



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

**ANÁLISIS NUMÉRICO DE LLAVES DE CORTE CON GEOMETRÍA  
DOBLE T**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TITULO DE INGENIERIA CIVIL**

**FLORENCIA RAMACIOTTI MORALES**

**PROFESOR GUÍA**

RICARDO ANTONIO HERRERA MARDONES

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN**

JUAN FELIPE BELTRÁN MORALES  
CARLOS AGUIRRE AHUMADA

SANTIAGO DE CHILE

2014

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL  
TÍTULO DE: Ingeniera Civil  
POR: Florencia Ramaciotti Morales  
Fecha: 22/09/2014  
PROFESOR GUÍA: Ricardo Herrera Mardones

## **ANÁLISIS NUMÉRICO DE LLAVES DE CORTE CON GEOMETRÍA DOBLE T**

Una llave de corte es un elemento estructural de acero que traspasa esfuerzos de corte desde una columna de acero, a la fundación de hormigón. Éste se encuentra embebido dentro del bloque de la fundación, y su presencia es esencial cuando existen grandes solicitaciones de corte basal, como las que se tienen durante un sismo.

La práctica de diseño actual se rige según una metodología propuesta por la AISC en su publicación "Steel Design Guide n°1: Base Plate and Anchor Rod Design" (2006). En ésta se tiene como supuesto que la llave de corte embebida en el hormigón se comporta como una viga en cantiléver, empotrada a la placa base y sometida a una fuerza distribuida, dada por la presión del hormigón en compresión contra la llave. Según esto se reconocen dos estados de falla: Falla por capacidad del hormigón en la fundación y falla plástica por flexión en el acero de la llave de corte. Sin embargo, trabajos experimentales realizados en la Universidad Federico Santa María, a llaves con diferente geometría, sugieren que este supuesto es incorrecto y que la falla por flexión en la llave no ocurriría. Lo que ocurre en cambio, es una falla plástica por corte.

El objetivo de este trabajo es realizar un análisis numérico de llaves de corte con geometría doble T, con el fin de determinar si se cumple el supuesto adoptado por la AISC, y establecer si ocurre una falla plástica por flexión en la llave de corte. Para esto se utiliza el software ANSYS *workbench*, y se modelan 6 llaves con geometrías ensayadas (3 llaves cargadas en su eje fuerte, y 3 cargadas en su eje débil), que hayan presentado una falla por corte en la llave, y se lleva a cabo un proceso de calibración del modelo con los datos experimentales, proporcionados por el profesor Carlos Aguirre.

Los modelos calibrados son analizados en su respuesta en tensión y deformación, lo que permite concluir que los modos de falla obtenidos corresponden a plastificación en la llave por corte.

## **Agradecimientos**

Quisiera agradecer a mi profesor guía, Ricardo Herrera, por su gran apoyo durante este año, y al profesor Felipe Beltrán por aportar con sus conocimientos y consejos. Al profesor Calor Aguirre, y a los Ingenieros Civiles José Silva y Eduardo Villar por la facilitación de los datos de los ensayos sin los cuales hubiera sido imposible la realización de este trabajo.

Agradecer a mi familia. Mis papás, mis dos hermanos, y mi abuela Herminia. Gracias por todo el amor que me han dado, y por todo lo que cada uno me ha enseñado.

A mi pololo, José Ignacio, por siempre quererme, entenderme y acompañarme. Por darme un importantísimo apoyo para lograr completar esta etapa en mi vida.

También quiero agradecer a mis amigas que me han acompañado desde el colegio. Sofía, Francisca, Soledad, Constanza, Daniela, Javiera, Paloma, Paulina y Catalina. Por los años de diversión y por entendernos y complementarnos en nuestras diferencias.

A mis amigas que están conmigo desde mechas. Carolina, Daniela, Fernanda y Carmen.

A mis amigos civiles, María Paz, Francisca, Cristóbal y a todos mis amigos de "la pecera". Estos últimos años hubieran sido muy distintos sin ellos. Gracias por todo el conocimiento aportado y por estos años de amistad.

Gracias a todos.

## Tabla de Contenido

Agradecimientos.....	II
Capítulo 1: Introducción .....	1
1.1. Motivación .....	1
1.2. Objetivos .....	2
1.2.1. Objetivo General .....	2
1.2.2. Objetivos Específicos.....	2
1.3. Metodología .....	2
1.4. Alcances .....	2
Capítulo 2: Antecedentes y Marco Teórico.....	4
2.1. Normas Chilenas.....	4
2.1.1. NCh 2396 Of.2003 (INN, 2003) .....	4
2.1.2. Manual de Diseño para Estructuras de Acero, (ICHA, 2000) .....	4
2.2. Normas Extranjeras .....	5
2.2.1. Steel Design Guide N°1 "Column Base Plate" (AISC, 2003) .....	5
2.2.2. ACI349-01Code Requirements for Nuclear Safety Related to Concrete Structures (ACI 349-01) .....	7
2.3. Trabajos Experimentales.....	7
2.4. Trabajos Anteriores.....	9
2.5. Marco Teórico.....	9
2.5.1. Viga en voladizo .....	10
2.5.2. Fluencia por esfuerzos de corte en la sección transversal .....	12
Capítulo 3: Datos experimentales y capacidades teóricas.....	13
3.1. Instalación del ensayo .....	13
3.2. Materiales .....	16
3.2.1. Hormigón .....	16
3.2.2. Mortero (grout) .....	16
3.2.3. Acero A36.....	17
3.2.4. Pernos de anclaje .....	18
3.3. Dimensiones Ensayos .....	20

3.4.	Estimación de capacidades nominales y selección de ensayos.....	21
3.5.	Propiedades geométricas de las llaves seleccionadas .....	23
3.5.1.	Llaves cargadas en su eje fuerte.....	23
3.5.2.	Llaves cargadas en su eje débil .....	23
Capítulo 4: Modelo Elementos finitos.....		24
4.1.	Descripción General .....	24
4.2.	Solicitaciones y Condiciones de Borde.....	25
4.3.	Geometría de los Especímenes Modelados.....	26
4.4.	Contactos .....	26
4.5.	Mallado .....	27
4.6.	Elementos.....	28
	Solid 285.....	29
	Solid 185.....	29
	Conta 174 .....	30
	Targe 170.....	30
4.7.	Materiales .....	31
4.7.1.	Hormigón .....	31
4.7.2.	Grout .....	33
4.7.3.	Acero .....	34
4.8.	Calibración Modelo de Elementos Finitos .....	35
4.8.1.	Modelos de curvas deformación-tensión para el hormigón.....	36
4.8.2.	Modelos de curva deformación-tensión para el acero: .....	38
4.8.3.	Coeficiente de fricción .....	39
4.9.	Resumen modelo ANYS .....	40
Capítulo 5: Resultados obtenidos de los modelos ANSYS .....		41
5.1.	Desplazamientos en la llave de corte.....	41
5.1.1.	Modelos con carga aplicada en el eje fuerte .....	41
5.1.2.	Modelos con carga aplicada en el eje débil .....	43
5.2.	Tensiones en la llave de corte para llaves cargadas en su eje fuerte	44
5.2.1.	Tensiones de corte.....	44

5.2.2.	Tensiones normales en Z .....	45
5.2.3.	Tensión Equivalente Von Mises .....	47
5.2.4.	Evolución de las tensiones .....	49
5.3.	Tensiones en la llave de corte para llaves cargadas en su eje débil 51	
5.3.1.	Tensiones de corte.....	51
5.3.2.	Tensiones normales en Z .....	53
5.3.3.	Tensiones equivalentes de Von Mises .....	54
5.3.4.	Evolución de las tensiones .....	57
5.4.	Análisis del bloque de hormigón y grout.....	59
5.4.1.	Deformada bloque de hormigón.....	59
5.4.2.	Tensiones principales en el bloque de hormigón.....	62
5.4.3.	Tensiones normales en cara de apoyo del bloque de hormigón	70
5.4.4.	Tensiones equivalentes de Von Mises en el bloque de hormigón 71	
5.4.5.	Deformaciones en el grout .....	73
5.4.6.	Tensiones Principales en el grout .....	76
5.5.	Comentarios.....	78
5.5.1.	Deformaciones en las llaves de corte.....	78
5.5.2.	Tensiones en la llave de corte .....	78
5.5.3.	Deformaciones y tensiones en el bloque de hormigón.....	79
5.5.4.	Deformaciones y tensiones en el grout .....	81
Capítulo 6:	Análisis y comparación de los resultados obtenidos .....	82
6.1.	Comparación modelos ANSYS vs. Ensayos experimentales .....	82
6.1.1.	Llaves con carga aplicada en el eje fuerte .....	84
6.1.2.	Llaves con carga aplicada en el eje débil.....	92
6.2.	Comentarios.....	101
Capítulo 7:	Conclusiones y comentarios.....	103
Bibliografía	.....	106

# Índice de Tablas

TABLA 1 EXTRACTO NCH2369 OF.2003 .....	4
TABLA 2 DISEÑO LLAVE DE CORTE (AISC, 2003) .....	6
TABLA 3 MÓDULOS PLÁSTICOS PERFILES DOBLE T .....	11
TABLA 4 RESISTENCIA DEL HORMIGÓN PARA ENSAYOS CON CARGA EN EJE FUERTE (SILVA 2012) .....	16
TABLA 5 RESISTENCIA DEL HORMIGÓN PARA ENSAYOS CON CARGA EN EJE DÉBIL (VILLAR 2013) .....	16
TABLA 6 ENSAYOS PROBETAS DE GROUT .....	17
TABLA 7 RESULTADOS ENSAYOS ACERO: TENSIÓN DE FLUENCIA .....	18
TABLA 8 CARGA DE FLUENCIA PERNOS DE ANCLAJE .....	19
TABLA 9 PROPIEDADES PERNOS DE ANCLAJE .....	19
TABLA 10 DIMENSIONES ENSAYOS CON CARGA APLICADA EN EL EJE FUERTE .....	20
TABLA 11 DIMENSIONES ENSAYOS CON LA CARGA APLICADA EN EL EJE DÉBIL .....	20
TABLA 12 CAPACIDADES NOMINALES EJE FUERTE (SILVA, 2012) .....	22
TABLA 13 CAPACIDADES NOMINALES EJE DÉBIL (VILLAR, 2013) .....	23
TABLA 14 PROPIEDADES GEOMÉTRICA LLAVES CARGADAS EN SU EJE FUERTE .....	23
TABLA 15 PROPIEDADES GEOMÉTRICA LLAVES CARGADAS EN SU EJE DÉBIL .....	23
TABLA 16 MODELOS CON DESPLAZAMIENTO APLICADO EN EJE FUERTE .....	26
TABLA 17 MODELOS CON DESPLAZAMIENTO APLICADO EN EJE DÉBIL .....	26
TABLA 18 ASIGNACIÓN DE CONTACTOS .....	27
TABLA 19 ASIGNACIÓN DE TIPO DE ELEMENTOS SÓLIDOS .....	28
TABLA 20 ASIGNACIÓN DE TIPO DE ELEMENTOS DE CONTACTO .....	29
TABLA 21 ASIGNACIÓN DE MATERIALES PARA CARGA APLICADA EN EL EJE FUERTE: HORMIGÓN .....	31
TABLA 22 ASIGNACIÓN DE MATERIALES PARA CARGA APLICADA EN EL EJE DÉBIL: HORMIGÓN .....	32
TABLA 23 ASIGNACIÓN DE MATERIALES: GROUT .....	33
TABLA 24 ASIGNACIÓN DE MATERIALES: ACERO A36 .....	34
TABLA 25 PARÁMETROS DE CALIBRACIÓN .....	40
TABLA 26 CARACTERÍSTICAS MODELO ANSYS LLAVE N°1 .....	40
TABLA 27 DESPLAZAMIENTO TOTAL APLICADO EN MODELO, EJE FUERTE .....	41
TABLA 28 DESPLAZAMIENTO TOTAL APLICADO EN MODELO, EJE DÉBIL .....	41
TABLA 29 PROPIEDADES DEL MATERIAL Y GEOMETRÍA DE PERNOS DE ANCLAJE .....	83
TABLA 30 RIGIDECES LLAVE 1 EJE FUERTE .....	84
TABLA 31 RIGIDECES LLAVE 7 EJE FUERTE .....	85
TABLA 32 RIGIDECES LLAVE 8 EJE FUERTE .....	86
TABLA 33 RESUMEN RAZÓN RIGIDEZ ENSAYO/RIGIDEZ MODELO EJE FUERTE .....	88
TABLA 34 .....	88
TABLA 35 CARGAS MÁXIMAS EJE FUERTE .....	89
TABLA 36 CAPACIDADES NOMINALES EJE FUERTE .....	90
TABLA 37 RIGIDEZ LLAVE 1 EJE DÉBIL .....	93
TABLA 38 RIGIDEZ LLAVE 7 EJE DÉBIL .....	94
TABLA 39 RIGIDEZ LLAVE 8 EJE DÉBIL .....	95
TABLA 40 RESUMEN RAZÓN RIGIDEZ ENSAYO/RIGIDEZ MODELO EJE DÉBIL .....	97
TABLA 41 CARGAS MÁXIMAS EJE DÉBIL .....	97
TABLA 42 CAPACIDADES NOMINALES EJE DÉBIL .....	98

# Índice de Ilustraciones

FIGURA 1 DISEÑO LLAVE DE CORTE (AISC, 2003) .....	5
FIGURA 2 ÁREA PROYECTADA EN EL BLOQUE (AISC, 2006) .....	7
FIGURA 3 VERIFICACIÓN DE FLUENCIA AL CORTE DE LA LLAVE (PALMA, 2008) .....	8
FIGURA 4 VERIFICACIÓN DE ESFUERZOS DE COMPRESIÓN EN EL HORMIGÓN (PALMA, 2008) .....	9
FIGURA 5 ESQUEMA LLAVE ACTUANDO COMO VIGA EN VOLADIZO (NUÑEZ, 2014).....	10
FIGURA 6 IDENTIFICACIÓN EJES FUERTE Y DÉBIL EN LA SECCIÓN DOBLE T .....	11
FIGURA 7 IMAGEN REAL DE LA INSTALACIÓN DEL ENSAYO Y ESQUEMA DE ENSAYO (PALMA 2008) .....	13
FIGURA 8 DIMENSIONES BLOQUE DE HORMIGÓN (VILLAR, 2013) .....	14
FIGURA 9 DIMENSIONES PLACA BASE (VILLAR, 2013).....	15
FIGURA 10 UBICACIÓN DE LOS TRANSDUCTORES DE DESPLAZAMIENTOS INTERNOS INSTALADOS EN LAS PROBETAS SIMÉTRICAS DE LOS ENSAYOS .....	15
FIGURA 11 CURVA ESFUERZO-DEFORMACIÓN PARA MUESTRA DE ESPESOR 3 MM (SILVA 2012) .....	17
FIGURA 12 CURVA ESFUERZO-DEFORMACIÓN PARA MUESTRA DE ESPESOR 5 MM (SILVA 2012) .....	18
FIGURA 13 ENSAYO PERNOS DE ANCLAJE (SILVA, 2012) .....	19
FIGURA 14 GEOMETRÍA LLAVES DOBLE T (SILVA 2012) .....	20
FIGURA 15 VISTA ISOMÉTRICA DEL MODELO ANSYS.....	24
FIGURA 16 VISTAS AISLADAS DE LOS ELEMENTOS DEL MODELO ANSYS .....	25
FIGURA 17 CONDICIONES DE BORDE .....	25
FIGURA 18 CONTACTO TIPO ASIMÉTRICO .....	27
FIGURA 19 DETALLE MALLADO EN ELEMENTOS.....	28
FIGURA 20 ELEMENTO SOLID 285 (ANSYS.COM) .....	29
FIGURA 21 ELEMENTO SOLID 185 (ANSYS.COM) .....	30
FIGURA 22 ELEMENTO CONTA 174 (ANSYS.COM) .....	30
FIGURA 23 ELEMENTO TARGE 170 (ANSYS.COM).....	31
FIGURA 24 CURVA ESFUERZO-DEFORMACIÓN BILINEAL DEL HORMIGÓN .....	32
FIGURA 25 CURVA ESFUERZO-DEFORMACIÓN PARABÓLICO DEL HORMIGÓN .....	33
FIGURA 26 CURVA ESFUERZO-DEFORMACIÓN PARA EL GROUT.....	33
FIGURA 27 MODELO DEL ACERO SIN ENDURECIMIENTO.....	34
FIGURA 28 MODELO DEL ACERO CON ENDURECIMIENTO .....	35
FIGURA 29 MONTAJE ENSAYO VS. MODELO ANSYS .....	36
FIGURA 30 COMPARACIÓN MODELOS DEL HORMIGÓN BILINEAL VS. PARABÓLICO PARA LLAVE 1.....	37
FIGURA 31 COMPARACIÓN MODELOS PARABÓLICOS DEL HORMIGÓN PARA LLAVE 1A .....	37
FIGURA 32 COMPARACIÓN MODELOS PARABÓLICOS DEL HORMIGÓN PARA LLAVE 1B.....	38
FIGURA 33 COMPARACIÓN ACERO CON ENDURECIMIENTO VS. ACERO SIN ENDURECIMIENTO .....	38
FIGURA 34 COMPARACIÓN MÓDULOS DE FRICCIÓN PARA LLAVE 1.....	39
FIGURA 35 COMPARACIÓN MÓDULOS DE FRICCIÓN PARA LLAVE 1A .....	39
FIGURA 36 COMPARACIÓN MÓDULOS DE FRICCIÓN PARA LLAVE 1B.....	40
FIGURA 37 DEFORMADA LLAVE 1, EJE FUERTE A) VISTA FRONTAL B) VISTA TRASERA.....	42
FIGURA 38 DEFORMADA LLAVE 7, EJE FUERTE A) VISTA FRONTAL B) VISTA TRASERA.....	42
FIGURA 39 DEFORMADA LLAVE 8, EJE FUERTE A) VISTA FRONTAL B) VISTA TRASERA.....	42
FIGURA 40 DEFORMADA LLAVE 1, EJE DÉBIL A) VISTA FRONTAL B) VISTA TRASERA .....	43
FIGURA 41 DEFORMADA LLAVE 7, EJE DÉBIL A) VISTA FRONTAL B) VISTA TRASERA .....	43
FIGURA 42 DEFORMADA LLAVE 8, EJE DÉBIL A) VISTA FRONTAL B) VISTA TRASERA .....	44
FIGURA 43 TENSIÓN DE CORTE YZ LLAVE 1, EJE FUERTE A) VISTA FRONTAL B) VISTA TRASERA .....	44
FIGURA 44 TENSIÓN DE CORTE YZ LLAVE 7, EJE FUERTE A) VISTA FRONTAL B) VISTA TRASERA .....	45

FIGURA 45 TENSIÓN DE CORTE YZ LLAVE 8, EJE FUERTE A) VISTA FRONTAL B) VISTA TRASERA .....	45
FIGURA 46 TENSIÓN NORMAL EN Z LLAVE 1, EJE DÉBIL A) VISTA FRONTAL B) VISTA TRASERA .....	46
FIGURA 47 TENSIÓN NORMAL EN Z LLAVE 7, EJE DÉBIL A) VISTA FRONTAL B) VISTA TRASERA .....	46
FIGURA 48 TENSIÓN NORMAL EN Z LLAVE 8, EJE DÉBIL A) VISTA FRONTAL B) VISTA TRASERA .....	46
FIGURA 49 DETALLE TENSIONES NORMALES EN LA BASE DE LAS LLAVES A) LLAVE 1 B) LLAVE 7 C) LLAVE 8.....	47
FIGURA 50 TENSIÓN EQUIVALENTE DE VON MISES LLAVE 1 A) VISTA FRONTAL B) VISTA TRASERA .....	47
FIGURA 51 TENSIÓN EQUIVALENTE DE VON MISES LLAVE 7 A) VISTA FRONTAL B) VISTA TRASERA .....	48
FIGURA 52 TENSIÓN EQUIVALENTE DE VON MISES LLAVE 8 A) VISTA FRONTAL B) VISTA TRASERA.....	48
FIGURA 53 A) DEF. EQUIVALENTES TOTALES B) DEF. ELÁSTICAS C) DEF. PLÁSTICAS. LLAVE 1 EJE FUERTE .....	49
FIGURA 54 A) DEF. EQUIVALENTES TOTALES B) DEF. ELÁSTICAS C) DEF. PLÁSTICAS. LLAVE 7 EJE FUERTE .....	49
FIGURA 55 A) DEF. EQUIVALENTES TOTALES B) DEF. ELÁSTICAS C) DEF. PLÁSTICAS. LLAVE 8 EJE FUERTE .....	49
FIGURA 56 EVOLUCIÓN DE TENSIONES DE CORTE EN LA LLAVE 1, EJE FUERTE .....	50
FIGURA 57 EVOLUCIÓN DE TENSIONES NORMALES EN LA LLAVE 1, EJE FUERTE .....	50
FIGURA 58 EVOLUCIÓN DE TENSIONES DE DE VON MISSES EN LA LLAVE 1, EJE FUERTE .....	51
FIGURA 59 TENSIÓN DE CORTE XZ LLAVE 1, EJE DÉBIL A) VISTA FRONTAL B) VISTA TRASERA.....	52
FIGURA 60 TENSIÓN DE CORTE XZ LLAVE 7, EJE DÉBIL A) VISTA FRONTAL B) VISTA TRASERA.....	52
FIGURA 61 TENSIÓN DE CORTE XZ LLAVE 8, EJE DÉBIL A) VISTA FRONTAL B) VISTA TRASERA.....	52
FIGURA 62 TENSIÓN NORMAL EN Z LLAVE 1, EJE DÉBIL A) VISTA FRONTAL B) VISTA TRASERA .....	53
FIGURA 63 TENSIÓN NORMAL EN Z LLAVE 7, EJE DÉBIL A) VISTA FRONTAL B) VISTA TRASERA .....	53
FIGURA 64 TENSIÓN NORMAL EN Z LLAVE 8, EJE DÉBIL A) VISTA FRONTAL B) VISTA TRASERA .....	54
FIGURA 65 TENSIÓN EQUIVALENTE DE VON MISES LLAVE 1, EJE DÉBIL A) VISTA FRONTAL B) VISTA TRASERA .....	54
FIGURA 66 TENSIÓN EQUIVALENTE DE VON MISES LLAVE 7, EJE DÉBIL A) VISTA FRONTAL B) VISTA TRASERA .....	55
FIGURA 67 TENSIÓN EQUIVALENTE DE VON MISES LLAVE 8, EJE DÉBIL A) VISTA FRONTAL B) VISTA TRASERA .....	55
FIGURA 68 A) DEF. EQUIVALENTES TOTALES B) DEF. ELÁSTICAS C) DEF. PLÁSTICAS. LLAVE 1 EJE DÉBIL.....	56
FIGURA 69 A) DEF. EQUIVALENTES TOTALES B) DEF. ELÁSTICAS C) DEF. PLÁSTICAS. LLAVE 7 EJE DÉBIL.....	56
FIGURA 70 A) DEF. EQUIVALENTES TOTALES B) DEF. ELÁSTICAS C) DEF. PLÁSTICAS. LLAVE 8 EJE DÉBIL.....	56
FIGURA 71 EVOLUCIÓN TENSIONES DE CORTE LLAVE 1, EJE DÉBIL .....	57
FIGURA 72 EVOLUCIÓN TENSIONES NORMALES LLAVE 1, EJE DÉBIL .....	58
FIGURA 73 EVOLUCIÓN TENSIONES DE VON MISES LLAVE 1, EJE DÉBIL .....	58
FIGURA 74 DEFORMADA BLOQUE DE HORMIGÓN LLAVE 1, EJE FUERTE .....	60
FIGURA 75 DEFORMADA BLOQUE DE HORMIGÓN LLAVE 7, EJE FUERTE .....	60
FIGURA 76 DEFORMADA BLOQUE DE HORMIGÓN LLAVE 8 EJE FUERTE .....	61
FIGURA 77 DEFORMADA BLOQUE DE HORMIGÓN LLAVE 1, EJE DÉBIL.....	61
FIGURA 78 DEFORMADA BLOQUE DE HORMIGÓN LLAVE 7, EJE DÉBIL.....	62
FIGURA 79 DEFORMADA BLOQUE DE HORMIGÓN LLAVE 8, EJE DÉBIL.....	62
FIGURA 80 TENSIONES PRINCIPALES MÁXIMAS EN BLOQUE, LLAVE 1, EJE FUERTE .....	63
FIGURA 81 TENSIONES PRINCIPALES MÁXIMAS EN BLOQUE, LLAVE 7, EJE FUERTE .....	63
FIGURA 82 TENSIONES PRINCIPALES MÁXIMAS EN BLOQUE, LLAVE 8, EJE FUERTE .....	64
FIGURA 83 TENSIÓN PRINCIPAL MÁXIMA MAYORES A $f_r=3$ MPA.....	64
FIGURA 84 TENSIONES PRINCIPALES MÍNIMAS EN EL BLOQUE, LLAVE 1, EJE FUERTE.....	65
FIGURA 85 TENSIONES PRINCIPALES MÍNIMAS EN EL BLOQUE, LLAVE 7, EJE FUERTE.....	65
FIGURA 86 TENSIONES PRINCIPALES MÍNIMAS EN EL BLOQUE, LLAVE 8, EJE FUERTE.....	65
FIGURA 87 TENSIÓN PRINCIPAL MÍNIMA MENOR A $f_c'=24$ MPA .....	66
FIGURA 88 TENSIÓN PRINCIPAL MÁXIMA, LLAVE 1, EJE DÉBIL .....	66
FIGURA 89 TENSIÓN PRINCIPAL MÁXIMA, LLAVE 7, EJE DÉBIL .....	67
FIGURA 90 TENSIÓN PRINCIPAL MÁXIMA, LLAVE 8, EJE DÉBIL .....	67
FIGURA 91 TENSIÓN PRINCIPAL MÁXIMA MAYORES A $f_r=3$ MPA.....	68

