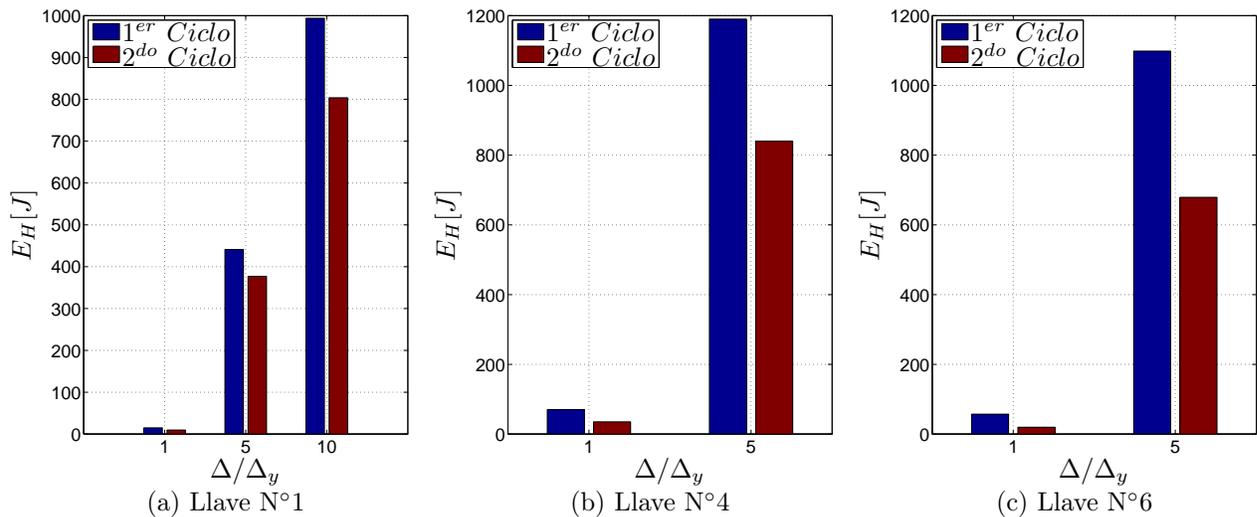
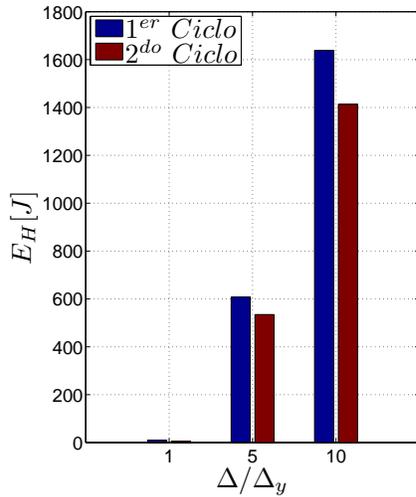


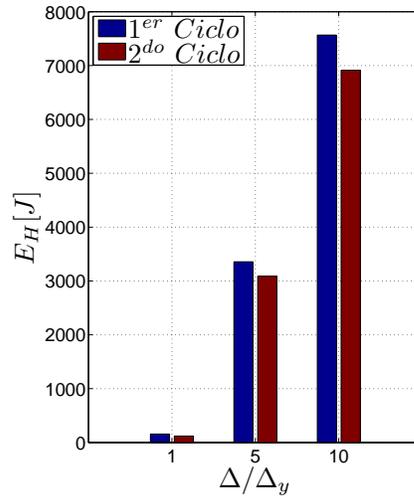
Figura 4.73: Energía histerética disipada, llaves en cruz

Tabla 4.8: Energía histerética disipada por ciclo, llaves en doble T cargadas en el eje débil