FIGURA 92 TENSIONES PRINCIPALES MÍNIMAS EN EL BLOQUE, LLAVE 1, EJE DÉBIL.....	68
FIGURA 93 TENSIONES PRINCIPALES MÍNIMAS EN EL BLOQUE, LLAVE 7, EJE DÉBIL.....	69
FIGURA 94 TENSIONES PRINCIPALES MÍNIMAS EN EL BLOQUE, LLAVE 8, EJE DÉBIL.....	69
FIGURA 95 TENSIÓN PRINCIPAL MÍNIMA MENOR A $f_c' = 24$ MPA .....	70
FIGURA 96 TENSIONES NORMALES EN CARA DE APOYO DEL BLOQUE, EJE FUERTE.....	70
FIGURA 97 TENSIONES NORMALES EN CARA DE APOYO DEL BLOQUE, EJE DÉBIL .....	70
FIGURA 98 TENSIÓN DE VON MISES, LLAVE 1, EJE FUERTE .....	71
FIGURA 99 TENSIÓN DE VON MISES, LLAVE 7, EJE FUERTE .....	71
FIGURA 100 TENSIÓN DE VON MISES, LLAVE 8, EJE FUERTE .....	72
FIGURA 101 TENSIÓN EQUIVALENTE DE VON MISES, LLAVE 1, EJE DÉBIL.....	72
FIGURA 102 TENSIÓN EQUIVALENTE DE VON MISES, LLAVE 7, EJE DÉBIL.....	72
FIGURA 103 TENSIÓN EQUIVALENTE DE VON MISES, LLAVE 8, EJE DÉBIL,.....	73
FIGURA 104 DEFORMACIONES EN Y EN GROUT, LLAVE 1, EJE FUERTE .....	73
FIGURA 105 DEFORMACIONES EN Y EN GROUT, LLAVE 7, EJE FUERTE .....	74
FIGURA 106 DEFORMACIONES EN Y EN GROUT, LLAVE 8, EJE FUERTE .....	74
FIGURA 107 DEFORMACIONES EN Y EN GROUT, LLAVE 1, EJE DÉBIL.....	75
FIGURA 108 DEFORMACIONES EN Y EN GROUT, LLAVE 7, EJE DÉBIL.....	75
FIGURA 109 DEFORMACIONES EN Y EN GROUT, LLAVE 8 EJE DÉBIL.....	75
FIGURA 110 DESPLAZAMIENTO MÁX. DEL GROUT DENTRO DEL BLOQUE DE HORMIGÓN, PARA LA LLAVE 7, EJE DÉBIL A) CARGA APLICADA EN EL EJE FUERTE B) CARGA APLICADA EN EL EJE DÉBIL.....	76
FIGURA 111 TENSIONES PRINCIPALES MÁXIMAS QUE SUPERAN $f_r = 4$ MPA, EJE FUERTE .....	76
FIGURA 112 TENSIONES PRINCIPALES MÁXIMAS QUE SUPERAN $f_r = 4$ MPA, EJE DÉBIL.....	77
FIGURA 113 TENSIONES PRINCIPALES MÍNIMAS QUE SUPERAN $f_c' = 43$ MPA, EJE DÉBIL.....	77
FIGURA 114 TENSIONES PRINCIPALES MÍNIMAS QUE SUPERAN $f_c' = 43$ MPA, EJE FUERTE .....	77
FIGURA 115 DEFORMADA LLAVE 1, EJE FUERTE A) MODELO ANSYS B) ENSAYO (SILVA, 2012).....	78
FIGURA 116 DEFORMADA LLAVE 1, EJE DÉBIL A) MODELO ANSYS B) ENSAYO (VILLAR, 2013) .....	78
FIGURA 117 BLOQUE DE HORMIGÓN DESPUÉS DEL ENSAYO (SILVA, 2012).....	80
FIGURA 118 AGRIETAMIENTO BLOQUE DE HORMIGÓN Y DESPRENDIMIENTO DE GROUT (VILLAR, 2013).....	80
FIGURA 119 ZONA DE ROTURA BLOQUE DE HORMIGÓN LLAVE DE CORTE 7 (VILLAR, 2013) .....	81
FIGURA 120 FUERZAS DE CORTE EN EL PERNO .....	83
FIGURA 121 RESPUESTA F VS. DESPLAZAMIENTO LLAVE 1.....	84
FIGURA 122 RESPUESTA F VS. DESPLAZAMIENTO LLAVE 7.....	85
FIGURA 123 RESPUESTA F VS. DESPLAZAMIENTO LLAVE 8, EJE FUERTE .....	86
FIGURA 124 ESFUERZOS DE FLEXIÓN VS DESPLAZAMIENTO, EJE FUERTE .....	87
FIGURA 125 ESFUERZOS DE FLEXIÓN VS DESPLAZAMIENTO, EJE FUERTE .....	87
FIGURA 126 COMPARACIÓN CARGA DE FLUENCIA ENSAYO VS MODELO, EJE FUERTE.....	89
FIGURA 127 CARGA MÁXIMA ENSAYO VS MODELO EJE FUERTE.....	90
FIGURA 128 COMPARACIÓN CAPACIDAD MÁXIMA MODELOS VS CAPACIDAD NOMINAL POR APLASTAMIENTO HORMIGÓN, EJE FUERTE .....	91
FIGURA 129 COMPARACIÓN FLUENCIA MODELO VS CAPACIDADES NOMINALES ACERO, EJE FUERTE .....	91
FIGURA 130 COMPARACIÓN CARGA DE FLUENCIA ENSAYO VS CAPACIDAD NOMINAL POR PLASTIFICACIÓN ACERO POR CORTE, EJE FUERTE..	92
FIGURA 131 RESPUESTA F VS. DESPLAZAMIENTO LLAVE 1.....	93
FIGURA 132 RESPUESTA F VS. DESPLAZAMIENTO LLAVE 1 CORREGIDA .....	93
FIGURA 133 RESPUESTA F VS. DESPLAZAMIENTO LLAVE 7.....	94
FIGURA 134 RESPUESTA F VS. DESPLAZAMIENTO LLAVE 8.....	95
FIGURA 135 ESFUERZOS DE FLEXIÓN VS DESPLAZAMIENTO, EJE DÉBIL .....	96
FIGURA 136 ESFUERZOS DE FLEXIÓN VS DESPLAZAMIENTO, EJE DÉBIL .....	96
FIGURA 137 COMPARACIÓN CARGA FLUENCIA ENSAYO VS MODELOS.....	97

FIGURA 138 CARGA MÁXIMA ENSAYO VS MODELO EJE DÉBIL .....	98
FIGURA 139 COMPARACIÓN CAPACIDAD MÁXIMA MODELOS VS CAPACIDAD NOMINAL POR APLASTAMIENTO HORMIGÓN, EJE DÉBIL .....	99
FIGURA 140 ZONA DE ROTURA HORMIGÓN LLAVE DE CORTE 1A Y 1B (VILLAR, 2013).....	99
FIGURA 141 COMPARACIÓN FLUENCIA MODELO VS CAPACIDADES NOMINALES ACERO, EJE DÉBIL .....	100
FIGURA 142 COMPARACIÓN CARGA DE FLUENCIA MODELOS VS CAPACIDAD NOMINAL POR PLASTIFICACIÓN ACERO POR CORTE, EJE DÉBIL	101

# Capítulo 1: Introducción

## 1.1. Motivación

En zonas sísmicas, como Chile, se pueden alcanzar grandes esfuerzos de corte basales en las estructuras, los cuales deben ser transmitidos a las fundaciones. Para cumplir esta función, es usual en estructuras de acero utilizar elementos estructurales de acero, embebidos en la fundación de hormigón, llamados llaves de corte.

La normativa nacional vigente para estructuras industriales (NCh 2369.Of2003), exige que las llaves de corte sean diseñadas para transmitir el 100% del esfuerzo de corte basal y que la eventual falla en la fundación se produzca en los elementos metálicos y no en el hormigón. Sin embargo, no se detalla una metodología para el diseño. Existe una guía de diseño elaborada por la AISC, la cual contiene un procedimiento basado en los estudios realizados por Rotz y Reifschneider (AISC, 2003, Reference B.22). En éste se identifican dos modos de falla: Falla por capacidad del hormigón en la fundación y falla plástica por flexión en el acero de la llave de corte. Sin embargo, ensayos realizados en la Universidad Técnica Federico Santa María a llaves de corte de distinta geometría (geometría de cruz, doble T y tubular), entregan evidencia de que no se produce la falla plástica por flexión, sino por corte, que tiene una mayor capacidad, lo que pone en duda las hipótesis utilizadas en la normativa americana.

Una falla por capacidad del hormigón sin el detallamiento adecuado, corresponde a una falla frágil y por lo tanto, menos deseada que una falla plástica en la llave de corte, por lo que es de gran importancia verificar las hipótesis utilizadas actualmente en el diseño de estos elementos.

En este trabajo de título, se estudió, de forma analítica, el comportamiento de las llaves corte con geometría doble T. Para esto, se realizó un modelo de elementos finitos en el programa *ANSYS Workbench* y se calibró utilizando los datos experimentales antes mencionados, con el fin de localizar los modos de falla y compararlos con los esperados en las normas de diseño actuales (plastificación del acero y aplastamiento del hormigón). Los resultados de los ensayos realizados en llaves de geometría doble T fueron proporcionados por el profesor Carlos Aguirre para su utilización en el presente trabajo.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo General**

Verificar las hipótesis utilizadas en el diseño de llaves de corte con geometría doble T (Falla plástica por flexión), en la práctica de diseño actual.

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

- Elaborar un modelo de elementos finitos para llaves de corte de geometría doble T.
- Calibrar el modelo con los datos obtenidos de los ensayos realizados a llaves de corte.
- Identificar modos de falla producidos en la llave de corte y compararlos con los esperados en las normas de diseño.

## **1.3. Metodología**

En una primera etapa se realizó una revisión del estado del arte en la materia. En particular se revisaron normas y guías para el diseño de llaves de corte y se identificaron las hipótesis utilizadas y modos de fallas considerados. Además se recopilaron y seleccionan los datos experimentales obtenidos en ensayos de llave de corte tipo doble T (Silva 2012, Villar 2013).

Luego, se generó un modelo de elementos finitos con el software *ANSYS Workbench*. Los modelos representan las configuraciones ensayadas en la Universidad Federico Santa María, y fueron calibrados utilizando los datos experimentales antes nombrados, variando parámetros como propiedades físicas y mecánicas de los materiales, definiciones de apoyos, entre otros. El objetivo de la calibración fué representar de mejor forma el comportamiento real de las llaves de corte. Los modelos calibrados permitieron identificar los modos de falla reales, y verificar las hipótesis de diseño implícitas en las normas de diseño vigentes.

Finalmente se analizaron los modelos generados, y se concluyó sobre los resultados obtenidos, evaluando la validez de los métodos de diseño utilizados actualmente en las llaves de corte.

## **1.4. Alcances**

### **Capítulo 1: Introducción**

Se presenta la motivación del trabajo de título, los objetivos del trabajo, la metodología seguida y los alcances por capítulo.

### **Capítulo 2: Antecedentes y marco teórico**

Se presenta una recopilación de los antecedentes importantes para el trabajo. En particular, una revisión de las normas y guías que rigen actualmente el diseño de llaves de corte, identificando las hipótesis implícitas, y los modos de falla considerados en éstas. También se revisan

estudios anteriores sobre el tema, incluyendo los ensayos experimentales realizados a llaves de corte, dirigidos por el profesor Carlos Aguirre.

### **Capítulo 3: Datos experimentales y capacidades teóricas**

Se presentan en detalle los ensayos experimentales realizados en la Universidad Federico Santa María en llaves de corte con sección doble T. Se describe el proceso de selección de 6 geometrías para la modelación en ANSYS, y se determinan las capacidades nominales de éstas.

### **Capítulo 4: Modelo de elementos finitos**

Se presenta y se describe los modelos realizados en el programa ANSYS *Workbench*. Se señalan los supuestos y simplificaciones realizados en éstos. Además se incluye el proceso de calibración, finalizando con la selección de los parámetros de calibración.

### **Capítulo 5: Resultados de los modelos ANSYS**

Se presentan los resultados obtenidos de los modelos elaborados en ANSYS de todas las llaves seleccionadas. Se describe el comportamiento general de las llaves, observados en los modelos y se exhiben las respuestas específicas en tensión y deformación de cada llave.

### **Capítulo 6: Análisis y comparación de los resultados obtenidos**

Se analizan todos los resultados revelados en el capítulo anterior. Además se compara el comportamiento general de las llaves modeladas con las respuestas obtenidas en los ensayos y las capacidades nominales, determinadas en el Capítulo 3.

### **Capítulo 7: Conclusiones**

Se entregan las observaciones finales del trabajo y se describen los resultados obtenidos más relevantes. Se comenta sobre las limitaciones del modelo y se realizan las conclusiones del trabajo.

## Capítulo 2: Antecedentes y Marco Teórico

### 2.1. Normas Chilenas

La NCh2369 Of2003 y el Manual de Diseño en Acero, elaborado por el Instituto Chileno de Acero (ICHA) se refieren a las llaves de corte como elementos estructurales necesarios para traspasar esfuerzos de corte a las fundaciones. Sin embargo, ninguna proporciona una metodología para el diseño de éstas. A continuación, se resumen las principales disposiciones para las llaves de corte en estos documentos:

#### 2.1.1. NCh 2396 Of.2003 (INN, 2003)

La norma chilena de diseño sísmico en estructuras industriales determina lo siguiente:

**Tabla 1 Extracto NCh2369 Of.2003**

8.6.1	Los apoyos estructurales y equipos que transmiten esfuerzos sísmicos a las fundaciones u otro elemento de hormigón se deben anclar por medio de elementos de anclaje, placas de corte, barras de esfuerzo u otros medios adecuados.
8.6.3	Las placas de columnas y equipos en general deben estar provistas de placas de corte o topes sísmicos diseñados para transmitir el 100% del esfuerzo de corte basal.
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 los 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.

#### 2.1.2. Manual de Diseño para Estructuras de Acero, (ICHA, 2000)

El manual de diseño elaborado por el Instituto Chileno de Acero se refiere a las llaves de corte en el punto 3.3 "Conexión de Columna a la Fundación":

"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 la interacción de corte-tracción."

Tanto en la NCh2369Of.2003 como en el Manual de Diseño del ICHA, no se detalla un método de diseño de las llaves de corte.

## 2.2. Normas Extranjeras

### 2.2.1. Steel Design Guide N°1 "Column Base Plate" (AISC, 2003)

En este texto se reconocen tres formas principales de transferencia de carga desde las columnas a las fundaciones de hormigón:

- Fricción entre la placa base y el hormigón de la fundación.
- Resistencia de la columna y placa base, o de la llave de corte si es que hay, contra la superficie de hormigón.
- Corte en los pernos de anclaje.

La guía de diseño elaborada por la AISC propone un método para el diseño de llaves de cortes. Para esto considera la llave como una placa simple de acero, embebida en el hormigón de la fundación. Se asume que la placa embebida se comporta como una viga en voladizo, solicitada por una carga distribuida a lo largo de ésta dada por la presión del hormigón que se opone (Figura 1). Finalmente, se determina el ancho de la plancha y su longitud de enterramiento según una falla por capacidad del hormigón, y el espesor de la plancha por una falla plástica por flexión en la llave de corte.

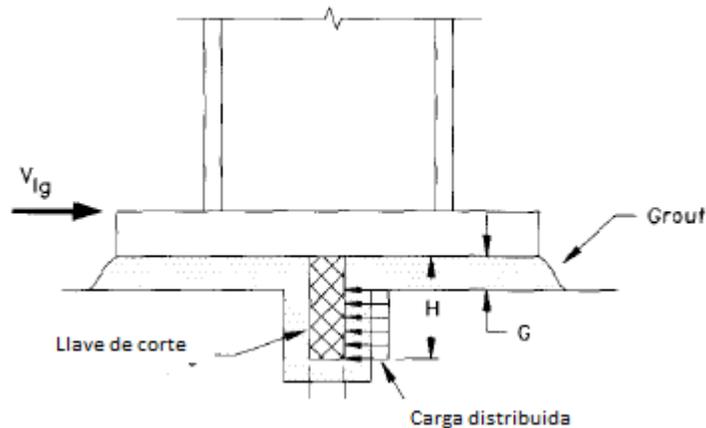


Figura 1 Diseño llave de corte (AISC, 2003)

A continuación se presentan las ecuaciones encontradas en la guía de diseño para el dimensionamiento de la llave de corte (Tabla 2):

**Tabla 2 Diseño llave de corte (AISC, 2003)**

	<b>ASD</b>	<b>LRFD</b>
Área necesaria para evitar falla por capacidad del hormigón.	$A_{lg} = \frac{V_{lg}}{0.35 \cdot f_c'}$	$A_{lgu} = \frac{V_{lgu}}{0.85 \cdot \delta \cdot f_c'}$
Momento en la base de la placa embebida en el hormigón.	$M_{lg} = \left(\frac{V_{lg}}{W}\right) \cdot \left[\frac{H + G}{2}\right]$	$M_{lgu} = \left(\frac{V_{lgu}}{W}\right) \cdot \left[\frac{H + G}{2}\right]$
Espesor mínimo de la placa embebida para evitar la plastificación de la sección por flexión.	$t_{lg} = \sqrt{\frac{6 \cdot M_{lg}}{0,75 \cdot F_y}}$	$t_{lg} = \sqrt{\frac{4 \cdot M_{lgu}}{0,9 \cdot F_y}}$

Dónde:

$f_c'$ : Resistencia a la compresión del hormigón.

$F_y$ : Tensión de fluencia del acero.

$V_{lg}$ : Fuerza de corte traspasada de la columna a la fundación.

$M_{lg}$ : Momento en la base de la placa en voladizo.

$A_{lg}$ : Área de la llave de corte que se opone al grout.

$\delta$ : Factor de resistencia (LRFD).

La actualización de la guía de diseño publicada el 2006 incluye el aporte a la resistencia del hormigón dada por el confinamiento de los pernos de anclaje. La resistencia lateral de la llave de corte, dada por una falla por capacidad del hormigón, se puede expresar como:

$$\phi P_n = 0.80 f_c' A_l + 1.2(N_y - P_a)$$

**Ecuación 1**

$\phi P_n$ : Resistencia lateral del sistema.

$A_l$ : Área de la llave que se opone al grout.

$N_y$ : Esfuerzo de tensión total de los pernos de anclaje.

$P_a$ : Fuerza axial externa sobre los pernos.

El segundo término en la ecuación 2 corresponde al aporte a la resistencia del confinamiento dado por los pernos de anclaje, y el primer término es la resistencia a la compresión del hormigón. Ambos términos son

sugeridos por la ACI349-01, basados en los ensayos de Rotz y Reifschneider (1989).

La actualización además incluye la resistencia al corte en el hormigón, considerando una tensión uniforme de  $4\phi\sqrt{f_c'}$  actuando sobre una área efectiva, definida por la proyección en 45° de los bordes de la llave sobre la cara libre del bloque de hormigón, donde  $\phi = 0,75$  (Figura 2).

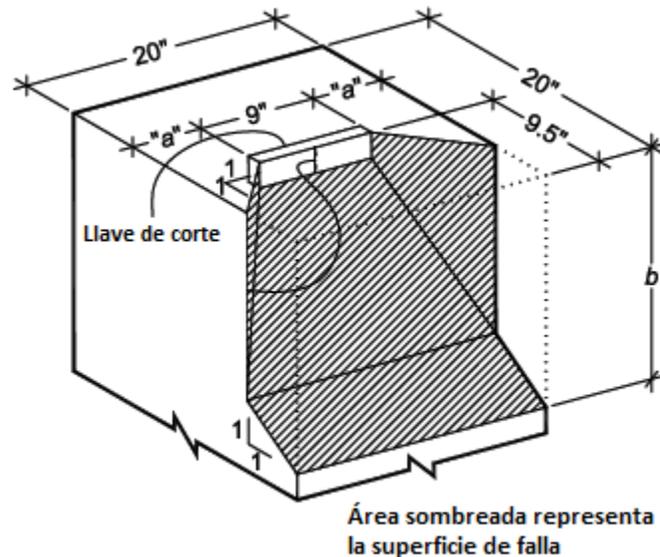


Figura 2 Área proyectada en el bloque (AISC, 2006)

### 2.2.2. ACI349-01 Code Requirements for Nuclear Safety Related to Concrete Structures (ACI 349-01)

El apéndice B de la ACI349-01 entrega requerimientos para el diseño de elementos estructurales de acero embebidos en el concreto, que tengan como fin la transferencia de cargas desde las conexiones a elementos de hormigón. En el punto B.4.5.2 se refiere específicamente a la capacidad de aplastamiento del hormigón en contacto con una llave de corte, indicando que la compresión en éste no debe exceder  $1,3\phi f_c'$ , con un factor de reducción  $\phi$  de 0,7. En este punto se hace una directa referencia a los ensayos de Rotz y Reifschneider (1989).

### 2.3. Trabajos Experimentales

El profesor Carlos Aguirre de la Universidad Federico Santa María, dirigió una serie de ensayos a llaves de corte, con el fin de estudiar el comportamiento real de éstas. Palma (2008) ensayó llaves de corte con geometría de cruz, mientras que Villar (2013) y Silva (2012) realizaron ensayos a llaves de corte con geometría doble T, cargadas en sus dos ejes principales. De éstos, se concluye que los modos de falla que predominan corresponden a una plastificación de la llave por corte y aplastamiento en el

hormigón, y que la falla por flexión no ocurre. Además, la falla por plastificación por corte es mucho más dúctil que una falla en el hormigón. Basado en sus observaciones, Palma (2008) propone nuevas expresiones para el diseño de la sección de la llave:

Método de diseño ASD	Método de diseño LRFD
$A_{corte} \geq \frac{V_{Ig}}{FS \cdot (0.6 \cdot f_y) \cdot F_{esb}}$	$A_{corte} \geq \frac{V_{Igu}}{\phi_v \cdot (0.6 \cdot f_y) \cdot F_{esb}}$
Dónde:	Dónde:
$V_{Ig}$ : Fuerza de corte de diseño	$V_{Igu}$ : Fuerza de corte última
$A_{corte}$ : Área de la llave de corte $A_{corte} = 2 \cdot W \cdot t - t^2$	$A_{corte}$ : Área de la llave de corte $A_{corte} = 2 \cdot W \cdot t - t^2$
$0.6 \cdot f_y$ : Tensión de fluencia al corte del acero	$0.6 \cdot f_y$ : Tensión de fluencia al corte del acero
FS : Factor de seguridad FS = 1.67	$\phi_v$ : Factor de reducción $\phi_v = 0.9$
$F_{esb}$ : Factor por esbeltez $F_{esb} = 0.9 \quad \text{para } \frac{H-G}{w} < 0.7$ $F_{esb} = 1.0 \quad \text{para } \frac{H-G}{w} > 0.7$	$F_{esb}$ : Factor por esbeltez $F_{esb} = 0.9 \quad \text{para } \frac{H-G}{w} < 0.7$ $F_{esb} = 1.0 \quad \text{para } \frac{H-G}{w} > 0.7$
t : Espesor de la llave de corte	t : Espesor de la llave de corte
W : Ancho de la llave de corte	W : Ancho de la llave de corte

**Figura 3 Verificación de fluencia al corte de la llave (Palma, 2008)**

Luego, con el fin de garantizar la ocurrencia de una falla dúctil antes de una falla frágil en el hormigón, Palma (2008) propone calcular la carga máxima de corte que se genera en la llave cuando ésta fluye completamente en la sección:

$$V_{max} = 1,1 \cdot R_y [(0,6 \cdot f_y) \cdot A_{corte} \cdot \Omega_{exp}] \quad \text{Ecuación 2}$$

Dónde:

- $V_{max}$ : Carga máxima de fluencia en la llave de corte  
 $0,6 \cdot f_y$ : Esfuerzo de fluencia al corte del acero  
 $R_y$ : Razón entre esfuerzo de fluencia esperado y el mínimo esfuerzo de fluencia especificado. (Para acero calidad A36  $R_y=1,5$ )  
 $A_{corte}$ : Área transversal de la llave de corte  
 $\Omega_{exp}$ : Sobre resistencia experimental de la llave de corte. (Para llaves en cruz  $\Omega_{exp} = 1,5$ )

Por último se propone comprobar que la capacidad del hormigón supera la carga máxima de fluencia en la llave de corte ( $V_{max}$ ):

Método de diseño ASD	Método de diseño LRFD
$A_{lg} = \frac{V_{max}}{FS \cdot (1.3 \cdot f'_c)}$ $\frac{H - G}{W} \leq 1.0$	$A_{lg} = \frac{V_{max}}{\phi \cdot (1.3 \cdot f'_c)}$ $\frac{H - G}{W} \leq 1.0$
<p>Dónde:</p> <p><math>A_{lg}</math> : Área de contacto necesaria</p> $A_{lg} = (H - G) \cdot W$ <p><math>V_{max}</math> : Carga máxima de fluencia en la llave</p> <p><math>f'_c</math> : Resistencia de compresión del hormigón</p> <p>FS : Factor de seguridad</p> <p>FS = 1.67</p> <p>H : Altura de la llave de corte</p> <p>G : Espesor del <i>grout</i></p> <p>W : Ancho de la llave de corte</p>	<p>Dónde:</p> <p><math>A_{lg}</math> : Área de contacto necesaria</p> $A_{lg} = (H - G) \cdot W$ <p><math>V_{max}</math> : Carga máxima de fluencia en la llave</p> <p><math>f'_c</math> : Resistencia de compresión del hormigón</p> <p><math>\phi</math> : Factor de reducción</p> <p><math>\phi = 0.7</math></p> <p>H : Altura de la llave de corte</p> <p>G : Espesor del <i>grout</i></p> <p>W : Ancho de la llave de corte</p>

**Figura 4 Verificación de esfuerzos de compresión en el hormigón (Palma, 2008)**

## 2.4. Trabajos Anteriores

Oriel Nuñez (2014) realizó un análisis numérico del comportamiento de llaves de corte con geometría de cruz, mediante un modelo de elementos finitos. El objetivo de este trabajo fue analizar los modos de falla reales y resistencia del elemento. Para esto, se utilizaron los resultados experimentales obtenidos por Palma (2008) para calibrar los modelos computacionales. Apoyado por los resultados de los análisis numéricos, Nuñez concluye que el modo de falla predominante en este tipo de llaves corresponde a fluencia al corte en la sección transversal de la base de la llave, y descarta la ocurrencia de fluencia por flexión.

## 2.5. Marco Teórico

En esta sección se exponen los conceptos utilizados en los análisis de los resultados. Específicamente se detallan las expresiones usadas para la determinación de las resistencias nominales, y se describen los supuestos detrás de éstos.

### 2.5.1. Viga en voladizo

Como ya se describe en el punto 2.2, la AISC asume un comportamiento de viga en voladizo para la llave de corte, como se refleja en la (Figura 5). Según esto propone un método de diseño, asumiendo una falla por flexión debido a la plastificación de la llave.

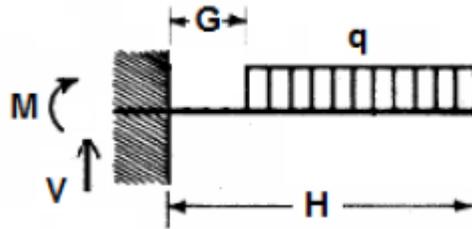


Figura 5 Esquema llave actuando como viga en voladizo (Nuñez, 2014)

Según este supuesto, el momento de flexión máximo se encontraría en la superficie de la llave conectada a la placa base. Esta se obtiene por simple equilibrio de fuerzas, considerando una fuerza uniformemente distribuida, aportada por el grout en contacto con la llave:

$$M = V \cdot \left( \frac{H + G}{2} \right) \quad \text{Ecuación 3}$$

Dónde:

- H: Altura de la llave de corte
- G: Espesor del grout
- q: Carga uniformemente distribuida

Es de interés conocer la sollicitación de flexión con que la fibra más externa de la sección comienza a fluir ( $M_y$ ), y la flexión en que la sección completa se ha plastificado ( $M_p$ ).

La flexión en que ocurre la primera fluencia en la sección, se determina utilizando el módulo resistente de la sección ( $W$ ):

$$M_y = f_y \cdot W \quad \text{Ecuación 4}$$

Los módulos resistentes flexionales vienen dados por:

$$W_x = \frac{I_x}{y_{max}} \quad \text{y} \quad W_y = \frac{I_y}{x_{max}} \quad \text{Ecuación 5}$$

Dónde:

$I_x, I_y$ : Inercia con respecto a los ejes x e y, respectivamente.

$W_x, W_y$ : Módulos resistentes de los ejes x e y, respectivamente.

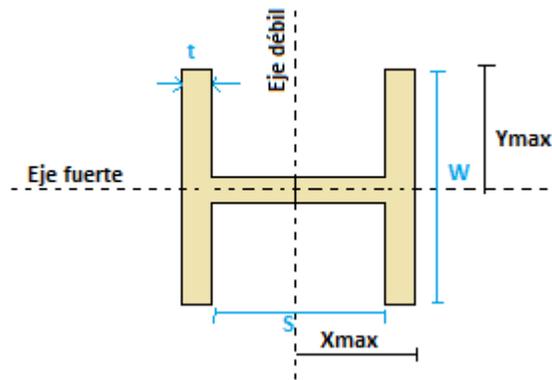
$x_{max}, Y_{max}$ : Distancias en x e y de las fibras más lejana al eje neutro para las dos direcciones principales.

La resistencia máxima a la flexión en la llave, está dada por el momento plástico. Este corresponde al momento en que la llave se ha plastificado en toda su sección, y no es posible un aumento en la flexión. El momento plástico se determina con la tensión de fluencia del acero ( $f_y$ ), y el módulo plástico de la sección ( $Z_p$ ):

$$M_p = f_y \cdot Z_p$$

**Ecuación 6**

El módulo plástico es un parámetro que depende de la geometría de la sección, y de la dirección en que ésta es cargada. En una sección doble T, con simetría en ambos eje, el módulo plástico se determina de la siguiente forma, según lo definido en la Figura 6.



**Figura 6 Identificación ejes fuerte y débil en la sección doble T**

**Tabla 3 Módulos Plásticos perfiles doble T**

Perfiles cargados en el eje fuerte	Perfiles cargados en el eje débil
$Z_p = W \cdot t \cdot (S + t) + \frac{S^2 \cdot t}{4}$	$Z_p = \frac{W^2 \cdot t}{2} + \frac{t^2 S}{2}$

Dónde:

- Z<sub>p</sub>: Módulo plástico
- T: Espesor llave
- S: Alto alma llave
- W: Ancho alas llave

Una vez determinado el momento plástico, es posible determinar la fuerza de corte máxima que puede resistir la llave, a partir de la Ecuación 7:

$$V = \frac{2 \cdot M}{H + G} \quad \text{Ecuación 7}$$

### **2.5.2. Fluencia por esfuerzos de corte en la sección transversal**

Se determina la carga límite en que la sección de la llave se plastifica en toda su sección, debido a esfuerzos de corte. Según la teoría de Von Mises, la resistencia nominal de la llave al corte queda determinada por un estado bidimensional de tensiones, actuando en corte puro. La tensión equivalente queda expresada como:

$$\sigma_e = \tau\sqrt{3} \quad \text{Ecuación 8}$$

Al igualar la tensión equivalente a la tensión de fluencia a la tracción del acero, se obtiene:

$$\tau_{\text{max}} = \frac{1}{3}f_y = 0,577f_y \approx 0,6f_y \quad \text{Ecuación 9}$$

Finalmente, la fuerza de corte máxima que puede resistir la llave, asumiendo una falla por esfuerzos de corte en el acero es:

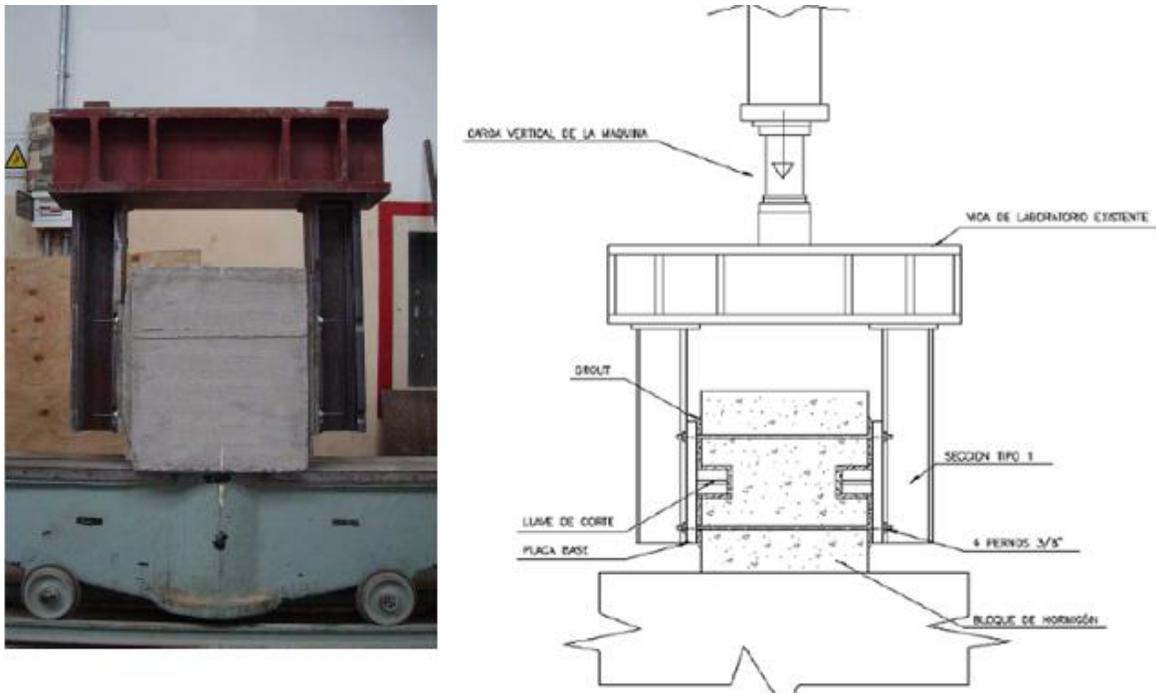
$$V_{\text{corte}} = 0,6 \cdot f_y \cdot A_{\text{llave}} \quad \text{Ecuación 10}$$

## Capítulo 3: Datos experimentales y capacidades teóricas

En esta sección se describen los ensayos realizados por Villar (2013) y Silva (2012) a llaves de corte con geometría doble T. Además se determinan las capacidades teóricas de las probetas ensayadas. Por último se describe el criterio de selección de los ensayos a ser modelados en ANSYS *Workbench*.

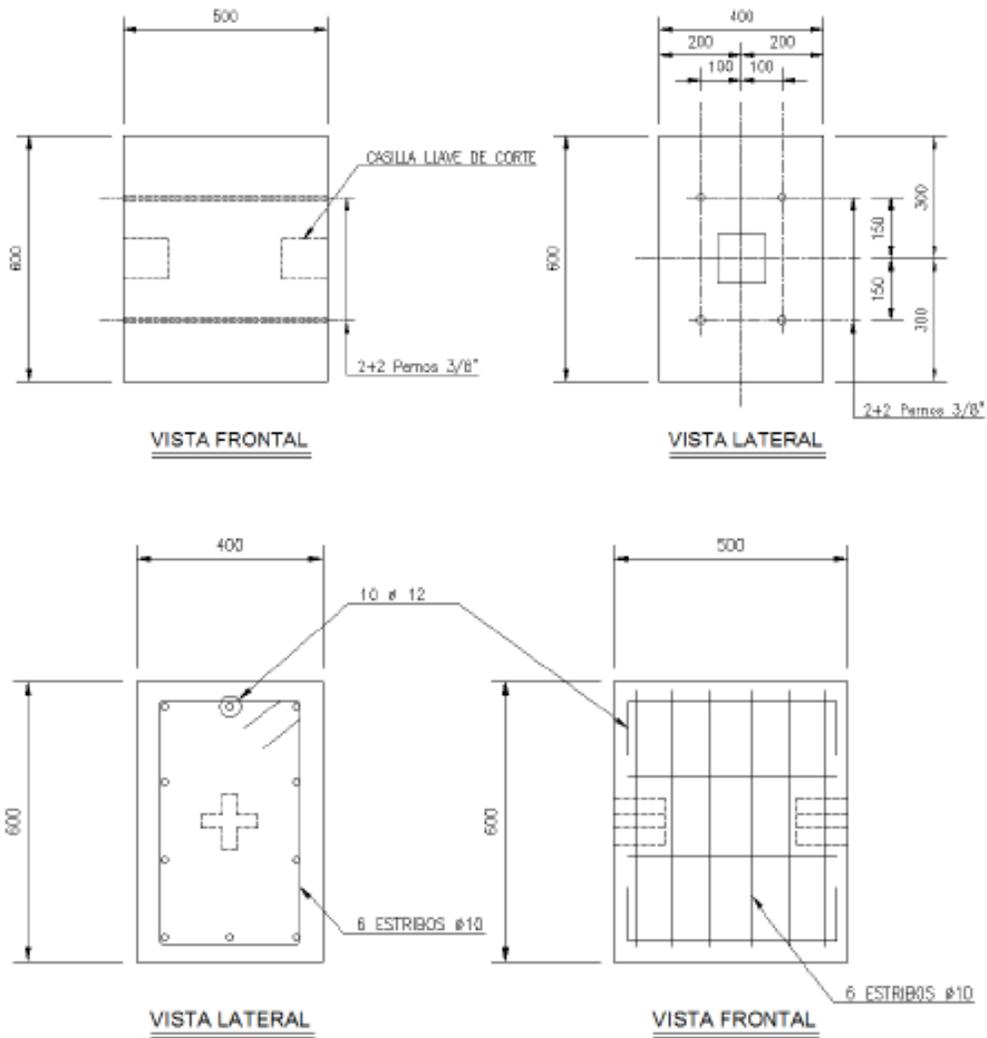
### 3.1. Instalación del ensayo

La instalación y metodología de los ensayos es la misma utilizada por Palma (2008). Esta consiste en una máquina en la cual se instalan dos probetas idénticas, de forma simétrica como se muestra en la Figura 7. Se aplica una carga vertical que es distribuida uniformemente hacia ambas llaves de corte por medio de una pieza rígida de acero. Las probetas son sometidas a una fuerza de corte hasta alcanzar la falla en la llave o en el hormigón. De esta forma, se asume que la carga aplicada a cada probeta es la mitad de la carga aplicada por la máquina. Esto se cumple siempre y cuando las dos probetas del ensayo sean simétricas.



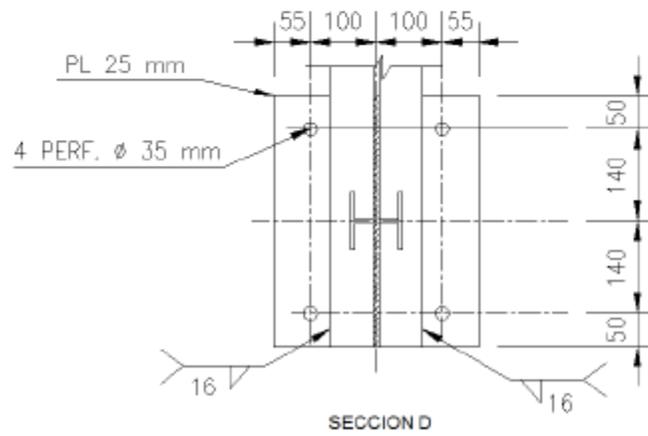
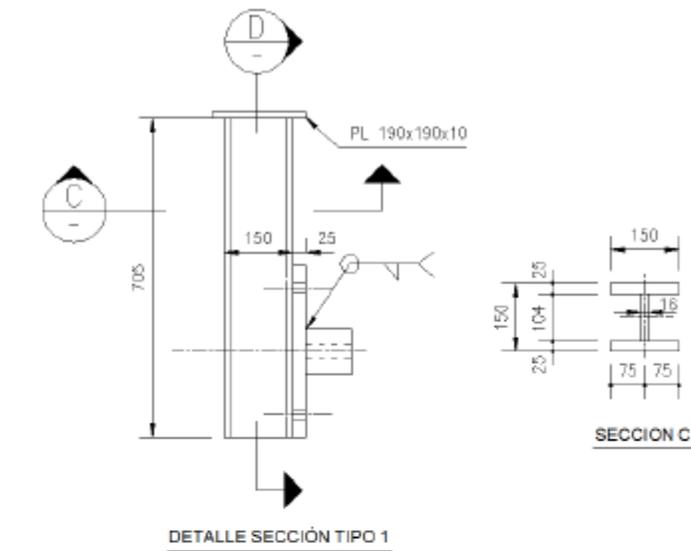
**Figura 7 Imagen real de la instalación del ensayo y esquema de ensayo (Palma 2008)**

Las dimensiones del bloque de hormigón se pueden ver en Figura 8. Los pernos de anclaje son preinstalados, y se incorpora una casilla para la instalación de la llave de corte y aplicación de grout.



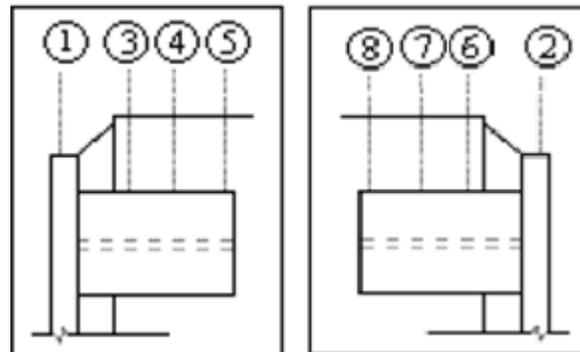
**Figura 8 Dimensiones bloque de hormigón (Villar, 2013)**

Las dimensiones de las placas bases se determinan a partir del diseño de un elemento rígido capaz de transferir las cargas completamente a las llaves de corte. Estas se pueden ver en la Figura 9, donde se expone en detalle las dimensiones de la placa base y del perfil de la llave n°1.



**Figura 9 Dimensiones placa base (Villar, 2013)**

Además se instalan transductores para medir el desplazamiento de la placa con respecto al bloque de hormigón, y para medir desplazamientos internos en la llave de corte.



**Figura 10 Ubicación de los transductores de desplazamientos internos instalados en las probetas simétricas de los ensayos**

Villar ensayó 10 probetas de llaves de corte con geometría doble T con la carga aplicada en el eje fuerte de ésta, mientras que Silva ensaya 8 probetas con la carga aplicada en el eje débil.

### **3.2. Materiales**

Se obtienen muestras de los materiales utilizados para ser ensayados con el fin obtener sus propiedades reales.

#### **3.2.1. Hormigón**

Silva (2012) y Villar (2013) ensayaron probetas cúbicas de 20 cm de arista, a los 28 días. Ellos especifican los valores de resistencia a la compresión transformada para una probeta cilíndrica ( $f_c'$ ):

**Tabla 4 Resistencia del hormigón para ensayos con carga en eje fuerte (Silva 2012)**

<b>Ensayo</b>	<b><math>f_c'</math> [MPa]</b>
1	24,40
2	24,40
3	17,54
4	17,54
5	20,48
6	20,48
7	23,42
8	23,42
9	14,90
10	14,90

**Tabla 5 Resistencia del hormigón para ensayos con carga en eje débil (Villar 2013)**

<b>Ensayo</b>	<b><math>f_c'</math> [Mpa]</b>
1	25,48
2	25,48
3	17,84
4	17,84
5	23,13
6	23,13
7	23,81
8	23,81

#### **3.2.2. Mortero (grout)**

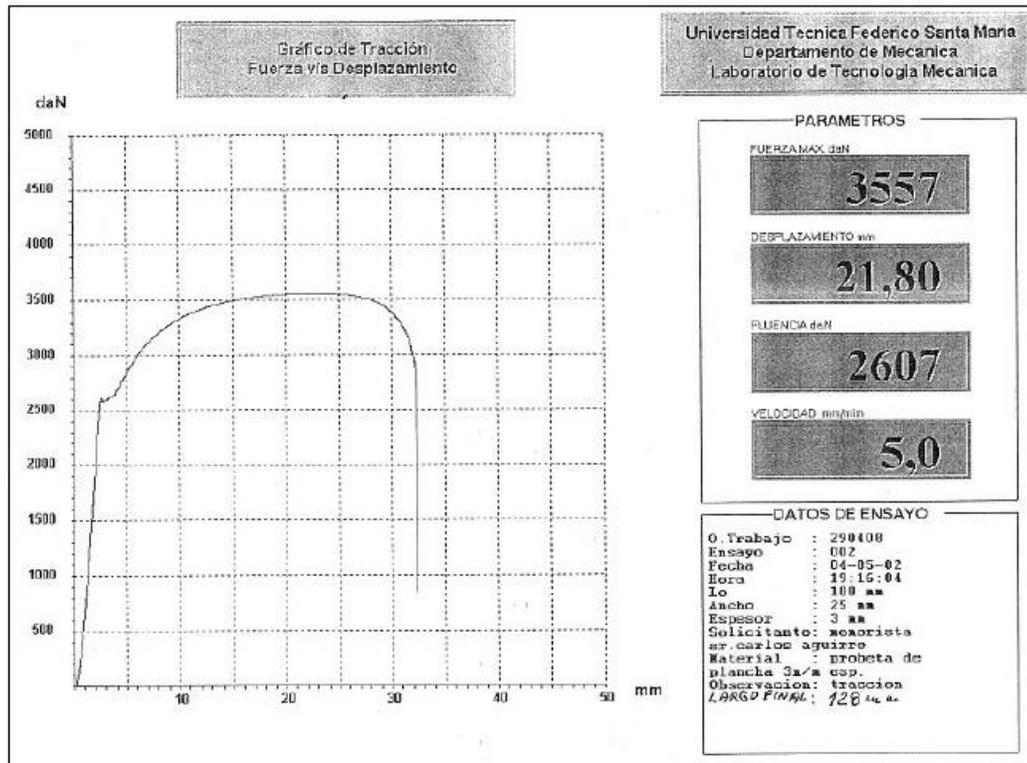
El grout de nivelación utilizado en las probetas, corresponde a "SIKA Grout 214". Se tomaron muestras cúbicas de 15 cm de arista y se ensayaron a compresión:

**Tabla 6 Ensayos probetas de grout**

Muestra	$F_{cub}$ [MPa]
A	39,10
B	46,75
Promedio	42,92

### 3.2.3. Acero A36

Las llaves de acero fueron fabricadas con acero calidad A36, el cual fue ensayado para obtener el valor real de fluencia. Se ensayaron muestras con dos espesores distintos. A continuación se muestran las curvas obtenidas para una muestra de 3 mm y 5 mm, respectivamente:



**Figura 11 Curva esfuerzo-deformación para muestra de espesor 3 mm (Silva 2012)**

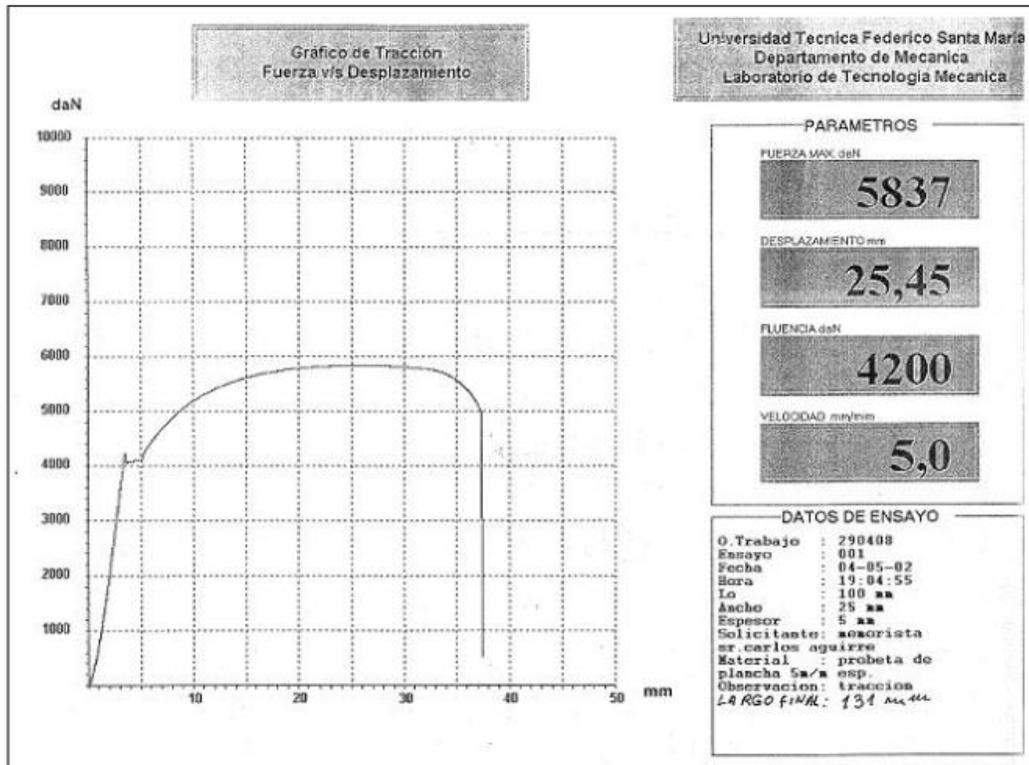


Figura 12 Curva esfuerzo-deformación para muestra de espesor 5 mm (Silva 2012)

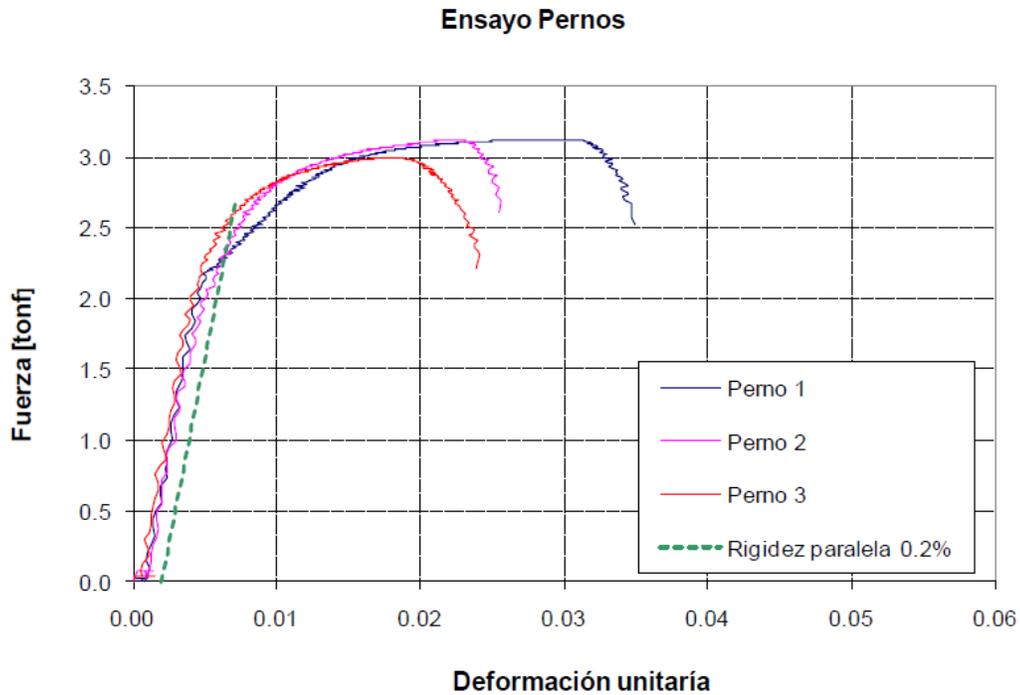
Según los resultados obtenidos en los ensayos, se determinan los siguientes valores para la tensión de fluencia del acero

Tabla 7 Resultados ensayos acero: Tensión de fluencia

Muestra	Fy[MPa]
A (3mm)	339,77
B (5mm)	329,28
Promedio	334,53

### 3.2.4. Pernos de anclaje

Se utilizan pernos de alta resistencia con un diámetro de 3/8". En la Figura 13 se muestra la curva esfuerzo-deformación obtenida del ensayo de tres pernos.



**Figura 13 Ensayo pernos de anclaje (Silva, 2012)**

El esfuerzo de fluencia se obtiene trazando una paralela a la parte elástica inicial de la curva, desfasada una cantidad igual a 0,2% de deformación unitaria (En la Figura 13 corresponde a la línea segmentada azul), obteniéndose los siguientes valores:

**Tabla 8 Carga de fluencia pernos de anclaje**

	$P_{fluencia}$ [tonf]
perno 1	2,29
perno 2	2,4
perno 3	2,61
promedio	2,43

**Tabla 9 Propiedades pernos de anclaje**

Área pernos [cm <sup>2</sup> ]	0,5
$f_y$ [MPa]	476,9
$\tau_y$ [MPa]	286,16

### 3.3. Dimensiones Ensayos

A continuación, se presentan las medidas de las llaves de corte en los ensayos realizados por Silva (2012) y Villar (2013):

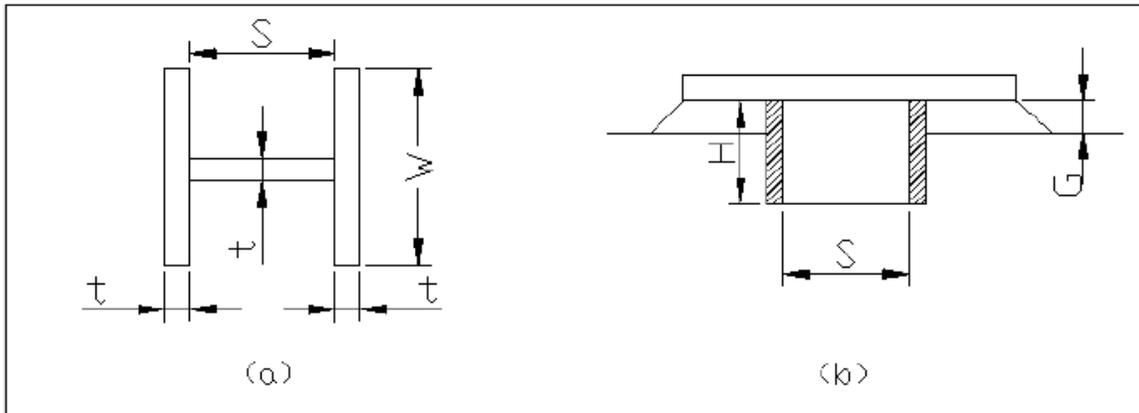


Figura 14 Geometría llaves doble T (Silva 2012)

Tabla 10 Dimensiones ensayos con carga aplicada en el eje fuerte

Ensayo	W	H	t	S	G
1	100	100	5	90	15
2	100	50	5	90	15
3	100	75	3	225	15
4	100	75	3	75	15
5	100	75	19	75	15
6	100	75	19	225	15
7	130	150	3	124	15
8	130	150	6	118	15
9	130	150	3	124	15
10	100	75	3	75	15

Tabla 11 Dimensiones ensayos con la carga aplicada en el eje débil

Ensayo	W	H	S	t	G
1	100	100	90	5	15
2	100	50	90	5	15
3	100	75	75	3	15
4	100	75	150	19	15
5	100	75	75	19	15
6	100	100	90	19	15
7	100	130	118	6	15
8	100	130	124	3	15

### 3.4. Estimación de capacidades nominales y selección de ensayos

Se seleccionó una muestra de las llaves de corte ensayadas con geometría doble T, con el fin de utilizarlas como referencia en la elaboración de los modelos de elementos finitos. El criterio de selección de estas fue, en primer lugar haber presentado una falla en el acero de la llave y no por capacidad del hormigón. En segundo lugar, se seleccionaron aquellas llaves con mayor diferencia en sus capacidades teóricas en la falla en el acero con respecto a la falla en el hormigón. Dentro de las que cumplen con estos requisitos, se seleccionaron tres configuraciones para los ensayos con carga aplicada en el eje fuerte, y tres con la carga aplicada con el eje débil, que tuvieron un correcto registro de los desplazamientos de la placa base con respecto al bloque de hormigón, es decir, aquellos registros donde se observó una respuesta similar entre las dos probetas simétricas en un ensayo, que permitieron confiar en la suposición de una repartición equitativa de la carga vertical principal, aplicada por la máquina de ensayo.

Para la determinación de las capacidades resistentes nominales en el hormigón, se tomaron las fórmulas disponibles en la Guía de Diseño N°1 de la AISC (2006) y en la ACI349 (2001).

$$V_{hormigón} = 1,32 \cdot f_c' \cdot A_b + 1,84 \cdot (P_y - P_a) \quad \text{Ecuación 11}$$

$V_{hormigón}$ : Capacidad resistente del hormigón.  
 $f_c'$ : Resistencia a la compresión del hormigón.  
 $A_{b1}$ : Área en compresión.  
 $P_y$ : Carga de fluencia de los anclajes (4 pernos con fluencia 2,43 tonf:  $P_y=9,72$  tonf).

Para el caso de la carga aplicada en el eje fuerte, se consideraron dos áreas posibles; una sin considerar el aporte del hormigón atrapado entre las alas del perfil ( $A_{b1}$ ), y la segunda que sí lo considera ( $A_{b2}$ ).

$$A_{b1} = (H - G) \cdot W \quad \text{Ecuación 12}$$

$$A_{b2} = (H - G) \cdot W + (H - G) \cdot (W - t) \quad \text{Ecuación 13}$$

Para el caso de los ensayos en que la carga es aplicada en el eje débil de la llave, el área en compresión se determina de la siguiente manera:

$$A_b = H \cdot W \quad \text{Ecuación 14}$$

La capacidad resistente de la llave de corte considerando una falla por fluencia de la sección, se determina considerando una plastificación completa de la sección transversal y considerando plastificación sólo en el alma para las llaves cargadas en su eje fuerte, y solo en las alas para las llaves cargadas en su eje débil:

$$V_{llave,ef} = A_{alma} \cdot (0,6 \cdot F_y)$$

**Ecuación 15**

$$V_{llave,ed} = A_{alas} \cdot (0,6 \cdot F_y)$$

**Ecuación 16**

$$V_{llave,2} = A_{total} \cdot (0,6 \cdot F_y)$$

**Ecuación 17**

$$V_{llave,2} = A_{total} \cdot (0,6 \cdot F_y)$$

Dónde:

$V_{llave,ef}$ : Capacidad de la llave al corte considerando plastificación solo en el alma.

$V_{llave,ed}$ : Capacidad de la llave al corte considerando plastificación solo en las alas.

$V_{llave,2}$ : Capacidad de la llave al corte considerando plastificación de la sección completa.

$A_{alma}$ : Área del alma de la sección doble T.

$A_{alas}$ : Área de las alas de la sección doble T.

$A_{total}$ : Área de la sección transversal completa.

Según las resistencias obtenidas, se especifica si se espera una falla en el acero (FA), o una falla por aplastamiento del hormigón (AC):

**Tabla 12 Capacidades nominales eje fuerte (Silva, 2012)**

Ensayo	V hormigón [tonf]		V corte [tonf]		Tipo de falla
	A=Ab1	A=Ab2	Fluencia en el alma	Fluencia completa	
1	46	72	10	29	FA
2	30	40	14	29	AC
3	32	46	5	25	FA
4	32	46	42	16	FA
5	35	48	99	103	AC
6	35	48	8	159	AC
7	73	127	15	23	FA
8	73	126	8	45	FA
9	73	127	5	23	FA
10	32	46	10	16	FA

**Tabla 13 Capacidades nominales eje débil (Villar, 2013)**

Ensayo	V hormigón [tonf]	V corte [tonf]		Tipo de falla
		Fluencia en las alas	Fluencia completa	
1	47,1	20,1	29,2	FA
2	50	20,1	29,2	FA
3	29,6	12,06	17,2	FA
4	45,1	76,38	134,1	AC
5	39,1	76,38	105,3	AC
6	51,9	76,38	111,1	AC
7	65,9	24,12	50,6	FA
8	65,9	12,06	26,5	FA

Siguiendo los criterios antes presentados, se seleccionaron las llaves 1, 7 y 8 para el caso de fuerza aplicada en dirección paralela al alma de la llave, y las llaves del mismo número (1, 7 y 8) en el caso de una fuerza aplicada de forma perpendicular al alma

### **3.5. Propiedades geométricas de las llaves seleccionadas**

A continuación se presentan las propiedades geométricas de las llaves que determinan su comportamiento mecánico para sollicitaciones de flexión y corte. Estos valores son determinados según las expresiones exhibidas en el capítulo 2.