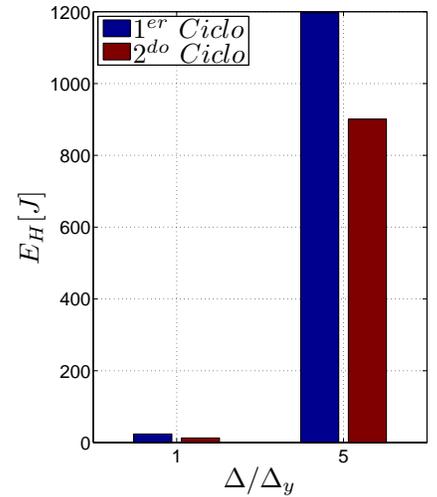
Llave	Desplazamiento	Ciclo	Energía Disipada [J]	Variación [%]
N°1	d_y	1	9.95	49.79
		2	5.04	
	$5d_y$	3	606.64	11.88
		4	534.58	
	$10d_y$	5	1637.71	13.72
		6	1412.88	
N°7	d_y	1	157.07	23.39
		2	120.31	
	$5d_y$	3	3355.78	8.01
		4	3086.94	
	$10d_y$	5	7575.84	8.64
		6	6911.74	
N°8	d_y	1	23.84	46.43
		2	12.68	
	$5d_y$	3	1197.04	24.80
		4	900.23	



(a) Llave N°1



(b) Llave N°7

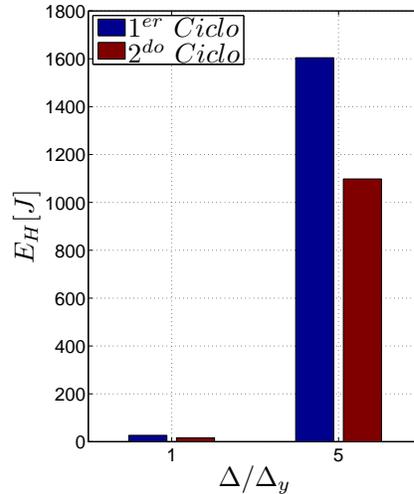


(c) Llave N°8

Figura 4.74: Energía histerética disipada, llaves en doble T cargadas en el eje débil

Tabla 4.9: Energía histerética disipada por ciclo, llaves en doble T cargadas en el eje fuerte

Llave	Desplazamiento	Ciclo	Energía Disipada [J]	Variación [%]
N°8	d_y	1	26.58	38.09
		2	16.54	
	$5d_y$	3	1604.51	31.58
		4	1097.84	



(a) Llave N°8

Figura 4.75: Energía histerética disipada, llave en doble T cargada en el eje fuerte

A partir de los gráficos y tablas anteriores, se tiene que la mayor disminución porcentual de la energía disipada ocurre durante los primeros ciclos, donde se alcanzan deformaciones de primera fluencia en la llave. Esta gran variación se explica por la poca cantidad de energía disipada en el ciclo y porque, dado los bajos niveles de deformación, cualquier incursión del hormigón en el rango no lineal resulta en agrietamiento y el consecuente angostamiento de los aros histeréticos.

Para las llaves N°4 y N°6 en cruz, de mayor espesor, se observa que la disminución de energía disipada alcanza valores mucho más significativos, al menos en el rango comparable de deformaciones. En el caso de las llaves en doble T cargadas en el eje débil, se observa que la energía disipada alcanza valores mucho mayores en la llave N°7 y N°8, al menos en el rango comparable de deformaciones, respecto de la llave N°1. Este fenómeno se explica principalmente porque en las llaves de mayor altura el angostamiento de la curva de histéresis resulta mucho menos importante que el observado en la curva carga-deformación del modelo de la llave N°1 (fig. 4.30). Para la llave N°8, cargada en el eje fuerte, se observan reducciones de entre 30 % y 40 %, alcanzando magnitudes similares al de las llaves N°7 y N°8, cargadas en el eje débil.

Capítulo 5

Conclusiones y comentarios

En este capítulo se presentan las conclusiones finales del trabajo de investigación desarrollado, considerando los diversos aspectos analizados. Se presentan además las limitaciones del estudio, y recomendaciones para futuras líneas de investigación.

En una primera parte, se discuten las modificaciones realizadas a los modelos y se analiza críticamente la validez de los resultados obtenidos. Posteriormente, se presentan las conclusiones atinentes al comportamiento global observado los sistemas modelados, para luego entregar los comentarios finales respecto de los componentes por separado.

5.1. Conclusiones

5.1.1. Calibración y desempeño de modelos de elementos finitos

La calibración de los modelos se realizó en base al ajuste de las curvas carga-desplazamiento reportadas en los estudios previos, tanto experimentales como numéricos. El comportamiento se vio alterado debido a las modificaciones realizadas en la modelación del bloque de hormigón armado, donde se buscó representar los modos de falla por aplastamiento y agrietamiento.