#### **3.5.1. Llaves cargadas en su eje fuerte**

**Tabla 14 Propiedades geométrica llaves cargadas en su eje fuerte**

Llave nº	A [cm <sup>2</sup> ]	I <sub>x</sub> [cm <sup>2</sup> ]	W [cm <sup>3</sup> ]	Z <sub>p</sub> [cm <sup>3</sup> ]
1	14,5	256,2	51,24	57,63
7	11,52	362,2	55,7	61,06
8	22,68	682,2	105	117,61

#### **3.5.2. Llaves cargadas en su eje débil**

**Tabla 15 Propiedades geométrica llaves cargadas en su eje débil**

Llave nº	A [cm <sup>2</sup> ]	I <sub>y</sub> [cm <sup>2</sup> ]	W [cm <sup>3</sup> ]	Z <sub>p</sub> [cm <sup>3</sup> ]
1	14,5	83,43	16,69	25,56
7	25,08	337,71	45,03	68,56
8	12,72	168,78	22,50	34,09

## Capítulo 4: Modelo Elementos finitos

En este capítulo se expone la geometría modelada en ANSYS *workbench*. Además se determina el mallado utilizado y lo elementos finitos asignados a cada elemento.

### 4.1. Descripción General

El modelo es realizado en ANSYS *Workbench*, en el ambiente Static Structural. Basado en trabajos anteriores (Nuñez, 2014), a modo de simplificación del modelo, y con el fin de centrarse en los modos de falla de interés, se modelan solo los elementos de mayor importancia. Utilizando la herramienta Design Modeler de Ansys *Workbench*, se crea el bloque de hormigón, el grout, la llave de corte y la placa base de acero. Se asume que las perforaciones para los pernos de anclaje en la placa base son lo suficientemente grandes para que éstos no contribuyan a la resistencia al corte del sistema, por lo que se excluyen los pernos del modelo. En la Figura 15 se encuentra una vista isométrica del sistema modelado, mientras que en la Figura 16 se puede observar cada elemento modelado, por separado.

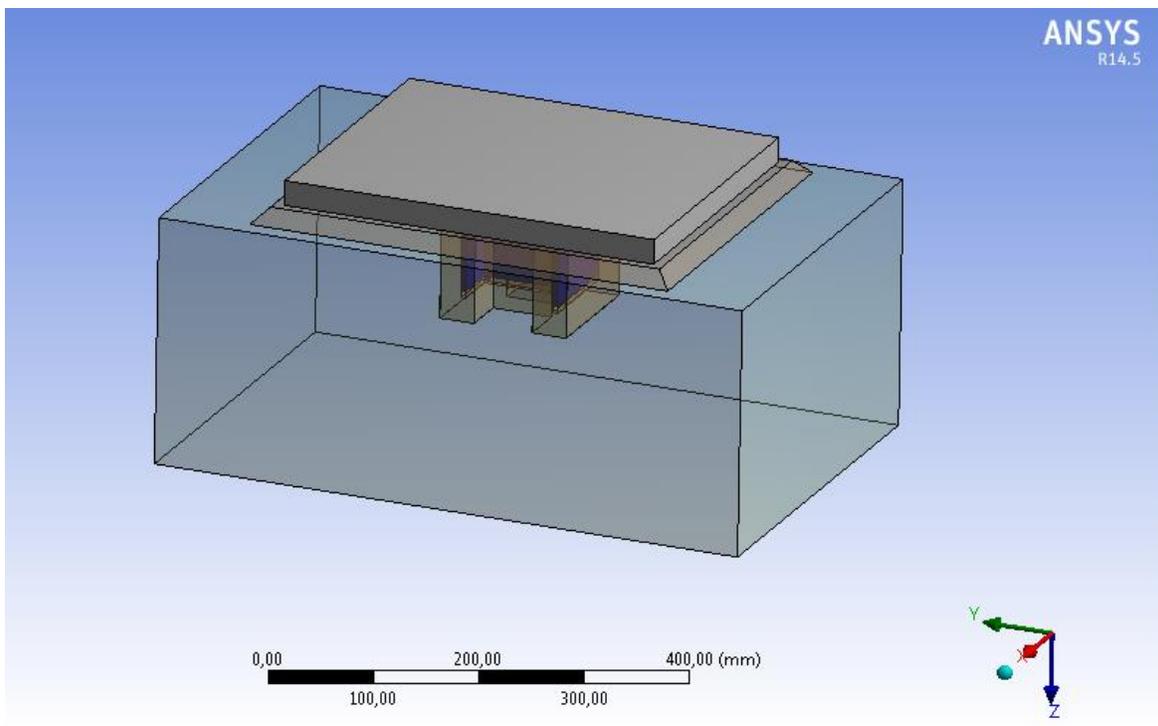
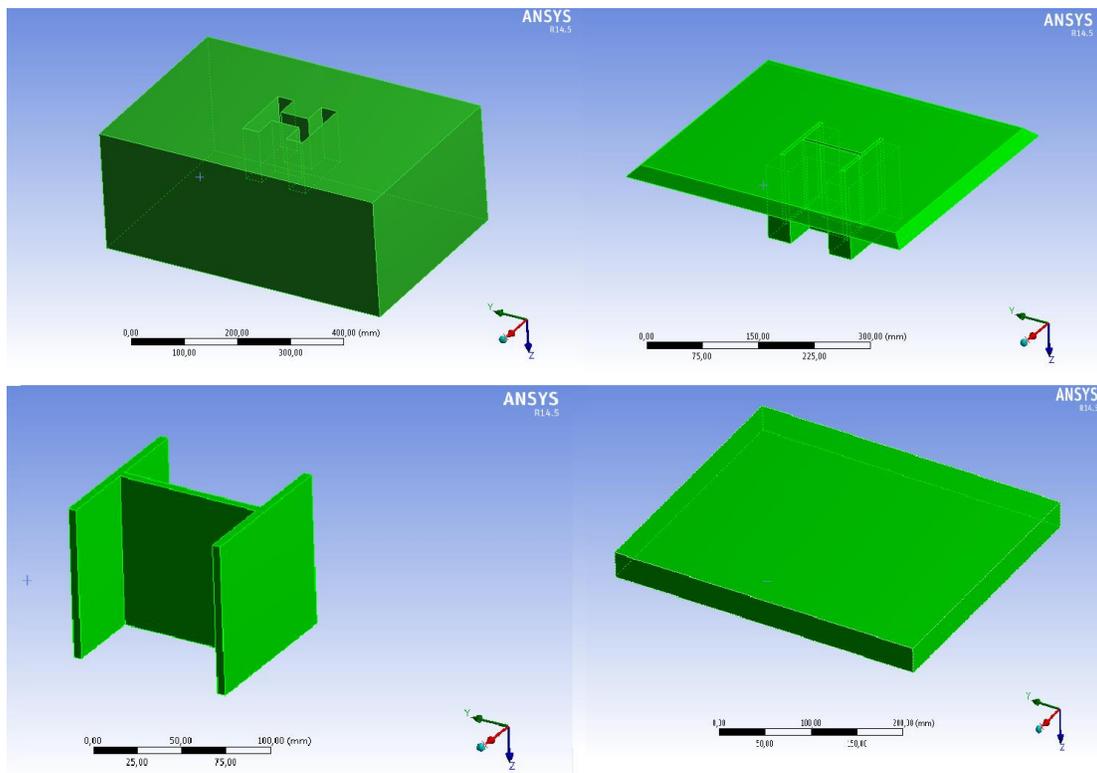


Figura 15 Vista Isométrica del modelo ANSYS



**Figura 16 Vistas aisladas de los elementos del modelo ANSYS**

## 4.2. Solicitaciones y Condiciones de Borde

Para simular el comportamiento del conjunto de la fundación con la llave de corte durante un traspaso de esfuerzos de corte desde la columna de acero hacia la fundación, se impone un desplazamiento sobre la placa base, paralelo a la superficie de contacto entre ésta y el bloque de hormigón.

El bloque de hormigón está fijado en la cara vertical que se opone al desplazamiento de la placa base, y restringido al movimiento vertical en su cara inferior (Figura 17).

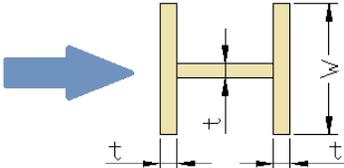


**Figura 17 Condiciones de Borde**

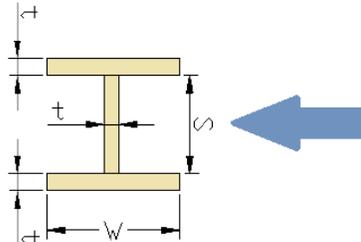
### 4.3. Geometría de los Especímenes Modelados

Según la selección descrita anteriormente, se modelan las siguientes geometrías para las llaves de corte:

**Tabla 16 Modelos con desplazamiento aplicado en eje fuerte**

	Llave	W [mm]	H [mm]	t [mm]	S [mm]	G [mm]
	1	100	100	5	90	15
4	100	75	3	75	15	
7	130	150	3	124	15	

**Tabla 17 Modelos con desplazamiento aplicado en eje débil**

	Llave	W [mm]	H [mm]	S [mm]	t [mm]	G [mm]
	1	100	100	90	5	15
7	100	130	118	6	15	
8	150	130	124	3	15	

### 4.4. Contactos

Para los contactos llave de corte-placa base y grout-hormigón, se opta por un contacto tipo "bonded". Este restringe el desplazamiento relativo y la separación entre las dos superficies conectadas. Por otro lado, para las conexiones grout-placa base y llave de corte-grout se utiliza un contacto friccional. Este permite el deslizamiento entre las superficies

El programa permite asignar propiedades a los contactos entre los elementos, con el fin de representar de mejor forma el comportamiento real de la estructura. Al definir el par de superficies que se encuentran en contacto, una de las caras es asignada como "contact" y la otra como "target". Luego, es necesario determinar si se trata de un contacto simétrico o asimétrico. En un contacto tipo simétrico ambas superficies en están restringidas a penetrarse, mientras que en un contacto tipo asimétrico, la superficie asignada como "target" puede penetrar a la superficie "contact", sin embargo la superficie "contact" no puede penetrar al target (Figura 18). Un contacto simétrico requiere un mayor trabajo computacional.

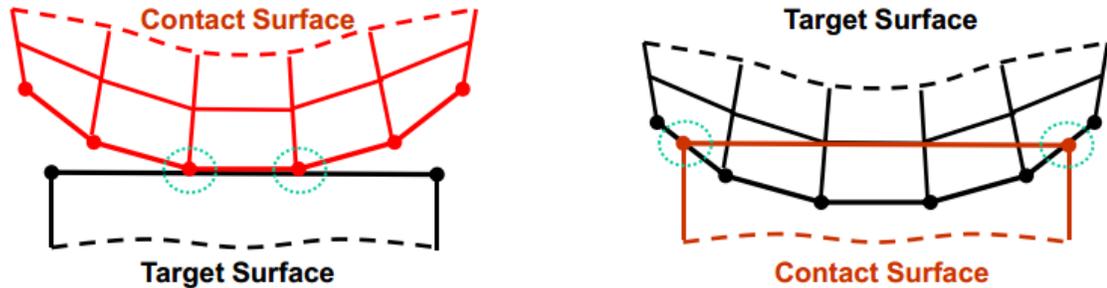


Figura 18 Contacto tipo asimétrico

En este trabajo, se consideran contactos tipo asimétricos, ya que la rigidez del acero a la penetración es considerablemente mayor que la del hormigón y el grout. Es por esto que se definen las superficies de los elementos de acero como el "target" y las de los elementos de hormigón como "contact".

Las asignaciones realizadas en el modelo puede observarse en la Tabla 18.

Tabla 18 Asignación de contactos

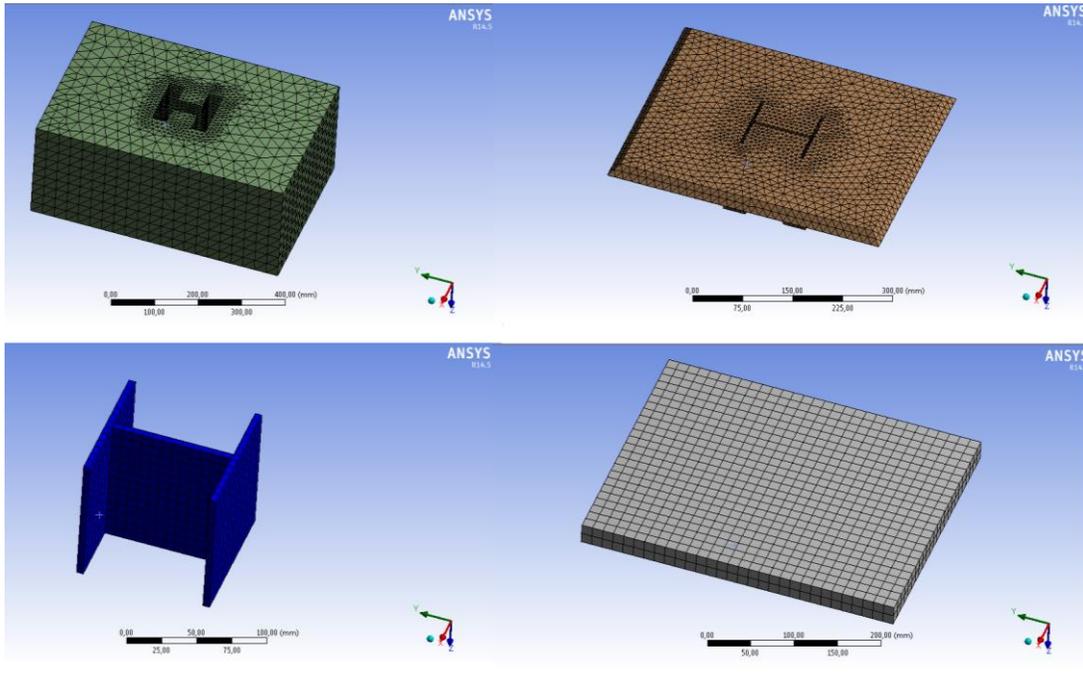
	Target	Contact	Tipo
<b>Bloque con Grout</b>	Grout	Bloque	<i>Bonded</i>
<b>Grout con Llave de Corte</b>	Llave de Corte	Grout	<i>Frictional</i>
<b>Grout con Placa Base</b>	Placa Base	Grout	<i>Frictional</i>
<b>Llave de Corte con Placa Base</b>	Placa Base	Llave de Corte	<i>Bonded</i>

#### 4.5. Mallado

La configuración inicial del mallado utilizado, se basa en el trabajo realizado por Nuñez (2014). Se comienza definiendo un mallado uniforme, incorporando una función avanzada de tamaño ("Advanced Sizing Function"), disponible en ANSYS, que reconoce zonas donde se esperan los mayores gradientes de tensiones, y se aumenta el refinamiento de los elementos en estos lugares. Además se utiliza un control de tamaño ("Contact Sizing Control") en los contactos no lineales friccionales entre el grout y la llave de corte y entre el grout y la placa base. Esta función permite obtener un mallado más uniforme y más fino en las zonas de contacto para lograr una mejor distribución de la presión de contacto, disminuyendo los problemas de convergencia. Además, se realiza un mapeado de cara ("Mapped Face") sobre el grout y el bloque, lo que genera un patrón de mallado uniforme sobre las cuatro caras laterales y la cara inferior del bloque de hormigón, y sobre las caras internas del grout que están en contacto con la llave de corte.

Se realiza un análisis de sensibilidad refinando el tamaño de los elementos en la llave, y en la casilla del bloque que contiene el grout y la llave (Debido que en esta zona se esperan las mayores concentraciones de tensiones y deformaciones). Finalmente se logra un mallado que entrega soluciones con un nivel de detalle satisfactorio, y en un tiempo de ejecución aceptable.

En la Figura 19 se puede apreciar el mallado definido en cada elemento modelado, según lo descrito anteriormente.



**Figura 19 Detalle mallado en elementos**

#### **4.6. Elementos**

Las Tabla 19 y Tabla 20 exponen los elementos sólidos y de contacto que se utilizaron en los modelos. Estos fueron determinados considerando los comportamientos esperados de cada material y el objetivo de los análisis de los modelos, tomando en cuenta trabajos similares realizados anteriormente (Nuñez, 2014). Principalmente, se optaron por elementos que permitieran grandes deformaciones y soportaran materiales no lineales.

**Tabla 19 Asignación de tipo de elementos sólidos**

<b>Geometría</b>	<b>Tipo de elemento sólido</b>
Bloque	Solid285
Grout	Solid285
Llave de corte	Solid185
Placa base	Solid185

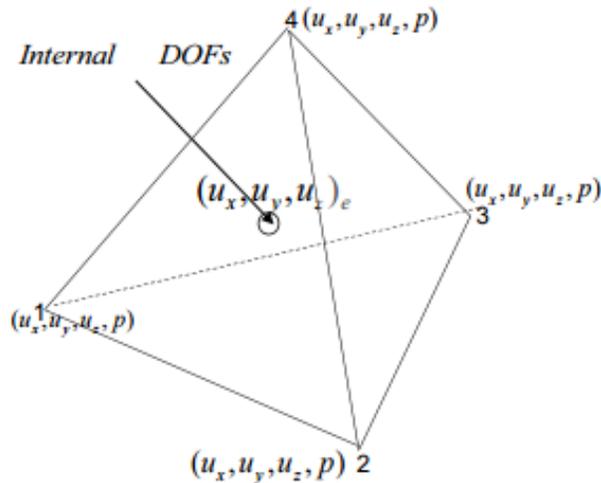
**Tabla 20 Asignación de tipo de elementos de contacto**

<b>Contacto</b>	<b>Superficie</b>	<b>Tipo de elemento de contacto</b>
Bloque – Grout	Bloque	Conta174
	Grout	Targe170
Grout – Llave de corte	Grout	Conta174
	Llave de corte	Targe170
Grout – Placa base	Grout	Conta174
	Placa base	Targe170
Llave de corte – Placa base	Llave de corte	Conta174
	Placa base	Targe170

A continuación se presenta una pequeña descripción de los elementos presentes en los modelos.

### **Solid 285**

Es un elemento 3-D de 4 nodos, cada uno con cuatro grados de libertad (tres de traslación y uno de presión hidrostática). Es útil en la modelación de cuerpos irregulares, y para materiales generales. Permite modelar plasticidad, *creep*, grandes deformaciones y tensiones.



**Figura 20 Elemento solid 285 (ansys.com)**

### **Solid 185**

Es un elemento 3-D de 8 nodos, con 3 grados de libertad en cada nodo (Traslación en x y z). El elemento permite la modelación de plasticidad, *creep* y grandes deformaciones, entre otras propiedades. Además cuenta con capacidad de incorporar formulaciones para la simulación de deformaciones de materiales elastoplásticos casi y totalmente incompresibles.

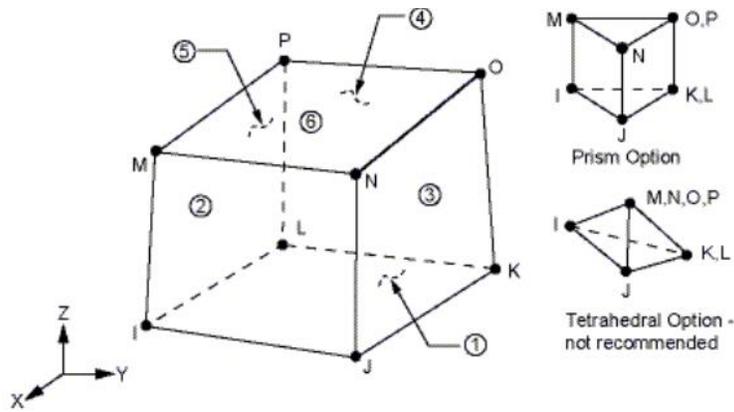


Figura 21 Elemento solid 185 (ansys.com)

### Conta 174

Es un elemento de contacto que se utiliza para representar el contacto y deslizamiento entre la superficie de un cuerpo 3-D "target", y una superficie deformable, definida por este elemento. Tiene tres grados de libertad en cada nodo (traslación en x y z). Adquiere la misma geometría que el elemento sólido al cual está conectado. Además permite la fricción tipo Coulomb y de tensión de corte.

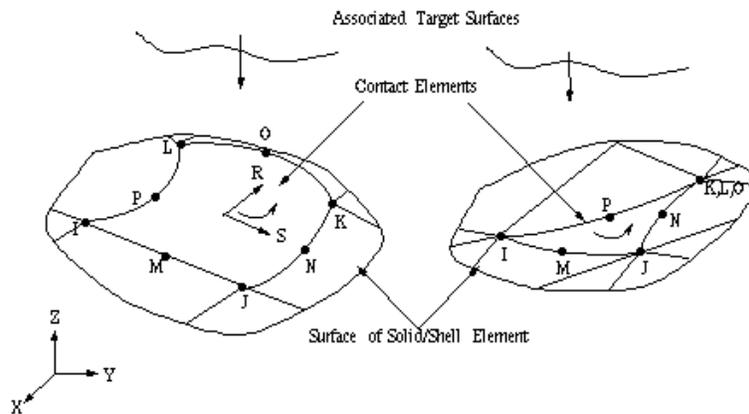
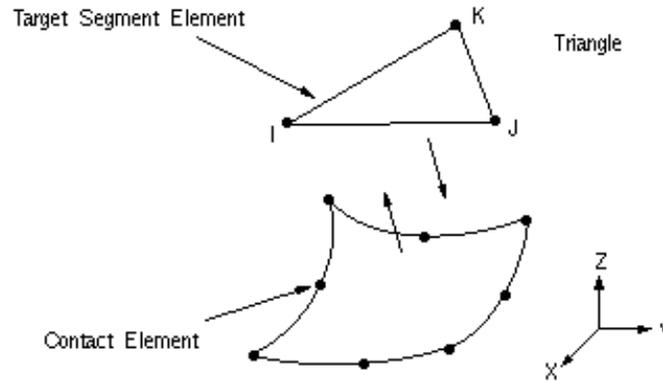


Figura 22 Elemento Conta 174 (ansys.com)

### Targe 170

Es un elemento de contacto que se usa para representar la superficie de un "target" asociado a un elemento de contacto (conta174). Esta superficie es discretizada en un grupo de elementos target y es asociada con su par de superficie de contacto.



**Figura 23 Elemento Targe 170 (ansys.com)**

## 4.7. Materiales

Tomando en cuenta las propiedades mecánicas medidas de los materiales ocupados en los ensayos realizados, se utilizan los siguientes modelos de materiales existentes:

### 4.7.1. Hormigón

Utilizando la resistencia a la compresión obtenida experimentalmente, se determina el módulo de Young (ACI 318-08), y la tensión de rotura del hormigón a tracción:

$$E_c = 4700\sqrt{f'_c}$$

**Ecuación 18**

$$f_r = 0,62\sqrt{f'_c}$$

**Ecuación 19**

- $E_c$ : Módulo de elasticidad del hormigón (MPa).
- $f'_c$ : Resistencia a la compresión cilíndrica (MPa).
- $f_r$ : Tensión de rotura a tracción del hormigón (MPa).

Finalmente, las propiedades del hormigón utilizadas en los modelos son las siguientes:

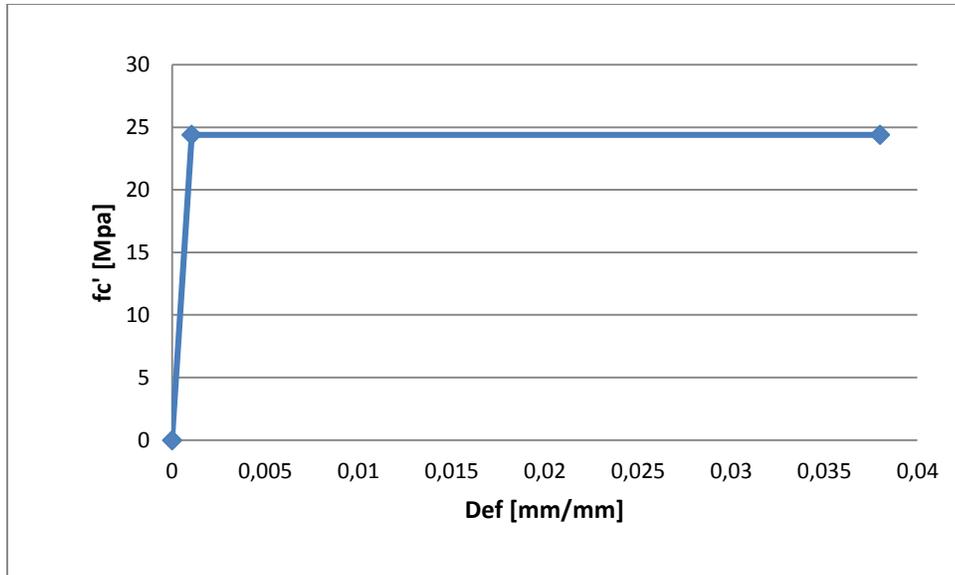
**Tabla 21 Asignación de Materiales para carga aplicada en el eje fuerte: Hormigón**

Llave	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	$\nu$	$f'_c$ (MPa)	$E_c$ (MPa)	$f_r$ (MPa)
1	2500	0,2	24,4	23216,3	3,06
7	2500	0,2	23,4	22784,1	3,00
8	2500	0,2	23,4	22784,1	3,00

**Tabla 22 Asignación de Materiales para carga aplicada en el eje débil: Hormigón**

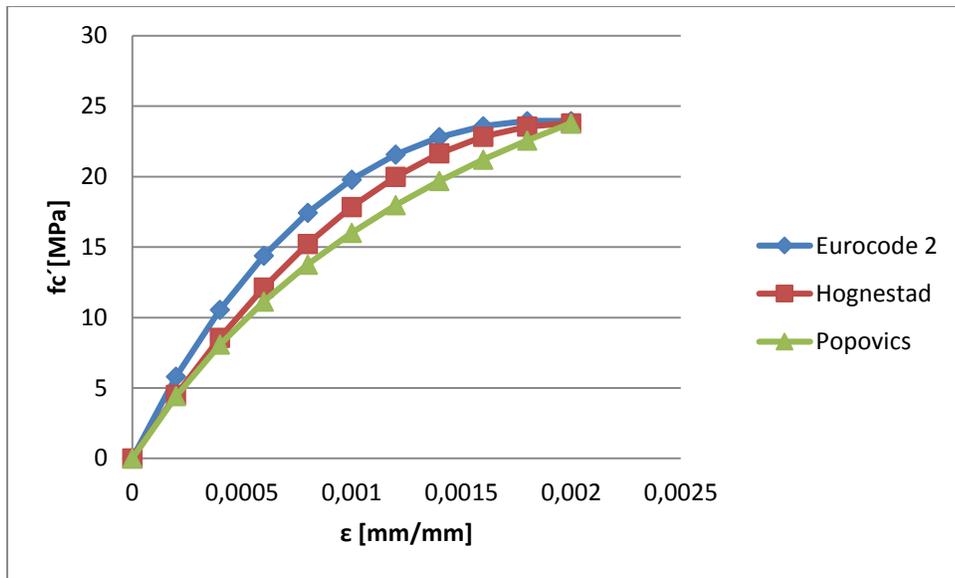
Llave	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	$\nu$	$f'_c$ (MPa)	$E_c$ (MPa)	$f_r$ (MPa)
1	2500	0,2	25,5	23733,8	3,13
7	2500	0,2	23,8	222929,1	3,02
8	2500	0,2	23,8	22929,1	3,02

Se considera un modelo bilineal y tres modelos no lineales del hormigón para encontrar el mejor ajuste. A continuación se grafican los modelos considerados para la modelación de la llave 1, con la carga aplicada en el eje fuerte.



**Figura 24 Curva esfuerzo-deformación bilineal del hormigón**

Se consideran tres modelos parabólicos del hormigón, el propuesto por el Eurocode 2 (1992), Hognestad (1955) y Popovics (1973). Al incorporar estos modelos en el programa ANSYS se discretizan las curvas en 10 puntos, como se puede apreciar en la siguiente figura. Estas se pueden observar en la Figura 25.