Considerado lo anterior, la primera parte del presente trabajo de investigación consistió en lograr la convergencia de los modelos para un número aceptable de ciclos de carga, de tal manera de lograr identificar fenómenos asociados al carácter cíclico del análisis. Tras el análisis de la influencia de distintos parámetros, se identificó que uno de los más relevantes corresponde a la falla de elementos de hormigón por aplastamiento.

En consecuencia, los modelos de llaves en cruz logran en general una mejor curva de convergencia respecto al número de iteraciones realizadas, siendo la llave de menor espesor la de mejor comportamiento. Para las llaves en doble T, este efecto junto a una mayor complejidad geométrica conducen a que el tiempo total de cálculo se vea incrementado.

Respecto de los modelos analizados, aún cuando se modifican parámetros de resistencia de los materiales, se asume que las variaciones en la respuesta corresponden principalmente a aspectos más cuantitativos que cualitativos, por lo que se acepta la validez de la modelación.

5.1.2. Comportamiento global de los sistemas y modos de falla

Del estudio del comportamiento global se tiene que los sistemas se ven afectados principalmente a solicitaciones de corte, las que se desarrollan mayoritariamente dentro del rango no lineal, indicando altos niveles de ductilidad. Sin embargo, a diferencia de los estudios para solicitaciones monotónicas, el carácter cíclico de los desplazamientos de la placa base conduce a una mayor importancia de la flexión en cuanto a los mecanismos de falla del sistema.

Gráficamente, los momentos máximos en la conexión placa-llave se alcanzan al modificarse la pendiente de la fase de descarga en las curvas de carga-desplazamiento, para luego decaer hasta su valor último. Por lo tanto, la ocurrencia del momento máximo marca el comienzo del comportamiento no lineal de los sistemas, dominado principalmente por las solicitaciones de corte.

El aumento paulatino de la sollicitación de flexión responde, por una parte, al continuo deterioro de los sectores cercanos a la casilla, que fallan debido a aplastamiento, con lo que las deformaciones de la llave aumentan mientras el material que confina al sistema grout-llave disminuye. Por otra parte los esfuerzos de flexión guardan estrecha relación con la deformación de la llave, ya que los momentos máximos se alcanzan cuando la llave intenta retornar a su posición inicial. El efecto se aprecia con mayor claridad para la llave N°4 en cruz (fig. 4.16).

Aún cuando los desplazamientos alcanzados en la modelación son de baja magnitud, las llaves alcanzan incluso momentos cercanos o por sobre el momento de plastificación, especialmente aquellas más robustas, exceptuando la configuración en doble T, cargada en el eje fuerte, donde la orientación de las solicitaciones favorecen a un mejor desempeño del sistema.

Respecto del comportamiento histerético de los sistemas, la inclusión del agrietamiento en el comportamiento a tracción del hormigón induce un deterioro de la rigidez expresado mediante el *pinching* o angostamiento de los aros de histéresis. A medida que aumenta el espesor de las llaves, aumenta la carga que éstas son capaces de resistir, y el deterioro de la rigidez se hace más prominente.

Consecuentemente, en los modelos con un *pinching* más pronunciado, la baja en la rigidez conlleva a una mayor toma de carga por parte de las llaves de corte, siendo la llave N°1 en cruz la que presenta una menor participación de este elemento, resistiendo un 70 % de la carga total.

En base a lo anterior y al estudio del daño localizado en el bloque de hormigón, es de esperar que los modos de falla del sistema correspondan a fallas dúctiles en la llave, asociadas principalmente a esfuerzos de corte, por sobre fallas frágiles en el hormigón.

5.1.3. Llave de corte

Del estudio de tensiones y deformaciones en las llaves de corte, puede concluirse que éstas se ven sometidas a esfuerzos importantes que se desarrollan mayormente en el rango inelástico, siendo el cortante puro el de mayor relevancia.

No obstante, bajo las condiciones cíclicas del análisis, los esfuerzos de flexión adquieren mayor importancia, principalmente en la transición entre las fases de descarga y recarga, donde se dan las condiciones para alcanzar la plastificación por flexión. A pesar de esto, al ingresar al rango inelástico el comportamiento de la llave queda controlado por los esfuerzos de corte.