**Figura 25 Curva esfuerzo-deformación parabólico del hormigón**

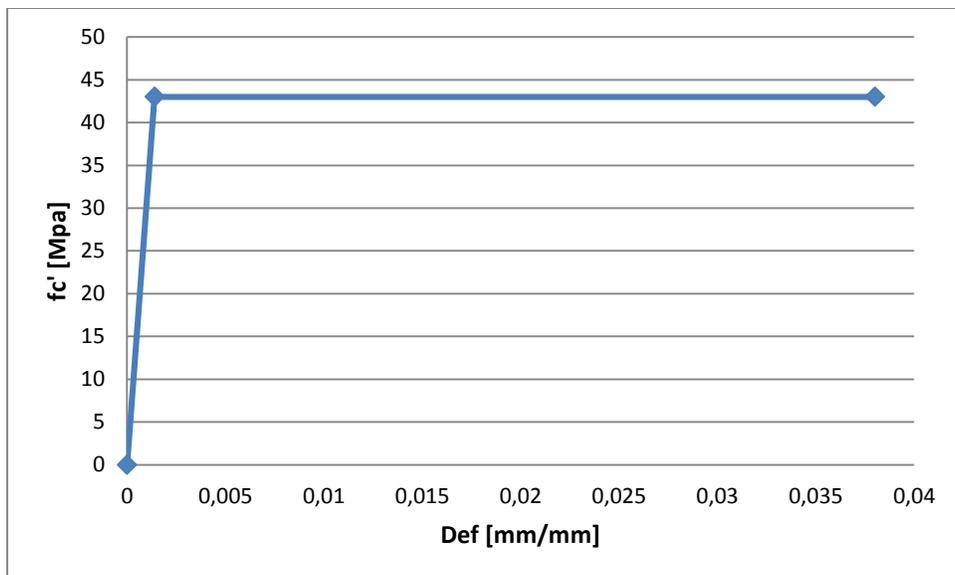
#### 4.7.2. Grout

Para la modelación del grout se utilizan las mismas relaciones que las usadas para determinar el módulo de Young y la tensión de rotura del hormigón. Las propiedades resultantes se muestran en la Tabla 24

**Tabla 23 Asignación de Materiales: Grout**

$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	$\nu$	$f'_c$ (MPa)	$E_c$ (MPa)	$f_r$ (MPa)
2400	0,2	43	30820	4,07

El comportamiento del grout se representa con una curva bilineal, que se puede ver a continuación.



**Figura 26 Curva esfuerzo-deformación para el grout**

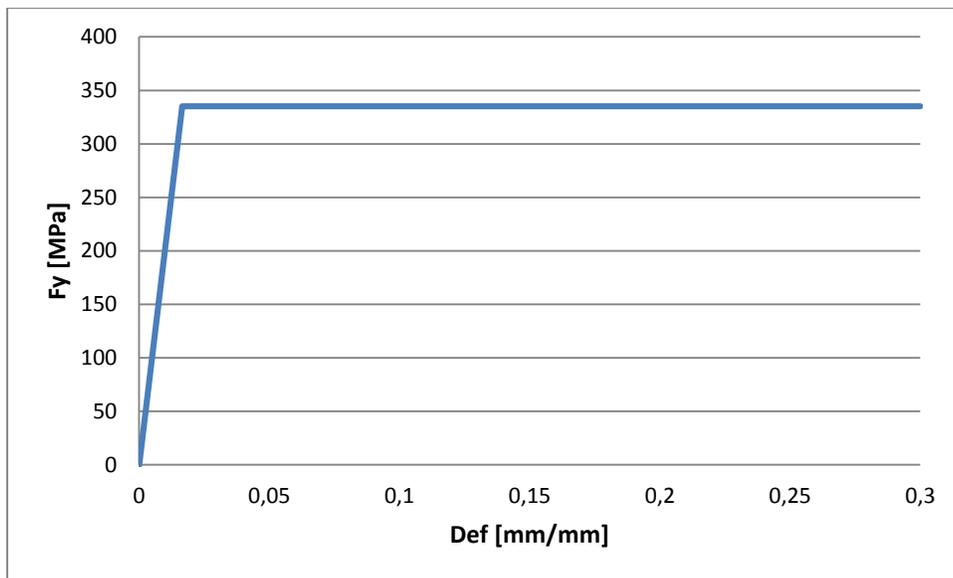
### 4.7.3. Acero

Para el modelamiento del acero, se utiliza el modulo elástico recomendado por la AISC de 200.000 MPa y la tensión de fluencia identificada en los ensayos.

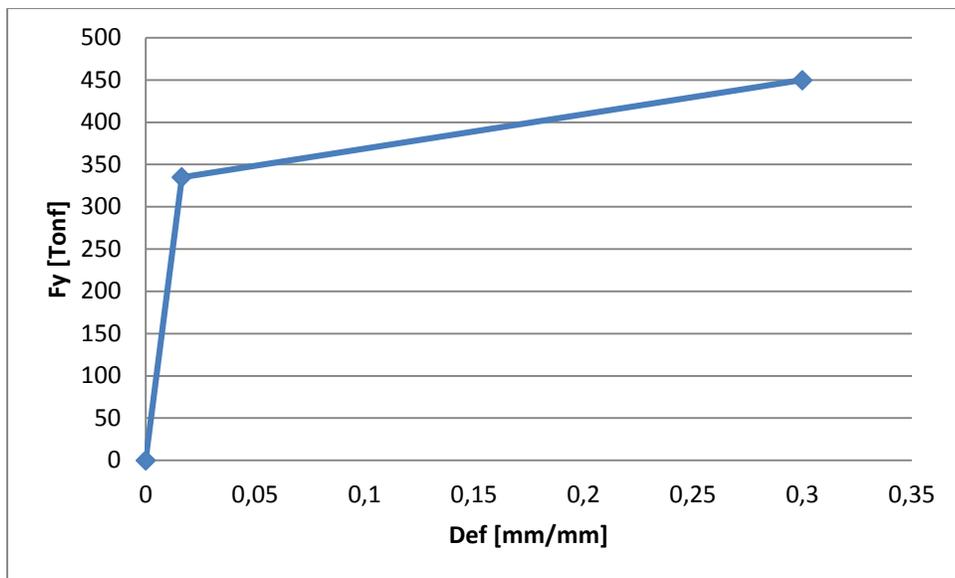
**Tabla 24Asignación de Materiales: Acero A36**

$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	$\nu$	$f_y$ (MPa)	$E$ (MPa)	$\epsilon_u$
7850	0,3	335	200000	0,3

Al igual que para el hormigón, se consideran dos modelos para el acero. Con endurecimiento y sin endurecimiento. Ambos son modelos bilineales. La Figura 27 muestra la curva carga-deformación considerada para el acero sin endurecimiento, mientras que la Figura 28 considera endurecimiento.



**Figura 27 Modelo del acero sin endurecimiento**



**Figura 28 Modelo del acero con endurecimiento**

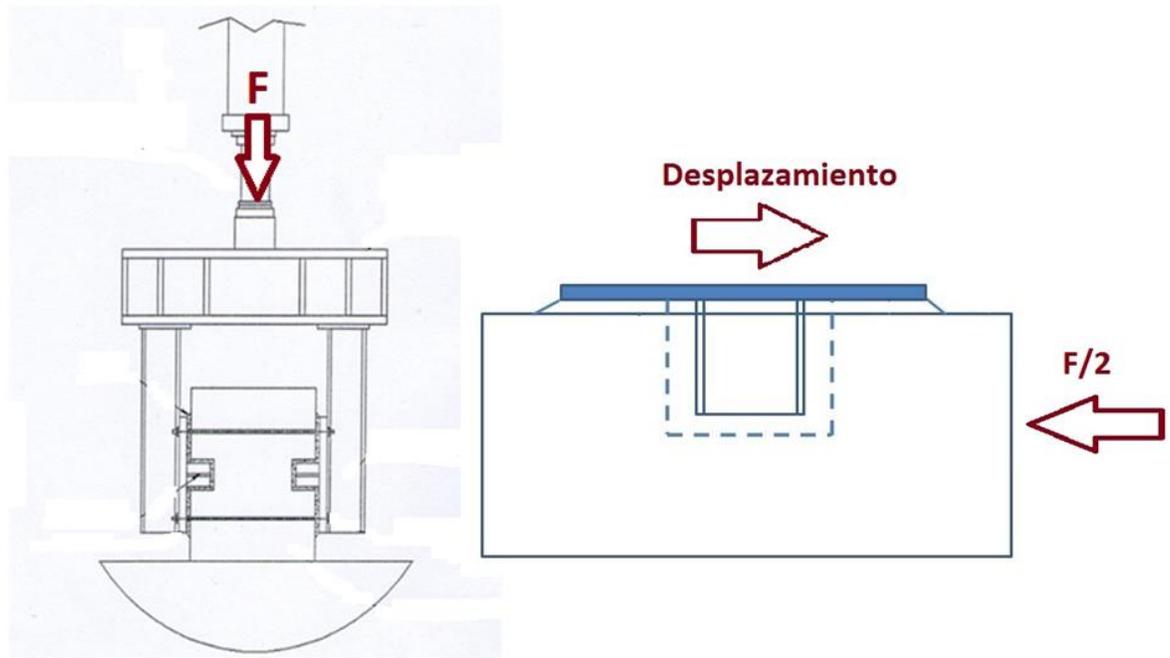
#### **4.8. Calibración Modelo de Elementos Finitos**

Mediante la calibración de los modelos, se busca validar la respuesta global del sistema obtenido de éstos, comparándola con la respuesta obtenida experimentalmente. La calibración se lleva a cabo variando ciertos parámetros del sistema y analizando su influencia en los resultados obtenidos. Con esto se espera determinar los valores que reproducen el comportamiento real que obtuvieron las probetas en los ensayos.

La calibración se realiza con el modelo de la llave nº1 con la carga aplicada en el eje fuerte, y luego se comprueba que los parámetros encontrados sean adecuados para todos los ensayos.

En el modelo, la reacción obtenida en la cara vertical fija del bloque de hormigón representa la fuerza aplicada por la maquinaria de ensayo sobre una de las placas bases. Asumiendo que la fuerza total aplicada "F" se distribuye de forma equitativa sobre las dos placas, debido a la simetría de

la instalación, la reacción obtenida en la cara fija, corresponde la mitad de la carga  $F$  (Ver Figura 29).



**Figura 29 Montaje ensayo vs. Modelo ANSYS**

Al estudiar la respuesta obtenida en los ensayos, se aprecia que no siempre el supuesto de simetría en la instalación de las probetas. Es por esto que se obtiene además el desplazamiento obtenido en ambas llaves de la instalación versus la carga total  $F$ , lo que es comparado con la carga necesaria para producir los desplazamientos medidos en los ensayos (Valores extraídos del modelo ANSYS). De esta forma se espera independizar del problema la posibilidad de falta de simetría en la instalación.

#### **4.8.1. Modelos de curvas deformación-tensión para el hormigón**

Al incorporar el comportamiento del hormigón en el ensayo, se consideran modelos lineales y parabólicos. En esta etapa se espera determinar si la simplificación a un modelo bilineal es suficiente para la modelación, o si es necesario recurrir a un modelo más complejo. Además se espera determinar si existe alguna influencia relevante en la respuesta del modelo frente a la curva tensión-deformación parabólica elegida para el hormigón.

De la Figura 30 se puede notar que la respuesta del modelo que incorpora una curva parabólica de tensión-deformación es ligeramente más cercana a la respuesta obtenida en los ensayos. A pesar de que la diferencia es casi imperceptible, se considera que la utilización de la curva parabólica

significa poco esfuerzo computacional adicional, por lo que se opta por utilizar esta configuración en todos los modelos ANSYS de las llaves.

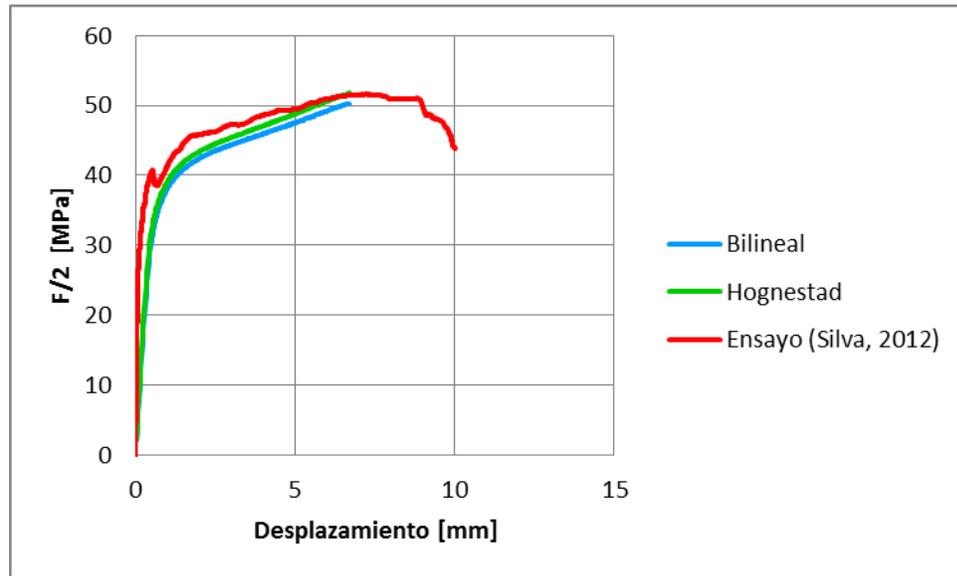


Figura 30 Comparación modelos del hormigón bilineal vs. Parabólico para llave 1

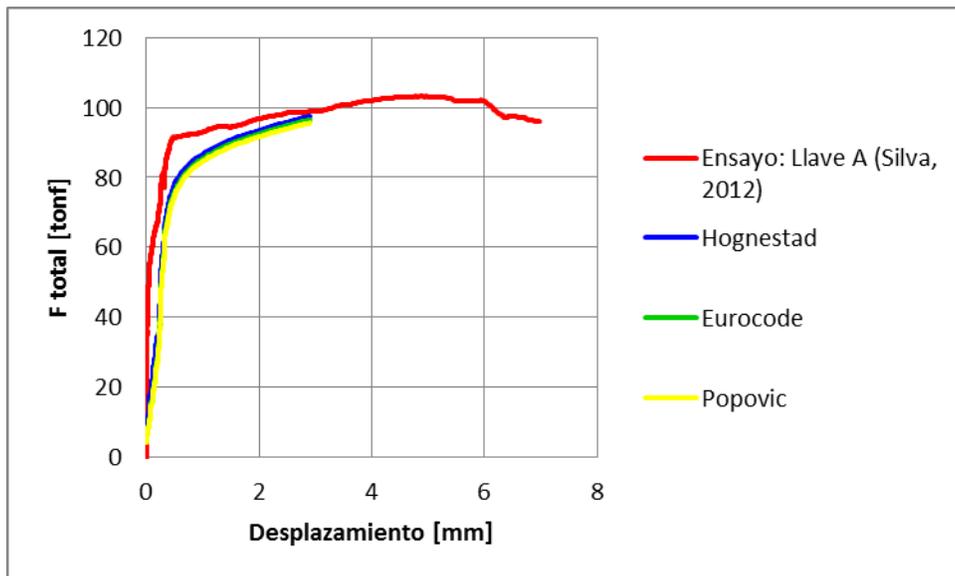
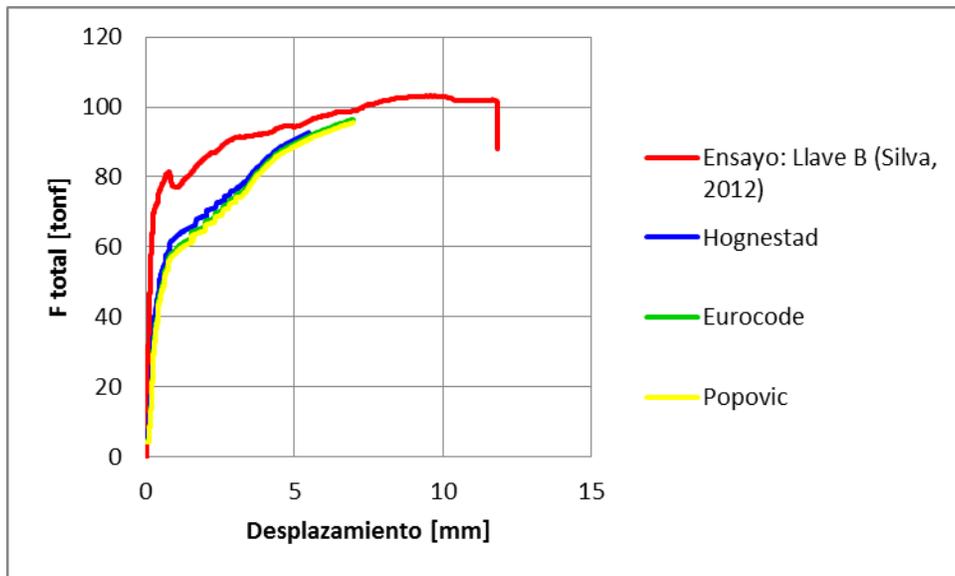


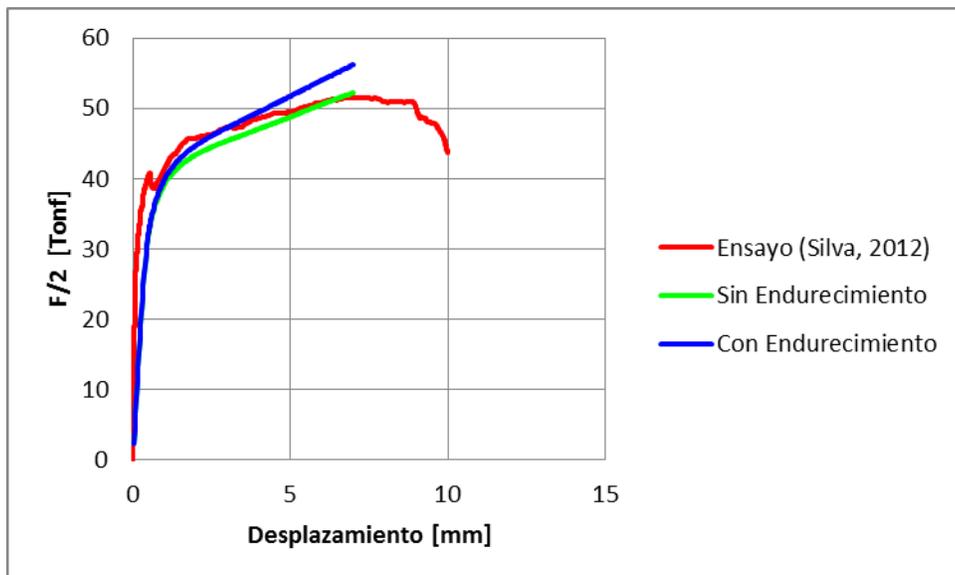
Figura 31 Comparación modelos parabólicos del hormigón para llave 1A



**Figura 32 Comparación modelos parabólicos del hormigón para llave 1B**

En la Figura 31 y en la Figura 32 se aprecia que no hay diferencia considerable en las respuestas de los modelos que consideran distintas curvas parabólicas para el hormigón. Se concluye que no hay relevancia en el modelo parabólico elegido.

#### **4.8.2. Modelos de curva deformación-tensión para el acero:**



**Figura 33 Comparación acero con endurecimiento vs. Acero sin endurecimiento**

Se comparan las respuestas del modelo con la respuesta obtenida en el ensayo considerando distintas propiedades para el acero de la llave, y se observa que considerando un modelo que incorpora el endurecimiento del acero, la respuesta de éste se aleja de la respuesta real en el ensayo. Esto sugiere que las deformaciones en la llave no son suficientemente grandes para alcanzar el endurecimiento del acero.

### 4.8.3. Coeficiente de fricción

Se define un coeficiente de fricción estático, para los contactos friccionales (Llave-Grout y Placa-Grout). Se obtienen resultados considerando valores de  $\nu$  entre 0,1 y 0,3:

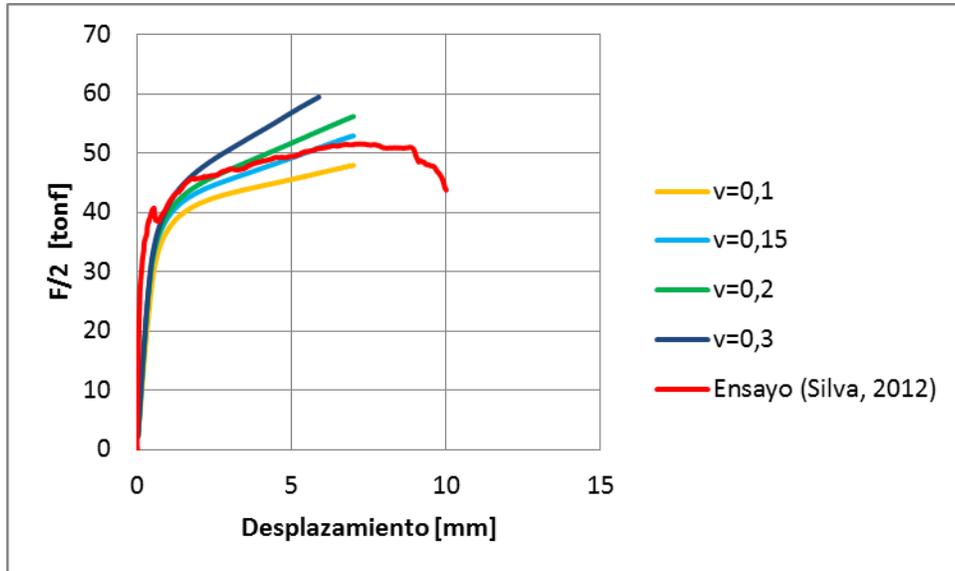


Figura 34 Comparación módulos de fricción para llave 1

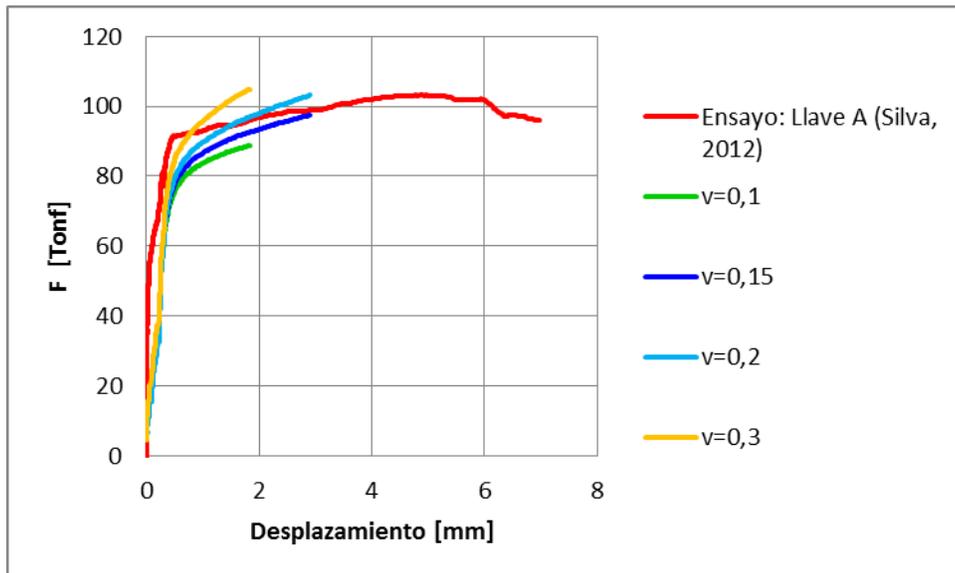
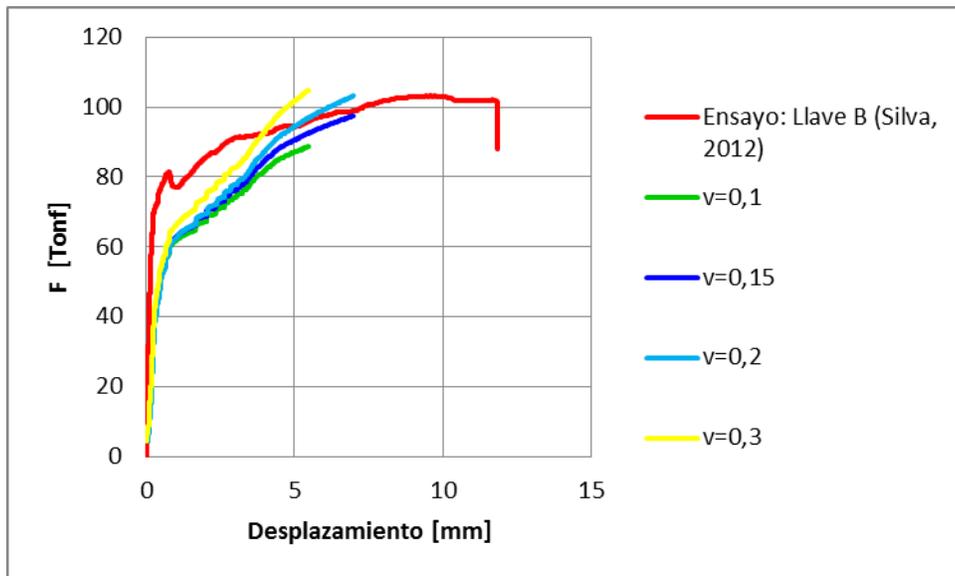


Figura 35 Comparación módulos de fricción para llave 1A



**Figura 36 Comparación módulos de fricción para llave 1B**

Se observa que el valor de éste tiene una gran influencia en la respuesta no lineal. Un aumento en el coeficiente de fricción aumenta la pendiente post fluencia del sistema. Observando las figuras anteriores, se opta por un coeficiente de fricción de  $\nu = 0,15$ .

#### 4.9. Resumen modelo ANYS

Analizando las comparaciones realizadas durante la calibración, se eligen las siguientes propiedades del modelo:

**Tabla 25 Parámetros de calibración**

<b>Modelo Hormigón</b>	Hognestad
<b>Modelo Acero</b>	Sin endurecimiento
<b>Coefficiente de fricción</b>	$\nu = 0,15$

Finalmente, se obtienen modelos de elementos finitos para cada llave analizada. En la Tabla 26 se resumen el número de nodos y elementos del modelo de la llave nº 1. El resto de los modelos cuentan con valores similares.

**Tabla 26 Características modelo ANSYS Llave nº1**

	<b>Nº nodos</b>	<b>Nº elementos</b>
<b>Bloque</b>	6703	31869
<b>Grout</b>	8655	35152
<b>Llave de corte</b>	1092	494
<b>Placa base</b>	2325	1440
<b>Total</b>	<b>18775</b>	<b>68955</b>

## Capítulo 5: Resultados obtenidos de los modelos ANSYS

En este capítulo se presenta el análisis de los modelos realizados en ANSYS. Se exponen las respuestas obtenidas en éstos, concentrándose en aquellos aspectos que permiten caracterizar el modo de falla de las llaves y finalmente determinar si se cumple la hipótesis de viga en cantiléver asumida por las recomendaciones para diseño de las llaves de corte. En específico, se exhiben los resultados en deformación y tensiones en las tres llaves de corte para las dos situaciones estudiadas: con la carga aplicada en el eje fuerte, y la carga aplicada en el eje débil. Además, se incluyen resultados en tensión y deformación para el bloque de hormigón y el Grout, ya que a pesar de no ser el objetivo de estudio de este trabajo, se estima que al conocer la respuesta de éstos se obtiene un mejor entendimiento del comportamiento general del sistema analizado.

El desplazamiento aplicado sobre la placa base en los modelos, corresponde al máximo que permite la convergencia de estos. Al aplicar un desplazamiento mayor, las grandes deformaciones en los elementos provocan una inestabilidad en el sistema y el modelo no logra un equilibrio de fuerzas, y no converge.

**Tabla 27 Desplazamiento total aplicado en modelo, eje fuerte**

Llave n°	Desplazamiento [mm]
1	7
7	5
8	6,3

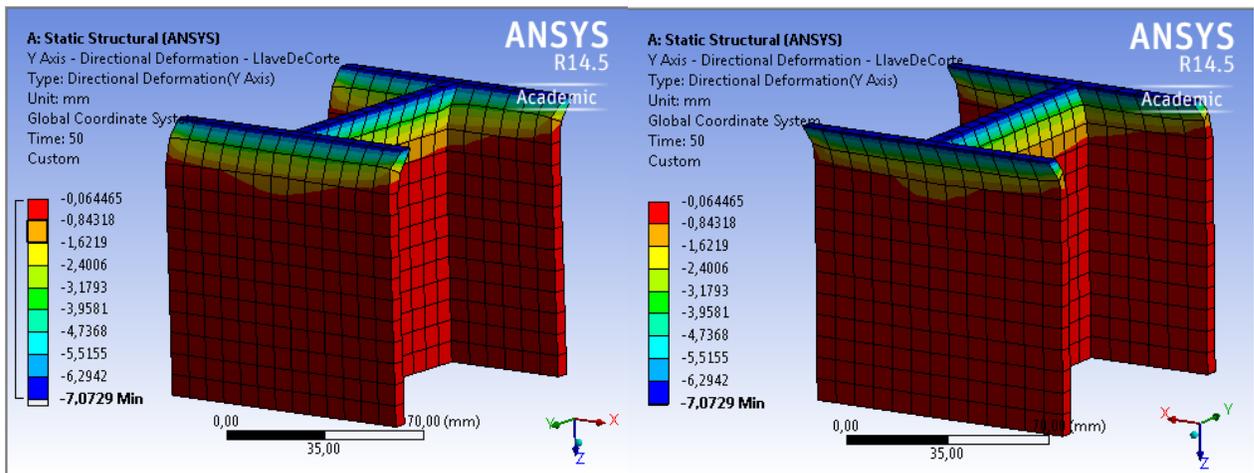
**Tabla 28 Desplazamiento total aplicado en modelo, eje débil**

Llave n°	Desplazamiento [mm]
1	5,8
7	5,2
8	5

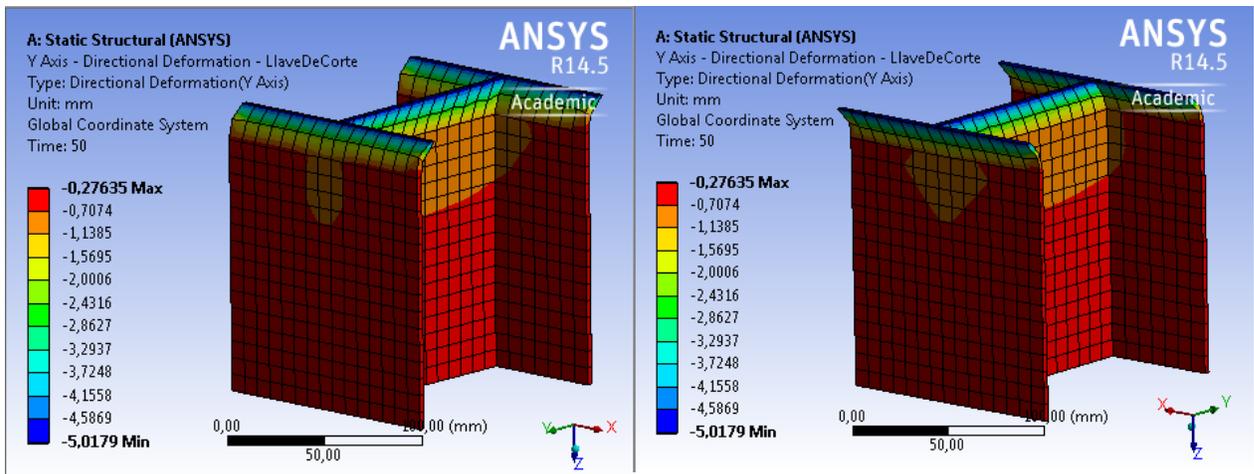
### 5.1. Desplazamientos en la llave de corte

#### 5.1.1. Modelos con carga aplicada en el eje fuerte

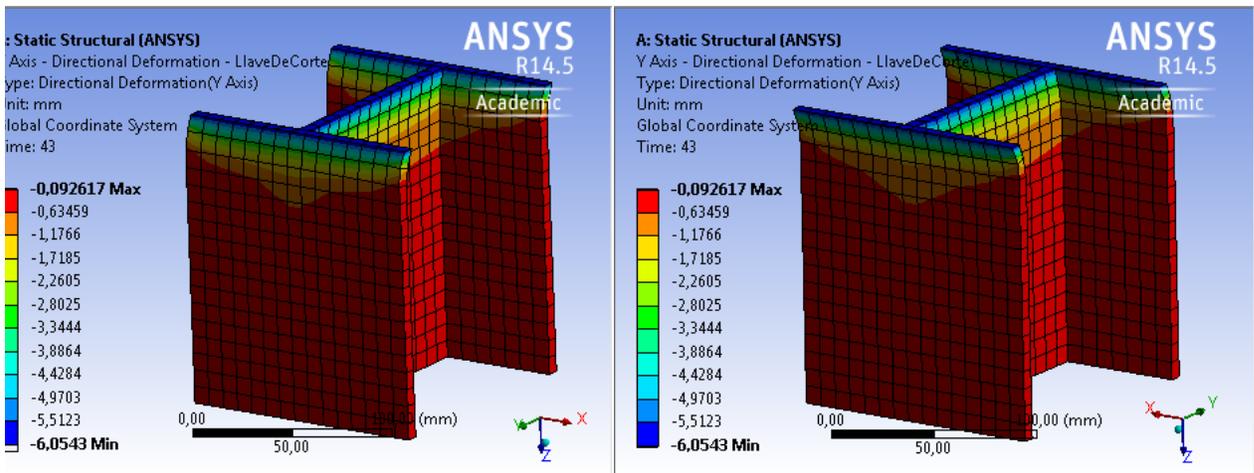
A continuación se muestran los desplazamientos en las llaves de corte, en la dirección del desplazamiento de la placa base (Dirección eje Y). Las imágenes siguientes corresponden al estado de las llaves para el último estado de carga de las llaves 1, 7 y 8.



**Figura 37 Deformada Llave 1, eje fuerte a) Vista frontal b) Vista trasera**



**Figura 38 Deformada Llave 7, eje fuerte a) Vista frontal b) Vista trasera**



**Figura 39 Deformada Llave 8, eje fuerte a) Vista frontal b) Vista trasera**

En las figuras anteriores, se puede apreciar que en las tres llaves los desplazamientos se concentran en las zonas cercanas a la superficie de conexión con la placa base. El desplazamiento máximo, corresponde a la

misma impuesta a la placa base para el último estado de carga (7, 5 y 6 mm, para las llaves 1, 7 y 8 respectivamente) y se produce en la superficie de contacto. Se puede notar que en las tres llaves se superan los 5 mm de desplazamiento. Éste va disminuyendo hasta aproximadamente la profundidad donde se ubica la cara superior del bloque de hormigón. La zona de la llave de corte que se encuentra inserta en el bloque prácticamente no presenta desplazamientos. La forma en que se deforman las llaves modeladas coincide con lo observado en los ensayos, y es consistente con un estado de desplazamientos de corte dominante en las llaves.

### 5.1.2. Modelos con carga aplicada en el eje débil

En las Figura 40, Figura 41 y Figura 42 se puede observar la deformación para el último estado de carga de la llave, en la dirección en que se aplica el desplazamiento sobre la placa (Eje X). Las imágenes corresponden al estado de las llaves para el último estado de carga de las llaves 1, 7 y 8.

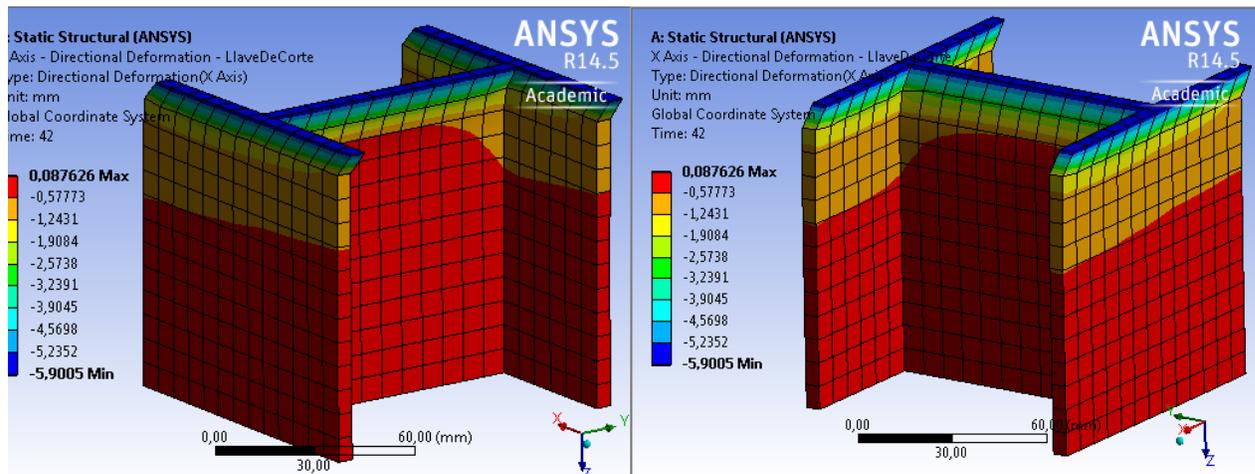


Figura 40 Deformada Llave 1, eje débil a) Vista frontal b) Vista trasera

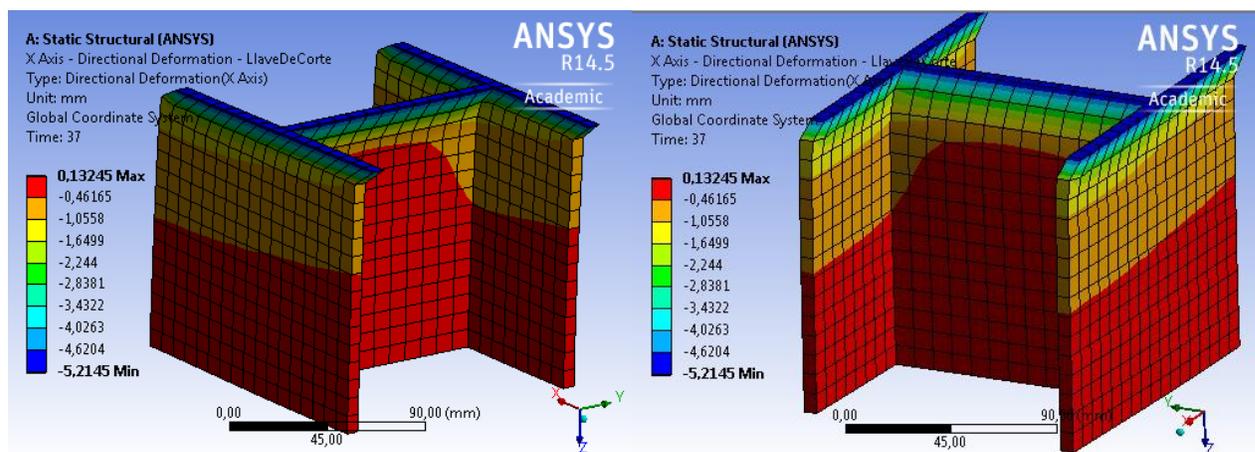
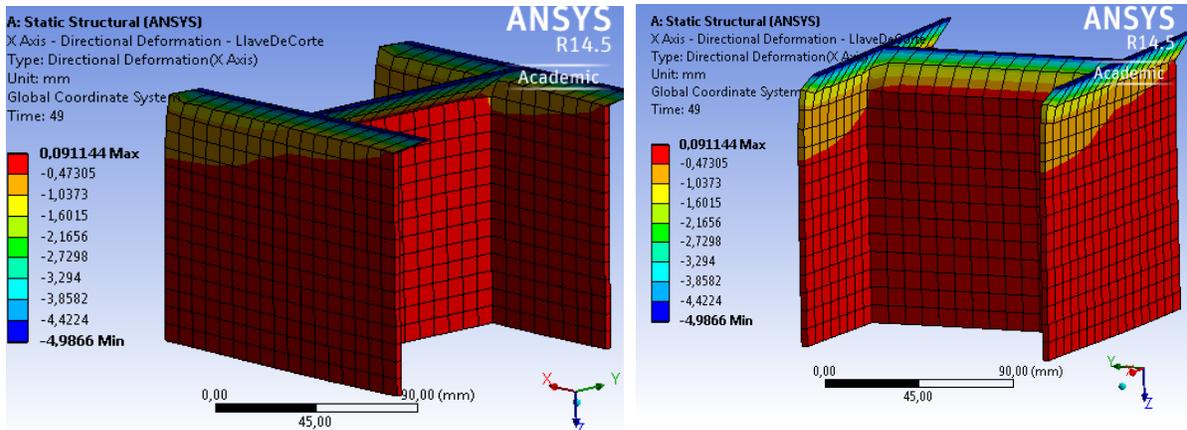


Figura 41 Deformada Llave 7, eje débil a) Vista frontal b) Vista trasera



**Figura 42 Deformada Llave 8, eje débil a) Vista frontal b) Vista trasera**

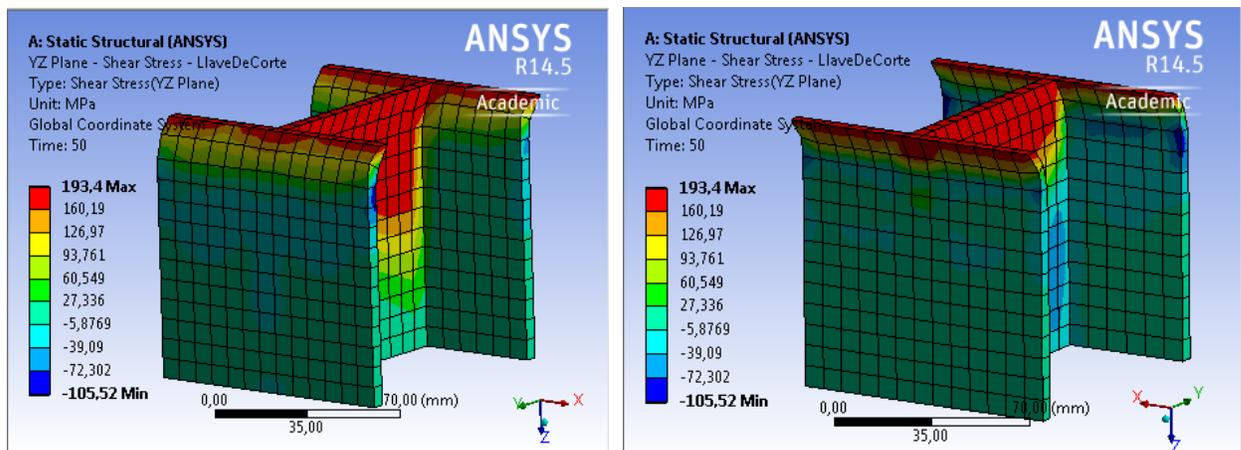
Se observa que al igual que las llaves con desplazamiento aplicado en el eje fuerte, en este caso el mayor desplazamiento se produce en toda la superficie en contacto con la placa base, donde alcanza un desplazamiento casi igual al aplicado en la placa. El desplazamiento se concentra en la parte superior de la llave, y ésta se mantiene prácticamente sin desplazamiento en el resto del perfil.

## 5.2. Tensiones en la llave de corte para llaves cargadas en su eje fuerte

### 5.2.1. Tensiones de corte

Se analizan las tensiones de corte en la dirección Y, en el plano normal a Z (en la dirección en la cual se aplica el desplazamiento sobre la placa base). Con esto se espera identificar la importancia que tienen las tensiones de corte en la plastificación de la llave.

A continuación se pueden observar las figuras de las tensiones de cortes en las tres llaves modeladas, para el último estado de carga.



**Figura 43 Tensión de corte YZ Llave 1, eje fuerte a) Vista frontal b) Vista trasera**

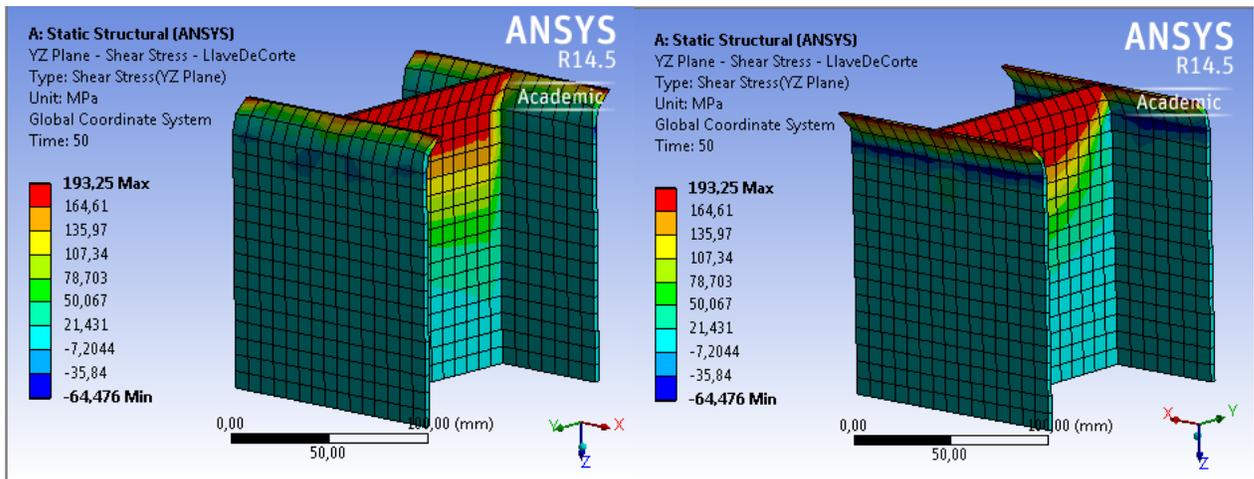


Figura 44 Tensión de corte YZ Llave 7, eje fuerte a) Vista frontal b) Vista trasera

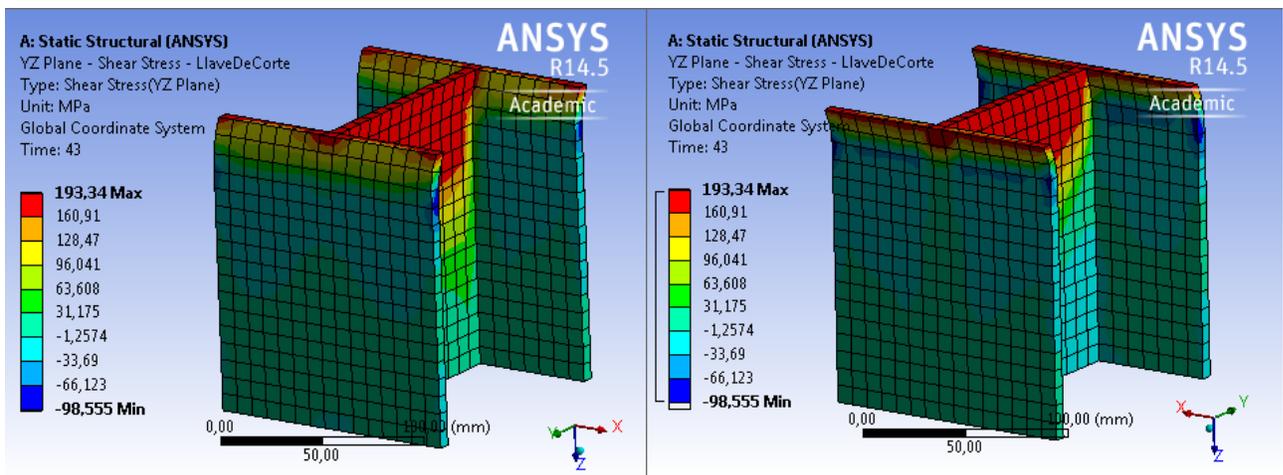


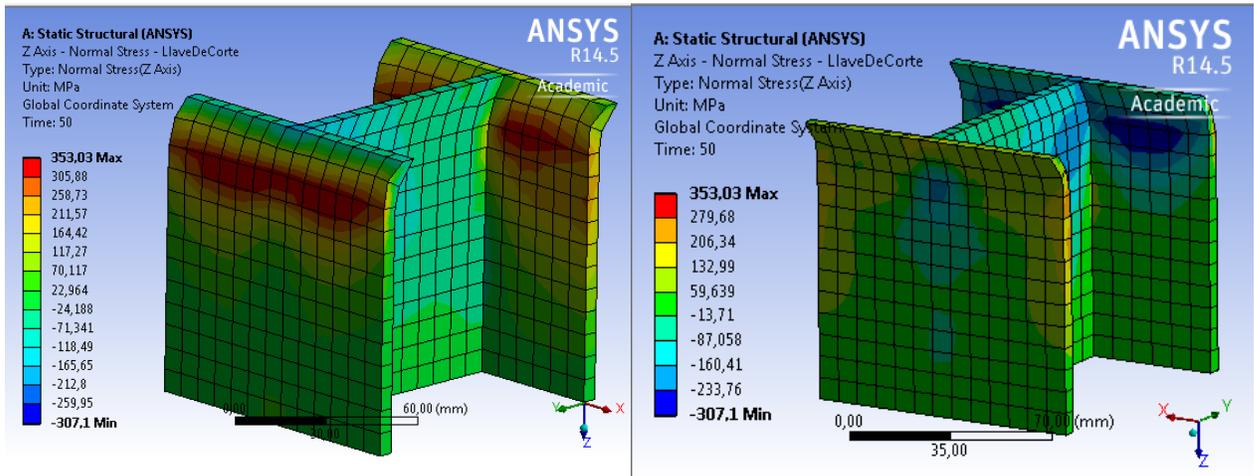
Figura 45 Tensión de corte YZ Llave 8, eje fuerte a) Vista frontal b) Vista trasera

Las tensiones de corte máximas se concentran en la superficie superior de la llave de corte. Esta se encuentra en toda la sección transversal de la llave y se propaga varios centímetros hacia abajo por el alma. La tensión máxima observada coincide con la tensión de fluencia al corte, determinada con la Ecuación 9:

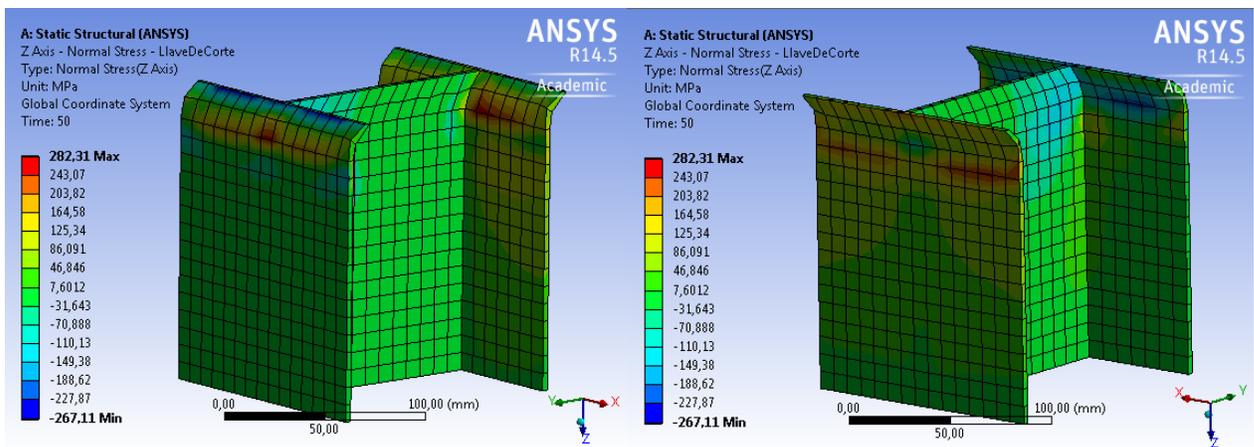
$$\tau_y = 0,577 \cdot f_y = 0,577 \cdot 335 \text{ MPa} = 193,3 \text{ MPa}$$

### 5.2.2. Tensiones normales en Z

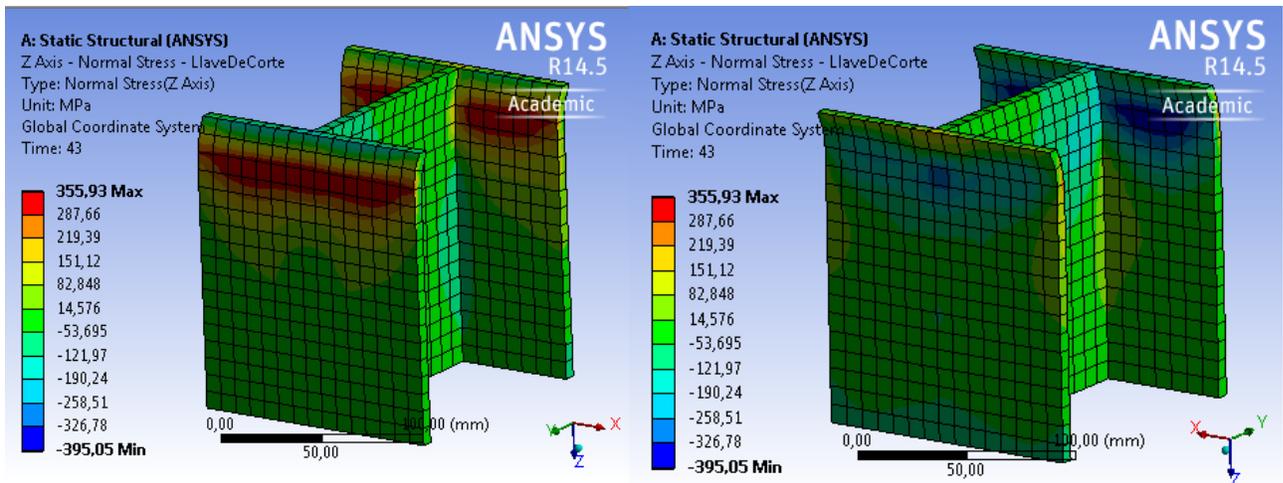
Se analiza la tensión normal en Z en las llaves de corte modeladas. Con esto se busca estudiar la flexión a lo largo de la llave y verificar si ésta se comporta como una viga en voladizo. En la Figura 46, Figura 47 y Figura 48, se puede observar las tensiones normales en Z obtenidas en los modelos ANSYS para el último estado de carga.



**Figura 46 Tensión normal en Z Llave 1, eje débil a) Vista frontal b) Vista trasera**



**Figura 47 Tensión normal en Z Llave 7, eje débil a) Vista frontal b) Vista trasera**



**Figura 48 Tensión normal en Z Llave 8, eje débil a) Vista frontal b) Vista trasera**

Las tracciones máximas están marcadas en rojo, y las compresiones en azul. Las tensiones normales máximas de tracción se concentran en las

caras de las alas que se oponen al desplazamiento, marcada por una franja roja, mientras que las tensiones máximas de compresión se concentran en las caras contrarias. Al observar las tensiones en la superficie en contacto con la placa base, las zonas de tracción y compresión se invierten con respecto a las tensiones que hay en la altura de la llave (Figura 49), específicamente en las conexiones del alma con las alas. Esto sugiere un cambio de curvatura del perfil de tensiones axiales, que se contradice con la hipótesis tomada por las normas de diseño que estipulan que la llave se comporta como una viga en voladizo.

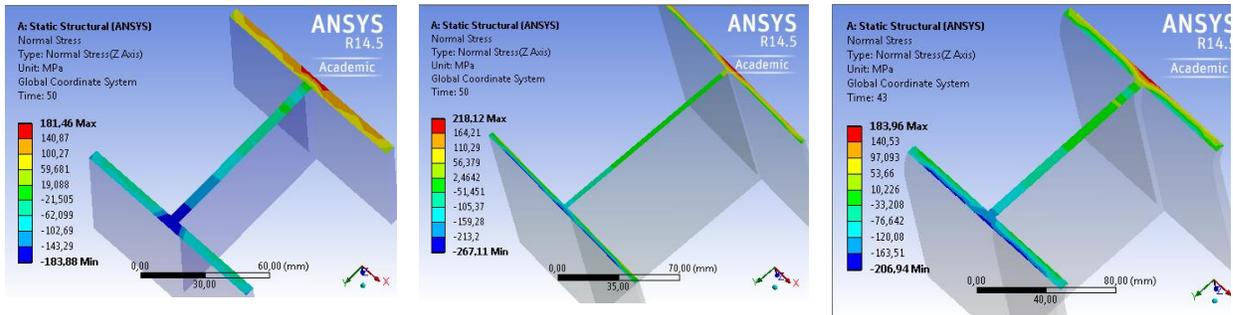


Figura 49 Detalle tensiones normales en la base de las llaves a) Llave 1 b) Llave 7 c) Llave 8

### 5.2.3. Tensión Equivalente Von Mises

Las tensiones equivalentes de Von Mises permiten comparar el estado tridimensional de tensiones de un elemento con la tensión de fluencia a la tracción, conocida de un material. Se analizan las tensiones de Von Mises para el estado final para las llaves 1, 2 y 3 en la Figura 50, Figura 51 y Figura 52, respectivamente.