Por lo anterior, se concluye que la llave presenta un comportamiento dúctil en el sistema, y que la falla por corte es la que controla el desempeño de este componente.

5.1.4. Bloque de Hormigón

Las modificaciones realizadas al modelamiento del comportamiento del hormigón afectan significativamente en los resultados obtenidos. En primer lugar, la inclusión del aplastamiento limita la carga máxima que los sistemas globales son capaces de soportar, representando de buena manera el comportamiento en el rango no lineal, reportado por la evidencia experimental.

Para el comportamiento en tracción, en tanto, el agrietamiento paulatino de los elementos del bloque genera un ablandamiento gradual de la respuesta. El posterior desplazamiento en el sentido contrario, provoca el cierre gradual de las grietas generadas en tracción, con lo que se tiene una rigidización parcial de la respuesta. El comportamiento reiterativo anterior queda expresado en el estrechamiento de los aros del ciclo histerético.

Aún cuando los modelos reportan daño por aplastamiento y agrietamiento, en los casos en que la carga es aplicada según la dirección larga del bloque, dichos efectos se producen en sectores más bien acotados a la vecindad de la casilla donde la llave se inserta, siendo más probable una falla dúctil asociada a la plastificación por corte de las llaves.

En el caso de las doble T cargadas según el eje débil, en cambio, donde la carga se aplica siguiendo la dirección corta del bloque, se obtienen importantes concentraciones de tensiones en el material, efecto que se explica principalmente por la menor cantidad de material existente entre la casilla y los apoyos. Considerando los bajos niveles de desplazamiento alcanzados, una falla frágil en el bloque no es del todo descartable, aun cuando es la llave la que toma el mayor porcentaje de la carga total resistida.

Para el caso de las llaves cargadas según su eje fuerte, el daño por aplastamiento se localiza tanto en los sectores en contacto con las alas, como en el material comprendido entre ellas. Si bien el nivel de desplazamientos aplicado en esta configuración es bajo, a mayores amplitudes es de suponer la pérdida de todo el hormigón entre las alas. Por lo tanto, despreciar la resistencia aportada por dicho material, en términos de diseño, resulta razonable.

5.1.5. Grout de nivelación

El modelo empleado en la representación del grout no permite simular las condiciones de falla que se emplean en el bloque de hormigón. Sin embargo, del análisis de tensiones y deformaciones del mismo se infiere que el daño generado se concentra principalmente en la zona en contacto con la base de la llave, donde la misma está soldada a la placa, y en zonas donde el grout se encuentra embebido en la casilla generada por el bloque. Debido a lo anterior, existe la posibilidad de que se vea comprometida la integridad del mismo.

No obstante lo anterior, debe considerarse que el grout se encuentra confinado inferiormente por la casilla del bloque y superiormente por la placa base, con lo que en caso de fallar frágilmente el material, los sistemas no ven comprometida su capacidad de seguir resistiendo carga. Por lo mismo, la no representación de una degradación de la resistencia de los sistemas es atribuible en parte al modelo de grout empleado.

5.1.6. Energía disipada

La energía disipada se calcula como el área contenida por los ciclos de histéresis. Por lo tanto, queda determinada tanto por la carga máxima resistida como por el nivel de angostamiento de los aros. A causa de lo anterior, al aumentar la capacidad de carga de las llaves aumenta la energía disipada por los sistemas.

No obstante, a mayores solicitaciones aumenta la cantidad de hormigón sometidas a esfuerzos inelásticos de compresión y a esfuerzos de tracción, con lo que la disminución de la capacidad de disipación de energía adquiere mayor importancia.

Considerando también que del diseño es esperable que la mayor disipación de energía ocurra en los elementos pertenecientes a la estructura en sí, antes de que se genere la falla de las llaves de corte, se deduce que el comportamiento registrado es aceptable.

5.2. Limitaciones y recomendaciones para futuras líneas de investigación

Se presentan a continuación las principales limitaciones a las se encuentra sujeto el análisis, las que guardan relación principalmente con simplificaciones realizadas en la modelación.

- No se modelan los fenómenos de agrietamiento por tracción ni aplastamiento por compresión en el grout de nivelación.
- Si bien se incluye una primera aproximación de la modelación de la armadura de refuerzo, ésta no es representada físicamente en los modelos. Debido a esto, no se reproduce el comportamiento real de dicho elemento, ni tampoco el efecto del confinamiento en el hormigón. Por lo demás, al no considerar las barras de refuerzo como tal, no se simula una posible pérdida de adherencia entre éstas y el hormigón. Este último fenómeno, sumado a las condiciones antes citadas del grout de nivelación, se conjugan para no representar una posible reducción de resistencia de los sistemas.
- Debido a la mayor complejidad que involucra la simulación de fisuración y aplastamiento en el hormigón, los modelos no logran completar un número significativo de ciclos de carga, con lo cual los resultados son acotados a desplazamientos de baja amplitud.
- No se incluye a los pernos de anclaje como componente de los sistemas modelados, con lo que su efecto no se reproduce en la respuesta global y local de los sistemas.
- No existe evidencia experimental con la cual contrastar los resultados obtenidos.

Las recomendaciones para futuros análisis guardan estrecha relación con las limitaciones recién señaladas.

- Realización de ensayos experimentales de carácter cíclico para las distintas configuraciones geométricas aquí analizada, además de otras posibles configuraciones.
- En caso de trabajos de modelación, la inclusión de elementos obviados en este estudio, como la representación por elementos finitos de las barras de refuerzo y los pernos de anclaje.
- En cualquiera de los casos anteriores, aplicar solicitaciones a las que se ven sometidas las placas base de columnas, como flexión, corte y carga axial.
- Realización de estudios que vayan más allá del análisis estático, como algún tipo de análisis sísmico.

Bibliografía

- ACI (2008). *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*. American Concrete Institute, EEUU, 1st edition.
- Aguirre, C. (2009). *Non Linear Behavior of Shear Lugs and Steel Buildings Response*. Proceedings of the 6th International Conference on Behaviour of Steel Structures in Seismic Areas - STESSA, Philadelphia, Pennsylvania, USA.
- AISC (2003). *Steel Design Guide N 1: Base Plate and Anchor Rod Design*. American Institute of Steel Construction, EEUU, 2nd edition.
- AISC (2005). *Steel Design Guide N 7: Industrial Buildings, Roofs to Anchor Rods*. American Institute of Steel Construction, EEUU, 2nd edition.
- AISC (2010). *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*. American Institute of Steel Construction, Chicago, Illinois, 1st edition.
- ANSYS (2009). *ANSYS Workbench User's Guide*. ANSYS Inc., Southpointe, 12.1 edition.
- Bedoya Ruiz, D. and Álvarez Betancur, D. (2009). Comportamiento de viviendas de ferrocemento bajo cargas cíclicas. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 8:37 – 46.
- Goldman, C. (1983). Design of Column Base Plates and Anchor Bolts for Uplift and Shear. *Structural Engineering Practice*, 2:103 – 115.
- ICHA (2003). *Manual de Diseño para Estructuras de Acero*. Instituto Chileno de Acero, Santiago, Chile.
- INN (2003). *Diseño Sísmico de Estructuras e Instalaciones Industriales*. Instituto Nacional de Normalización, Santiago, Chile.
- Kanvinde, A., Gomez, I., Smith, C., and Deierlein, G. (2009). *Shear transfer in exposed column base plates*. American Institute of Steel Construction, Stanford University and University of California, Davis.
- Kharod, U. J. (1980). Design of Column Base Plates and Anchor Bolts for Uplift and Shear. *Engineering Journal, AISC*, 17:22 – 23.

- Lee, H. (2014). *Finite Element Simulations with ANSYS Workbench 15: Theory, Applications, Case Studies*. Schroff Development Corporation.
- Núñez, O. (2014). Estudio numérico de llaves corte de acero en cruz para placas base de columnas, memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile.
- Palma, I. (2008). Estudio experimental de llaves de corte en cruz, Tesis de Magíster, Universidad Técnica Federico Santa María.
- Ramaciotti, F. (2014). Análisis numérico de llaves de corte con geometría doble T, memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile.
- Silva, J. (2012). Estudio experimental de llaves de corte en I, memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad Técnica Federico Santa María.
- Spiegel, M., Liu, J., Abellanas, L., and Rapún, L. (2005). *Fórmulas y tablas de matemática aplicada*. Serie Schaum. McGraw-Hill.
- Villar, E. (2013). Estudio experimental de llaves de corte en H, memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad Técnica Federico Santa María.