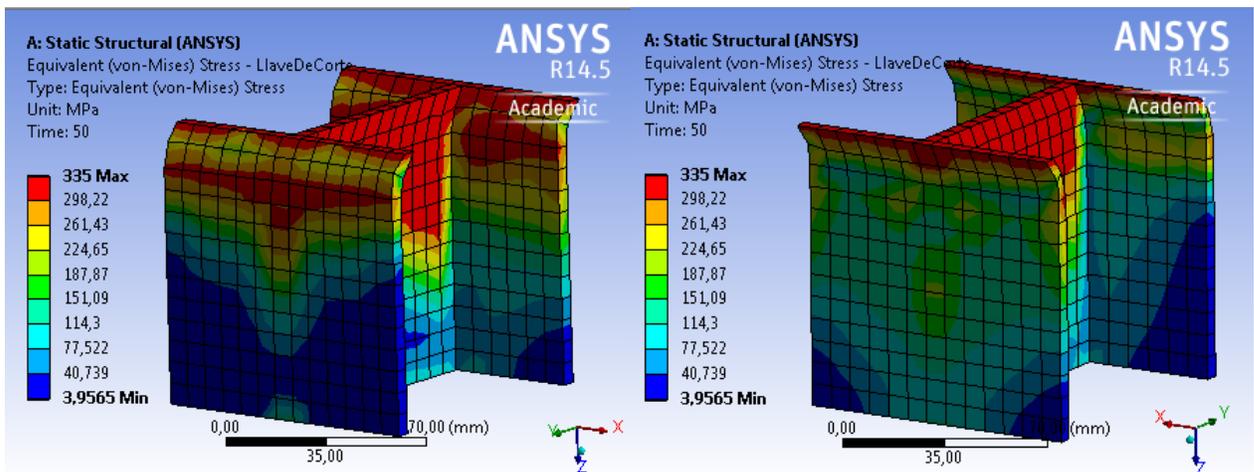
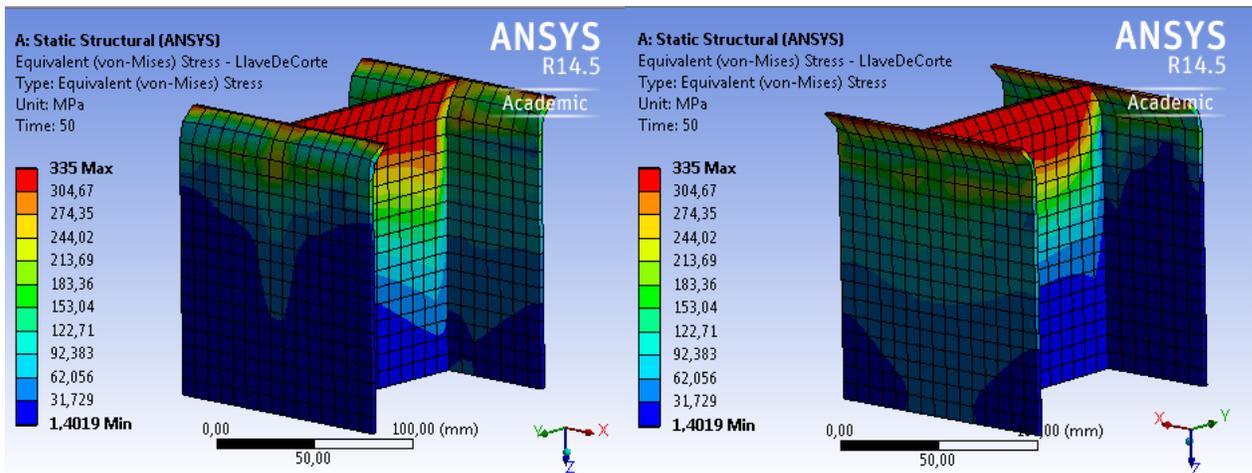
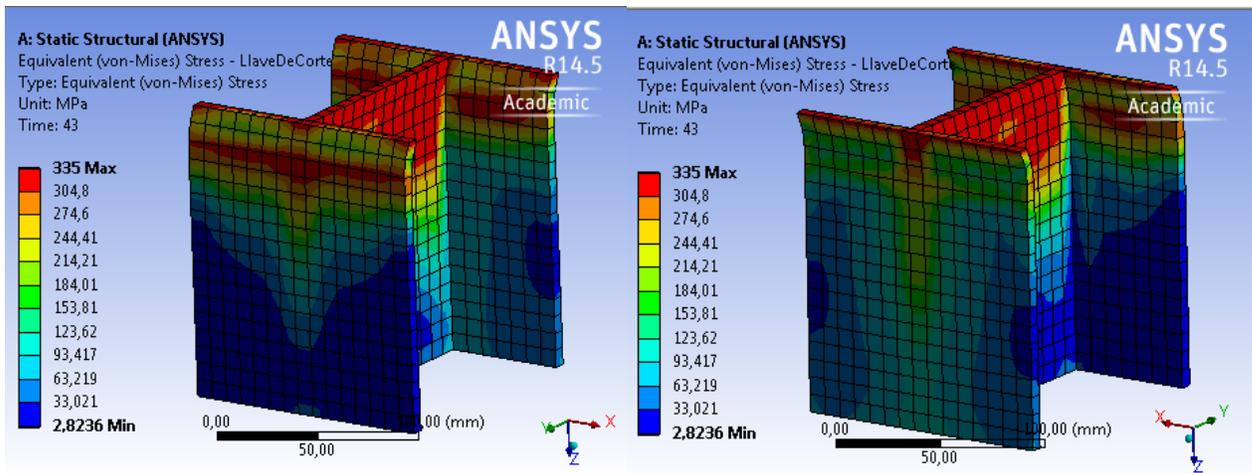


Figura 50 Tensión equivalente de Von Mises Llave 1 a) Vista frontal b) Vista trasera



**Figura 51 Tensión equivalente de Von Mises Llave 7 a) Vista frontal b) Vista trasera**



**Figura 52 Tensión Equivalente de Von Mises Llave 8 a) Vista frontal b) Vista trasera**

Las figuras anteriores revelan que el acero en la llave ha superado la tensión de fluencia (335 MPa) en varias zonas, lo que indicaría plastificación del acero. Éstas se concentran principalmente en la superficie de la llave de corte en contacto con la placa base, y en la zona superior de alma del perfil, además de una parte a lo ancho en una de las alas. Se observa que las zonas plastificadas en el alma se asemejan a las zonas con tensiones de corte máximo, mientras que la plastificación en las alas coincide con la tensión normal máxima encontrada la cara traccionada. Esto sugiere que la plastificación del alma está asociada a los esfuerzos de corte presentes en las llaves, y que la plastificación de las alas se asocia a los esfuerzos normales en Z.

Para reconocer las zonas que recién están llegando al límite elástico, de las que ya han incursionado por bastante en el rango no lineal, se estudian las deformaciones equivalentes totales, elásticas y plásticas para cada llave. Éstas se pueden observar en las siguientes figuras:

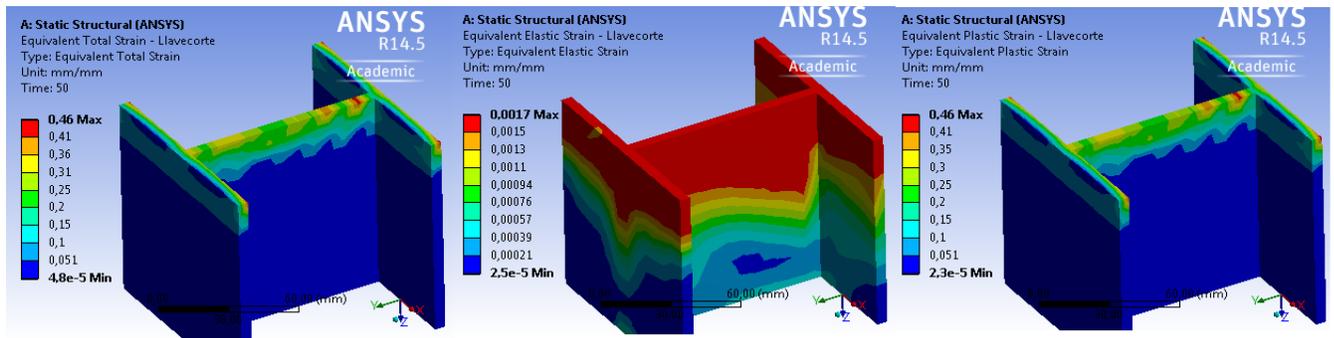


Figura 53 a) Def. equivalentes totales b) Def. elásticas c) Def. plásticas. Llave 1 eje fuerte

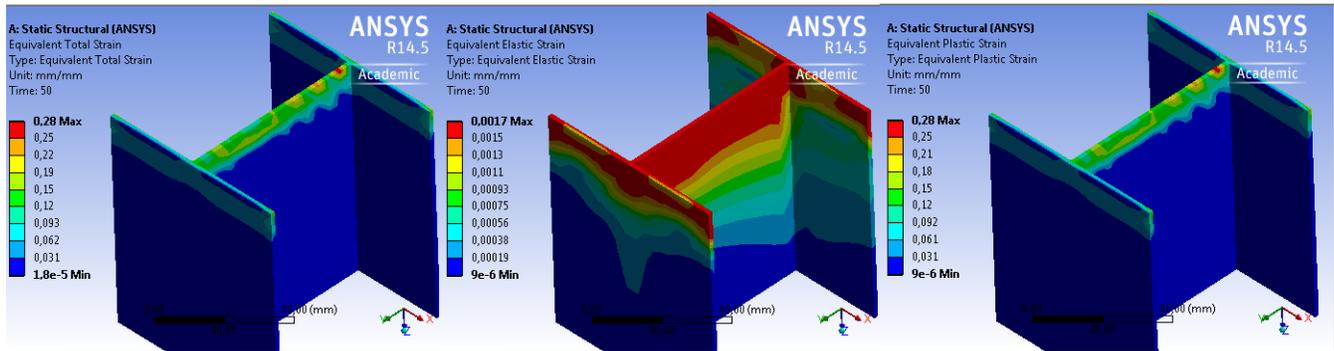


Figura 54 a) Def. equivalentes totales b) Def. elásticas c) Def. plásticas. Llave 7 eje fuerte

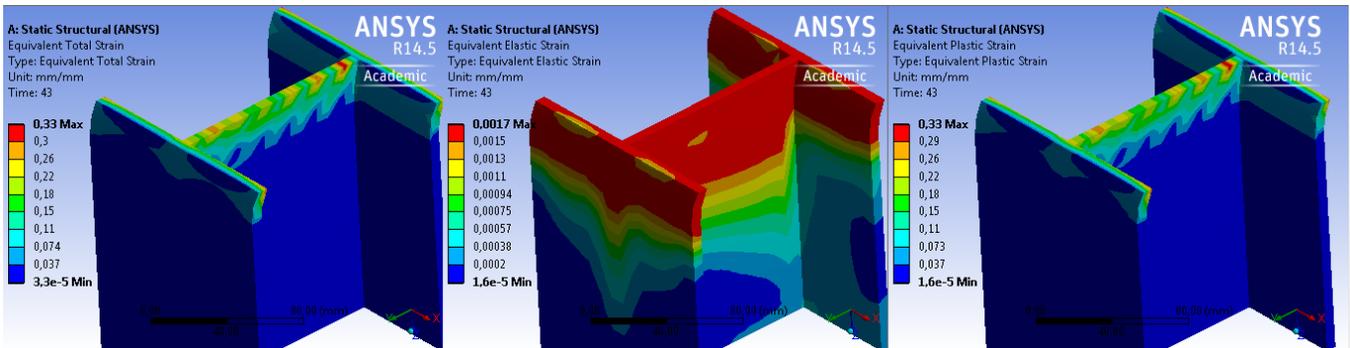


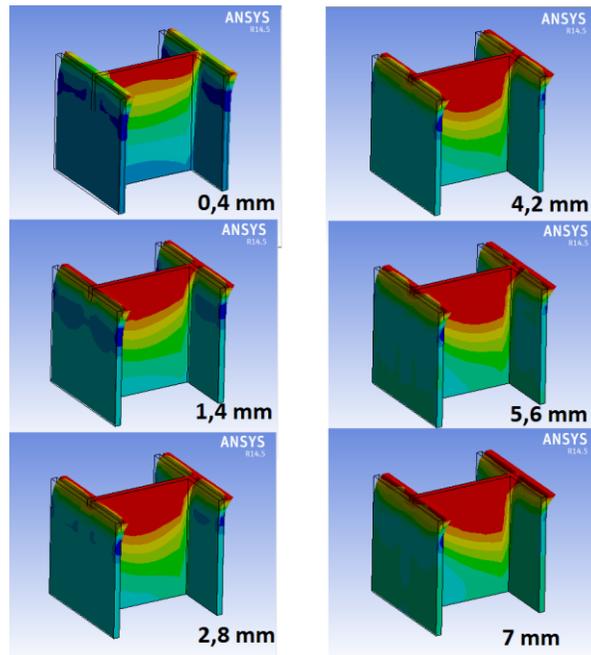
Figura 55 a) Def. equivalentes totales b) Def. elásticas c) Def. plásticas. Llave 8 eje fuerte

Como ya se había visto anteriormente, las deformaciones se concentran en la zona superior de la llave (Cara conectada con la placa base). Las deformaciones elásticas son muy bajas, lo que nos indica que la mayor deformación ocurre en el rango no lineal. Las deformaciones plásticas solo ocurren en las zonas que no están embebidas en el bloque de hormigón.

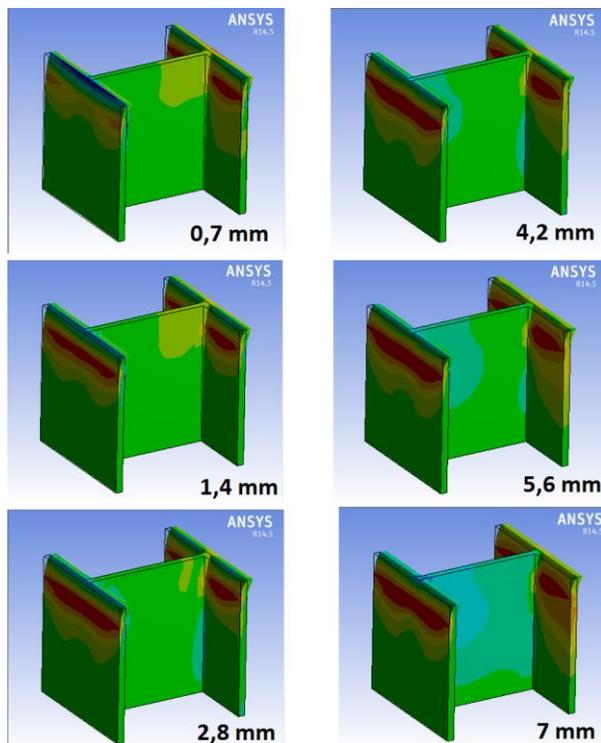
#### 5.2.4. Evolución de las tensiones

Se analiza la evolución en la llave de las tensiones de corte, tensiones normales y tensiones de Von Mises en función del desplazamiento aplicado. Con esto se espera estudiar la relación entre la plastificación del acero y los esfuerzos en este y la influencia de las tensiones de corte y tracción en el comportamiento del sistema.

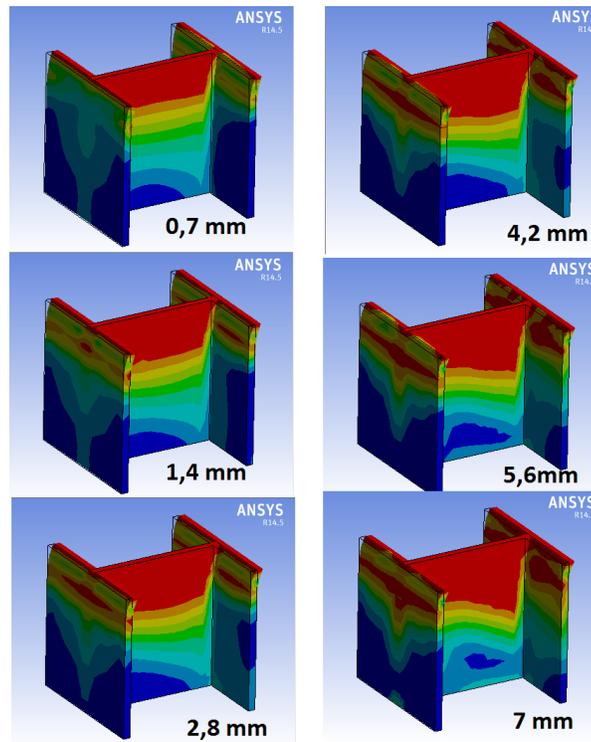
Las figuras expuestas a continuación corresponden a los esfuerzos de corte, esfuerzos normales, y esfuerzos de Von Mises, respectivamente, para la llave 1.



**Figura 56 Evolución de tensiones de corte en la llave 1, eje fuerte**



**Figura 57 Evolución de tensiones normales en la llave 1, eje fuerte**



**Figura 58 Evolución de tensiones de de Von Mises en la llave 1, eje fuerte**

Las zonas marcadas en rojo son las tensiones máximas alcanzadas en la llave, que corresponden a 193 MPa en tensiones de corte, 353 en tensiones normales y 335 MPa en tensiones de Von Mises. La Figura 56 revela que la tensión máxima de tracción ocurre en una zona de las alas con muy poco desplazamiento (Con menos de 1,4 mm), y esta presenta un leve aumento a medida que la llave se sigue deformando. Sin embargo, las tensiones de corte llegan a su máximo en la cara superior y en el alma, y esta se propaga por la altura del alma, conforme la llave se sigue deformando. Las tensiones de Von Mises confirman que se ha alcanzado la plastificación del acero en las zonas donde se tienen las tensiones de corte y normales máximas. Sin embargo, las tensiones de corte alcanzan la plastificación en un área mucho mayor de la llave.

### **5.3. Tensiones en la llave de corte para llaves cargadas en su eje débil**

Se repiten los análisis de tensiones y deformaciones, expuestos anteriormente, en los modelos con los desplazamientos aplicados en el eje débil de las secciones doble T.

#### **5.3.1. Tensiones de corte**

En esta sección se analizan las tensiones de corte que se producen en la llave, con dirección X en un plano normal a Z (Corte XZ). Con esto se espera evaluar la influencia del corte en la plastificación de la sección. En

las siguientes figuras se observan las tensiones de corte XZ para las llaves con carga aplicada en el eje débil:

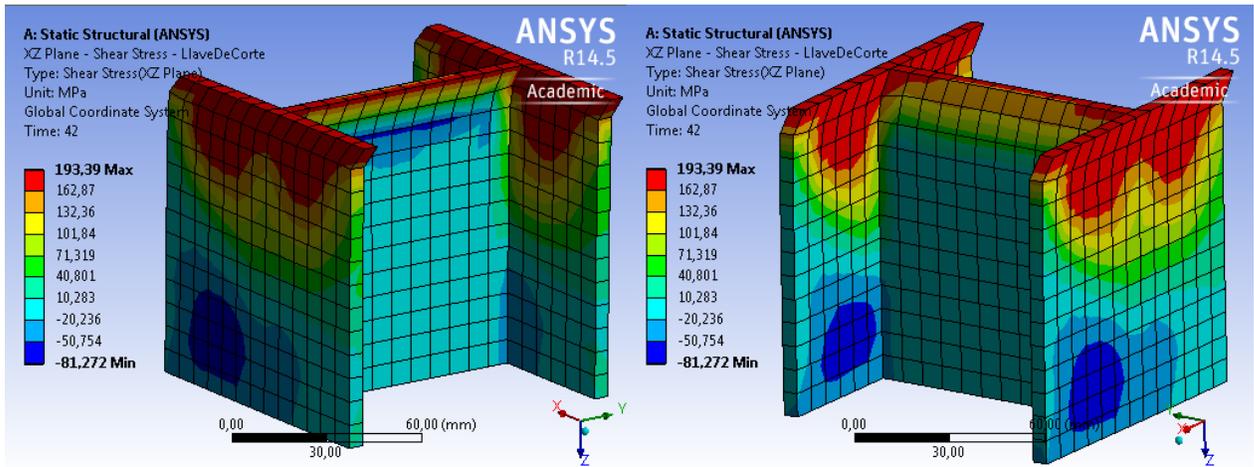


Figura 59 Tensión de corte XZ Llave 1, eje débil a) Vista frontal b) Vista trasera

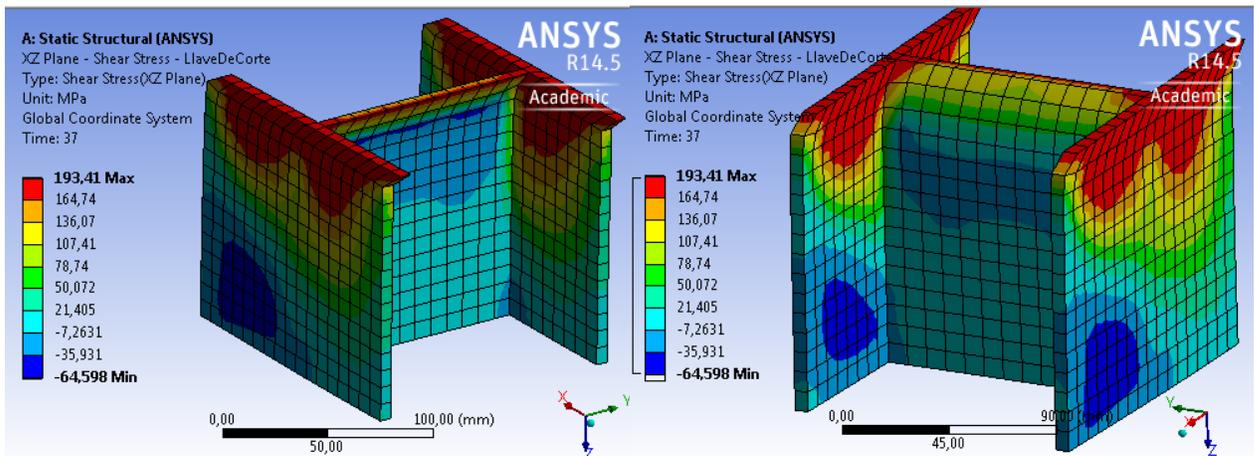


Figura 60 Tensión de corte XZ Llave 7, eje débil a) Vista frontal b) Vista trasera

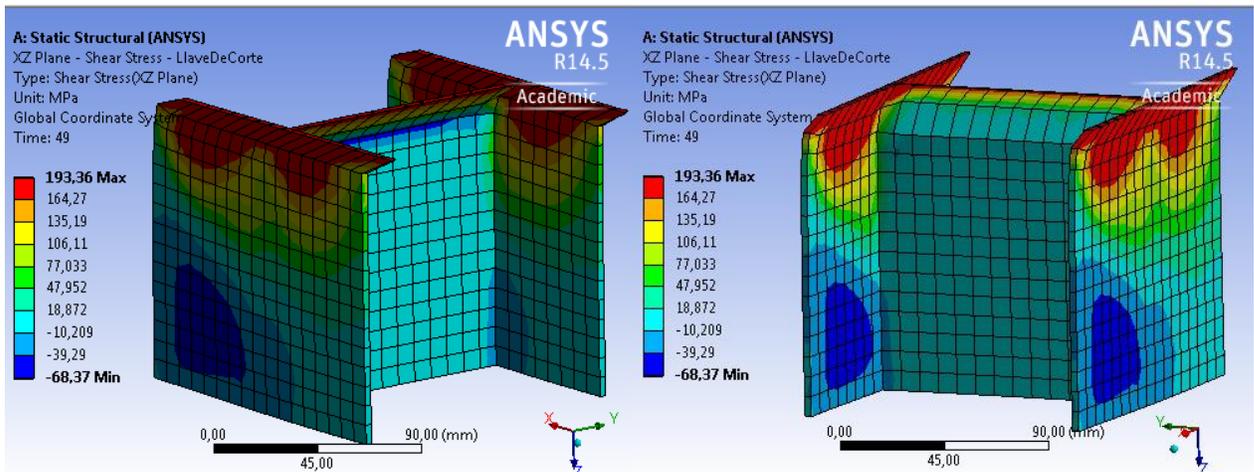


Figura 61 Tensión de corte XZ Llave 8, eje débil a) Vista frontal b) Vista trasera

Las tensiones de corte máximas se concentran en la base superior de la llave de corte. Esta se encuentra en toda la sección transversal de la llave y se propaga algunos centímetros hacia abajo por las alas. La tensión máxima observada es la misma que en el caso de los modelos con desplazamiento aplicado en el eje fuerte de la sección ( $\sim 193 \text{ MPa}$ ), y coincide con la tensión de fluencia al corte.

### 5.3.2. Tensiones normales en Z

Se repite el análisis de tensiones normales en Z con el objetivo de estudiar la flexión a lo largo de la llave. Las siguientes figuras (Figura 62, Figura 63 y Figura 64) muestran las tensiones normales en Z en las tres llaves estudiadas:

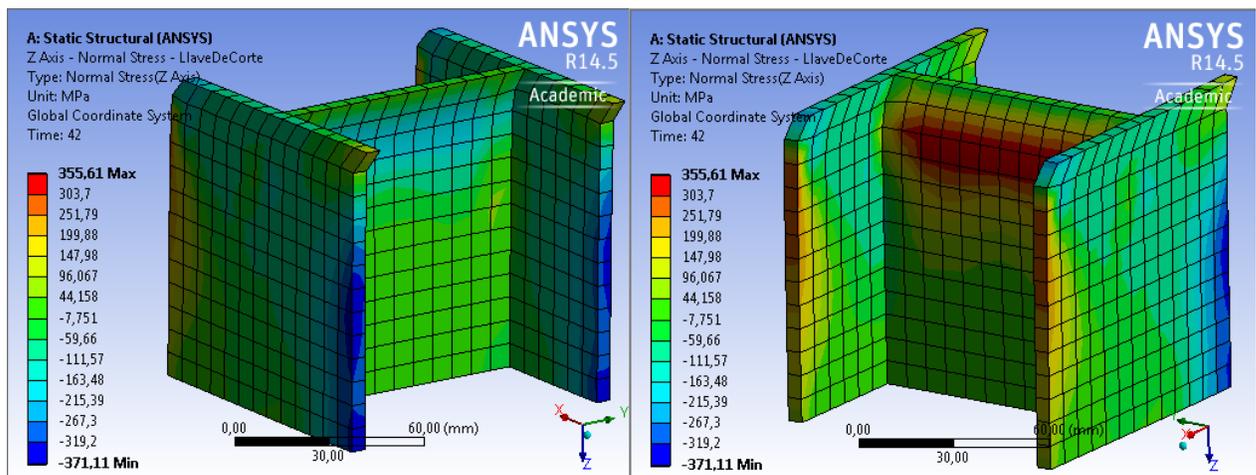


Figura 62 Tensión normal en Z Llave 1, eje débil a) Vista frontal b) Vista trasera

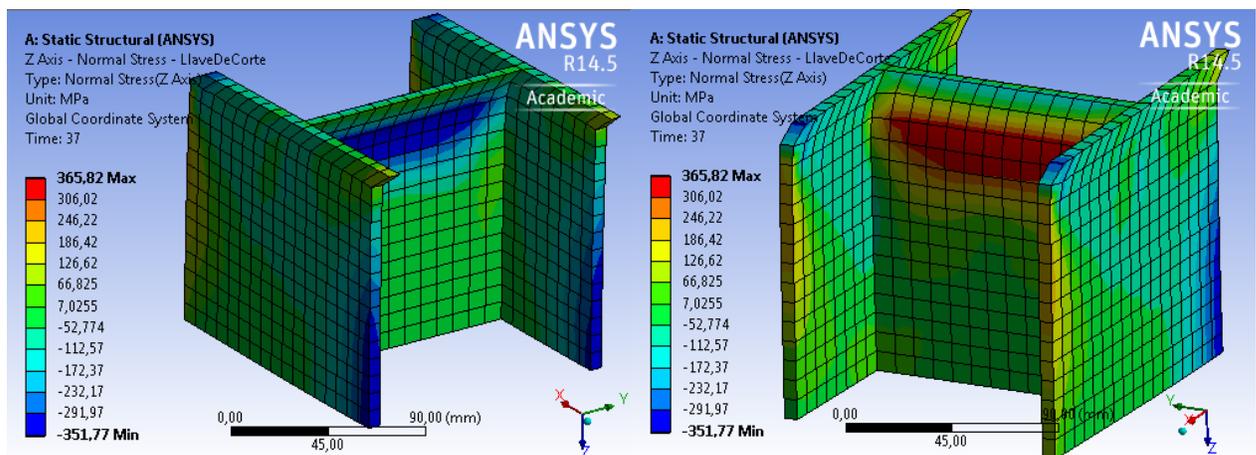
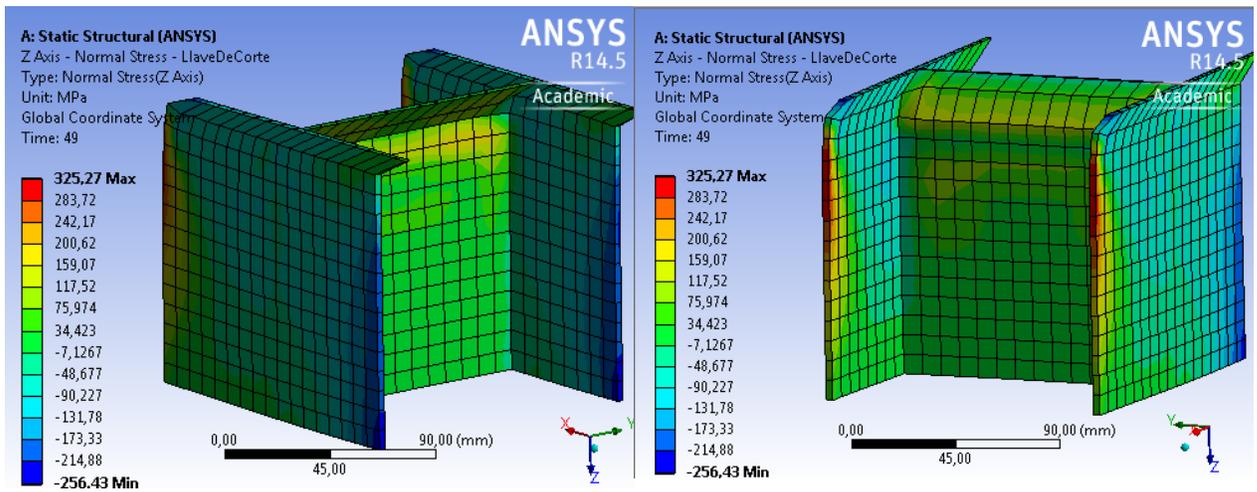


Figura 63 Tensión normal en Z Llave 7, eje débil a) Vista frontal b) Vista trasera

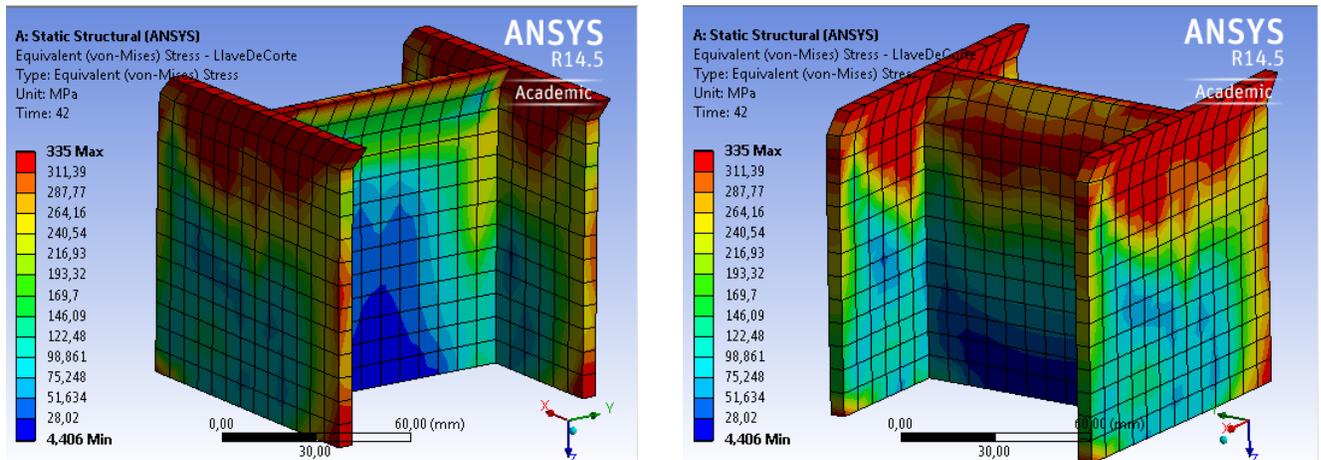


**Figura 64 Tensión normal en Z Llave 8, eje débil a) Vista frontal b) Vista trasera**

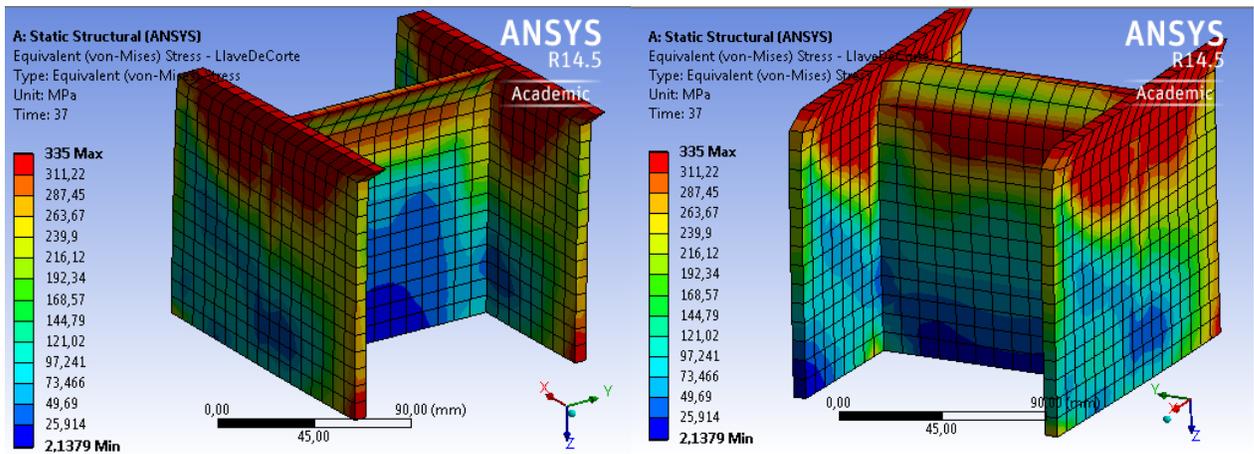
Los esfuerzos de compresión máxima se alcanzan en las bases de las alas que se oponen al desplazamiento, mientras que las tracciones máximas se encuentran a lo ancho del alma a una altura donde comienzan las grandes deformaciones. En el resto de la llave hay bajas tensiones normales. Se observan altos esfuerzos de tracciones en sectores de las almas en las llaves 1 y 7, pero no en la 8.

### 5.3.3. Tensiones equivalentes de Von Mises

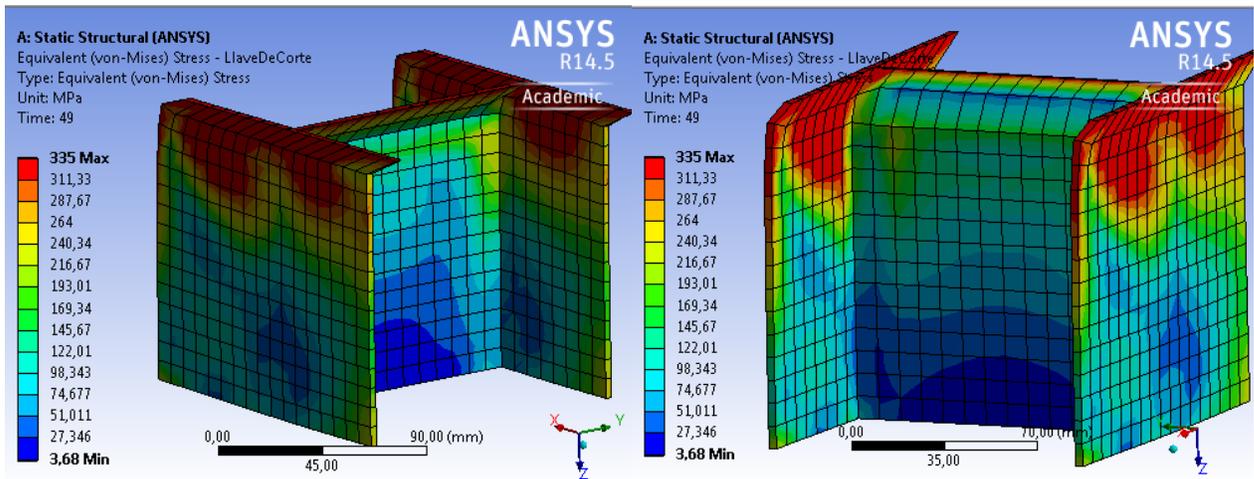
Del mismo modo como se hizo con las llaves cargadas en su eje fuerte, en esta sección se analizan las tensiones de Von Mises para las llaves cargadas en su eje débil. Estas se pueden observar en las siguientes figuras:



**Figura 65 Tensión equivalente de Von Mises Llave 1, eje débil a) Vista frontal b) Vista trasera**



**Figura 66** Tensión equivalente de Von Mises Llave 7, eje débil a) Vista frontal b) Vista trasera



**Figura 67** Tensión equivalente de Von Mises Llave 8, eje débil a) Vista frontal b) Vista trasera

En las figuras anteriores se aprecia que la tensión de fluencia del acero ( $F_y=335$  MPa) se supera en varias zonas de la llave. Las tensiones equivalentes máximas se concentran en toda la superficie de la base en contacto con la placa base, y en gran parte de las zonas superiores de las llaves. Estas zonas coinciden con los mayores esfuerzos de corte en XZ, lo que sugiere que la plastificación de las alas está asociada a los esfuerzos de corte presentes. También hay plastificación en sectores del alma en las llaves 1 y 7, pero no en la llave 8, coincidiendo con las observaciones de las tensiones normales en Z.

Además se analizan las deformaciones plásticas y elásticas en las llaves cargadas en el eje débil (Figura 68, Figura 69 y Figura 70).

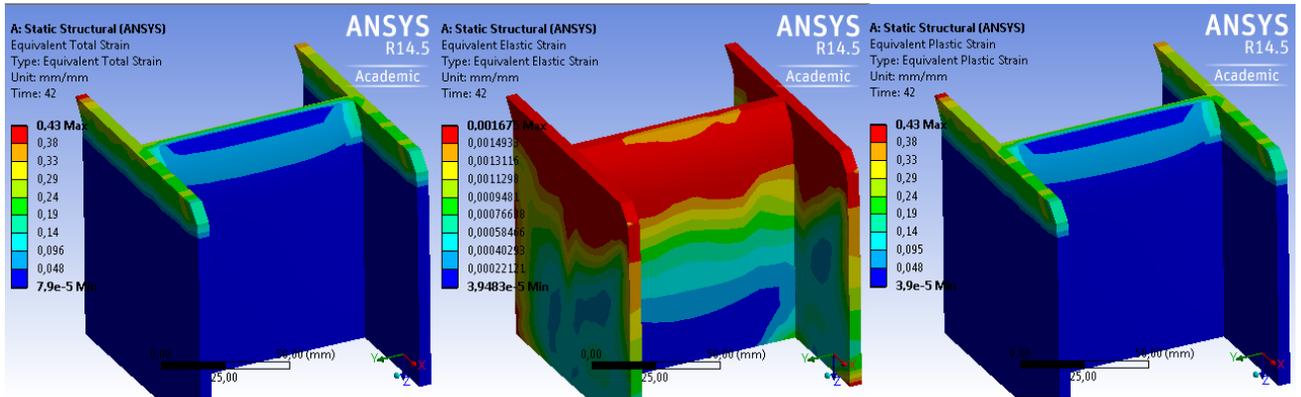


Figura 68 a) Def. equivalentes totales b) Def. elásticas c) Def. plásticas. Llave 1 eje débil

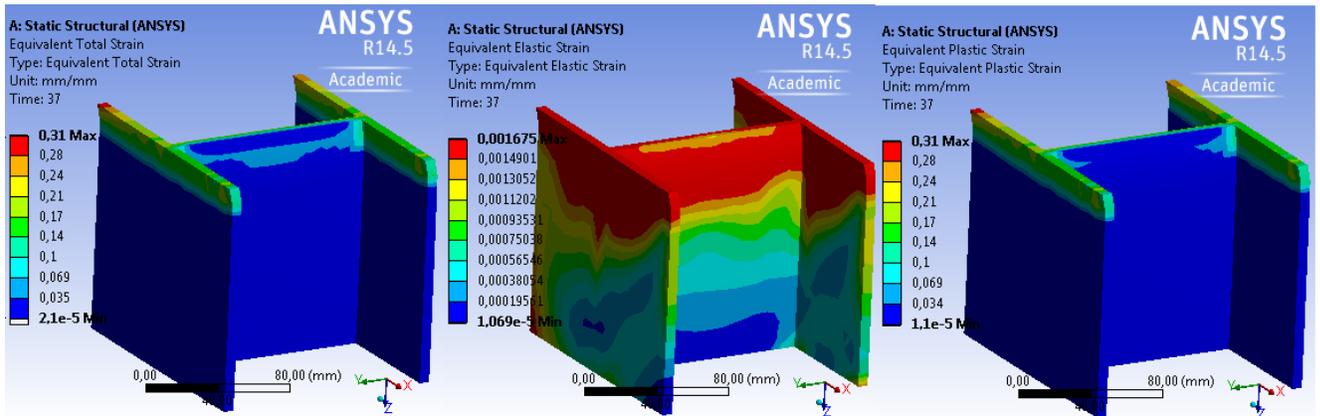


Figura 69 a) Def. equivalentes totales b) Def. elásticas c) Def. plásticas. Llave 7 eje débil

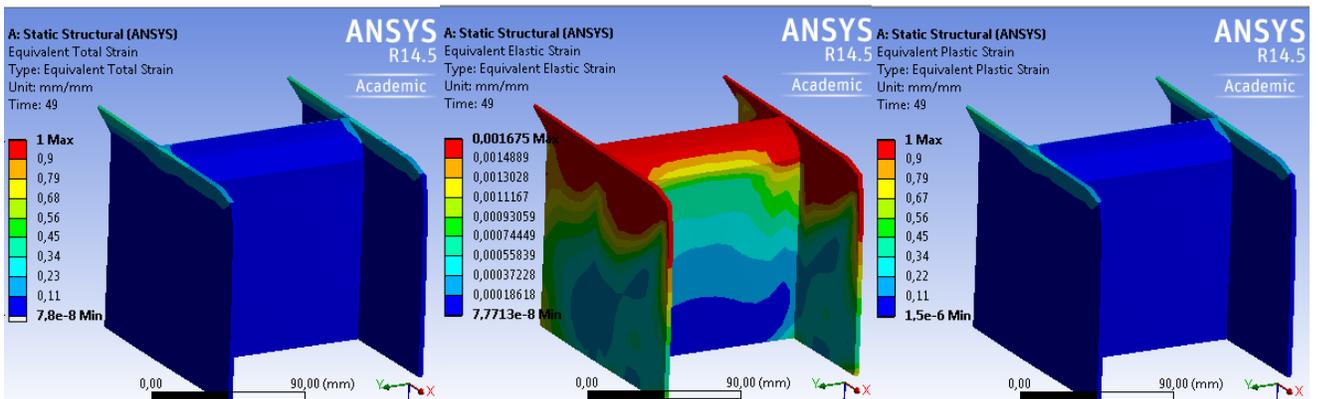


Figura 70 a) Def. equivalentes totales b) Def. elásticas c) Def. plásticas. Llave 8 eje débil

Las figuras anteriores revelan que al igual que en las llaves cargadas en su eje fuerte, las deformaciones se concentran en la cara conectada con la placa base y en zonas cercanas a esta. Del mismo modo como se hace anteriormente, se puede concluir que la mayor deformación en las llaves ocurre en el rango no lineal.

### 5.3.4. Evolución de las tensiones

Se repite el análisis realizado en la llave 1 cargada en el eje fuerte, esta vez con la llave 1 cargada en el eje débil. Las siguientes figuras corresponden a las tensiones de corte, tensiones normales y tensiones de von Mises, en función del tiempo.

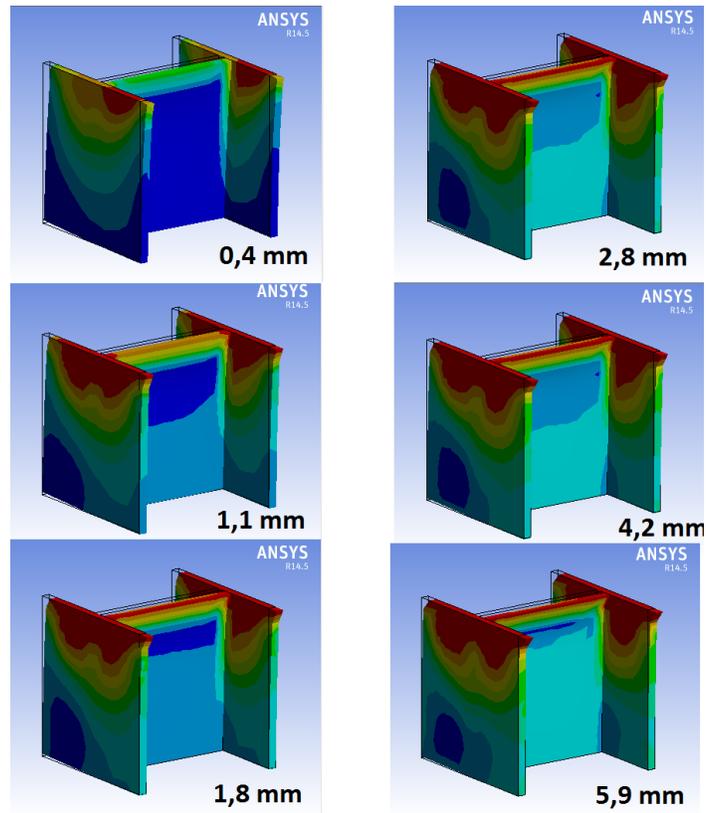
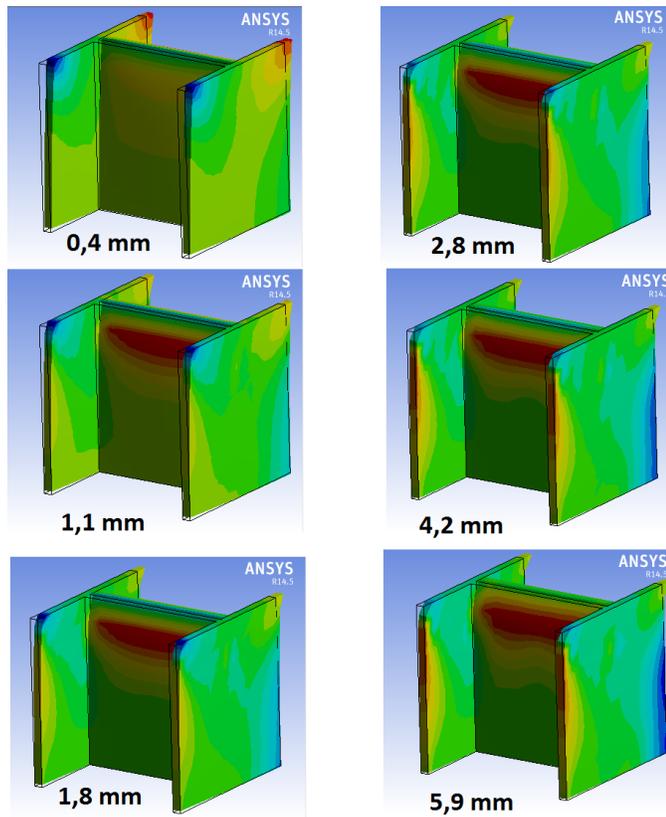
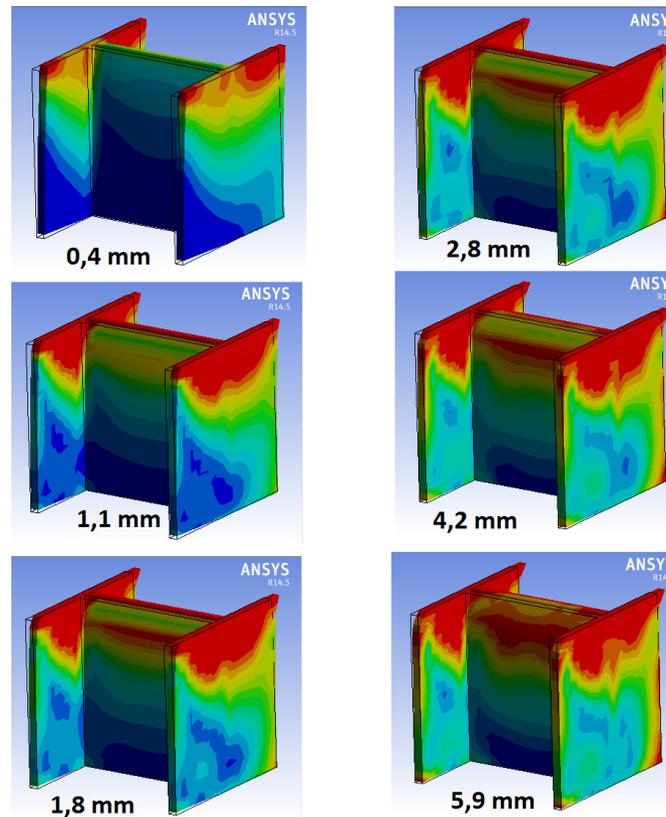


Figura 71 Evolución tensiones de corte llave 1, eje débil



**Figura 72 Evolución tensiones normales llave 1, eje débil**



**Figura 73 Evolución tensiones de Von Mises llave 1, eje débil**

Las áreas rojas de la llave, indican la máxima tensión alcanzada (193 MPa en tensiones de corte, 355 MPa en tensiones normales y 335 MPa en tensiones de Von Mises). Las tensiones máximas de corte se alcanzan en las alas, cerca de la conexión con la placa base, y luego se va propagando por la altura de éstas. Por otro lado, las tracciones máximas se alcanzan con muy poco desplazamiento (1mm aprox.) en una parte pequeña del alma, y esta no prácticamente no evoluciona al aumentar el desplazamiento de la placa. Las tensiones equivalentes de Von Mises revelan que la mayor plastificación de la llave, se encuentra en las alas, lo que indica que una directa relación con las tensiones de corte en ésta.

#### **5.4. Análisis del bloque de hormigón y grout**

A pesar de que el modo de falla asociado al hormigón de la fundación no es un objetivo de este trabajo, se estudia el comportamiento general del bloque y del grout con el fin de tener una visión más completa del sistema. Se analizan los esfuerzos a los cuales son sometidos el bloque y el grout, y se comprueba que se mantiene la integridad de éstos en los modelos, verificando que la falla del acero de la llave ocurre antes que la falla del hormigón.

Inicialmente se analizan las tensiones principales y normales, comparándolas con las capacidades de los materiales. A pesar de que éste último corresponde a un valor unidimensional, se considera que la comparación es suficiente para obtener una aproximación del estado mecánico del bloque y el grout. Finalmente se complementa el análisis estudiando las tensiones equivalentes de Von Mises.

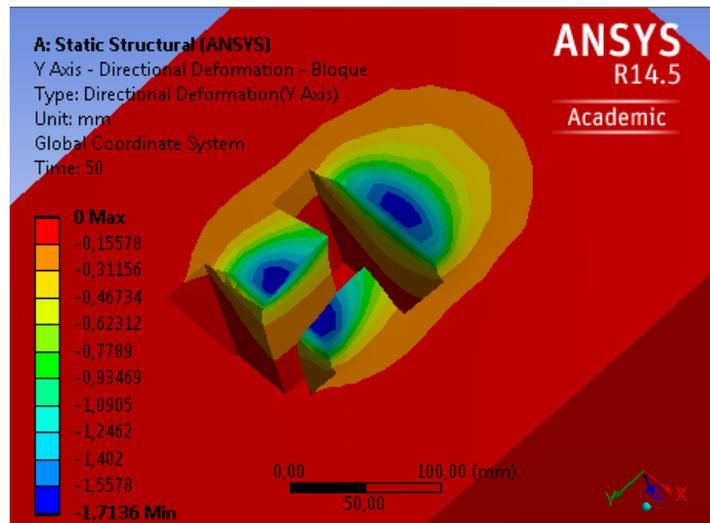
Es importante recordar las simplificaciones que considera la modelación del hormigón y del grout; No se han incluido las barras de acero de refuerzo en el bloque. Estas aportan resistencia a la tracción al hormigón, y proveen confinamiento en las zonas de aplastamiento. Por otro lado, no se ha considerado la pérdida de resistencia del hormigón y el grout una vez aplastados.

##### **5.4.1. Deformada bloque de hormigón**

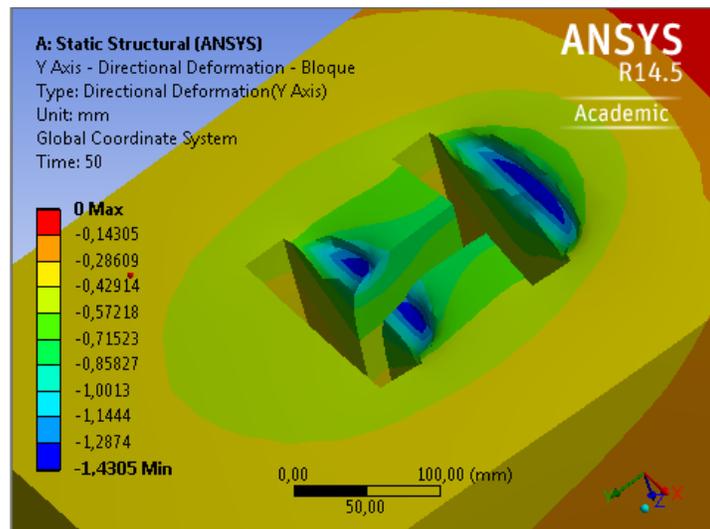
###### ***Modelos con la carga aplicada en el eje fuerte***

Los mayores desplazamientos en el bloque de hormigón, están en la dirección en la cual se impone el desplazamiento en la placa base (Eje Y). Estas pueden observarse en la Figura 74, Figura 75 y Figura 76. Estos se concentran en la cara superior del bloque, en las zonas donde el hormigón se opone al desplazamiento de la llave. Estas deformaciones son bastante altas, lo que indica aplastamiento del hormigón en estas zonas. Fuera de las

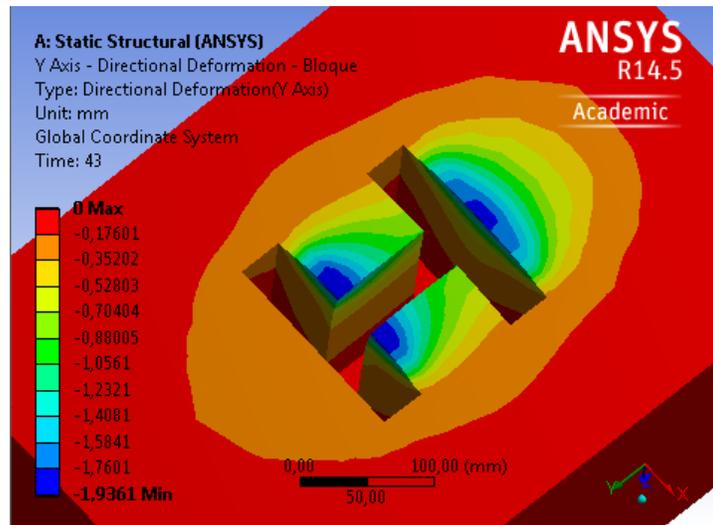
cercanías de la casilla donde se ubica el grout, no se observan deformaciones importantes en el resto del bloque.



**Figura 74 Deformada bloque de hormigón Llave 1, eje fuerte**



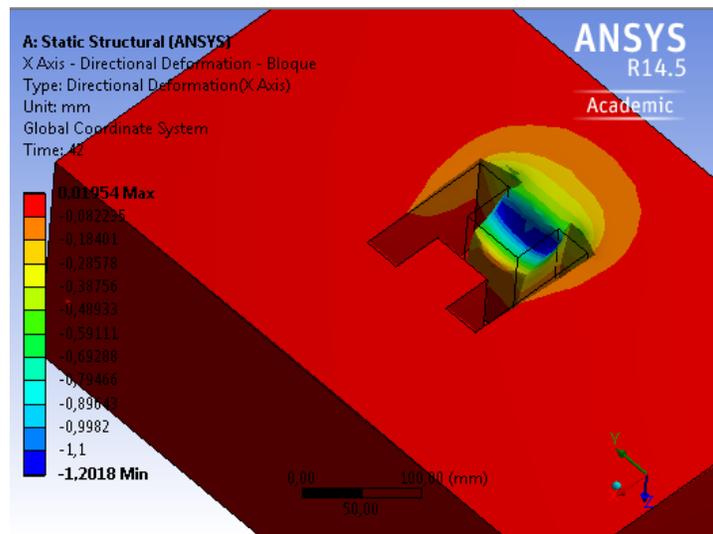
**Figura 75 Deformada bloque de hormigón Llave 7, eje fuerte**



**Figura 76** Deformada bloque de hormigón Llave 8 eje fuerte

***Modelos con la carga aplicada en el eje débil***

Al igual que en los modelos con carga aplicada en el eje fuerte, en este caso las deformaciones se concentran en la casilla, en la cara superior del bloque. Específicamente en el hormigón ubicado entre las alas que se oponen al movimiento de la placa. Las deformaciones son suficientes para producir aplastamiento en estas zonas. Estas se pueden observar en las siguientes figuras:



**Figura 77** Deformada bloque de hormigón Llave 1, eje débil

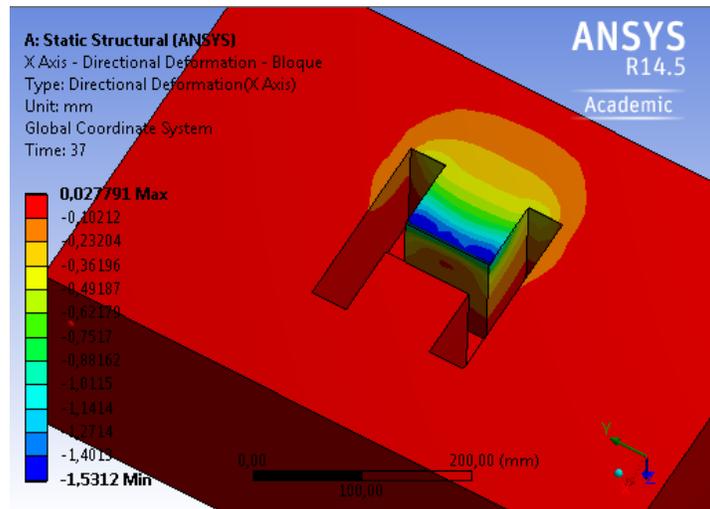


Figura 78 Deformada bloque de hormigón Llave 7, eje débil

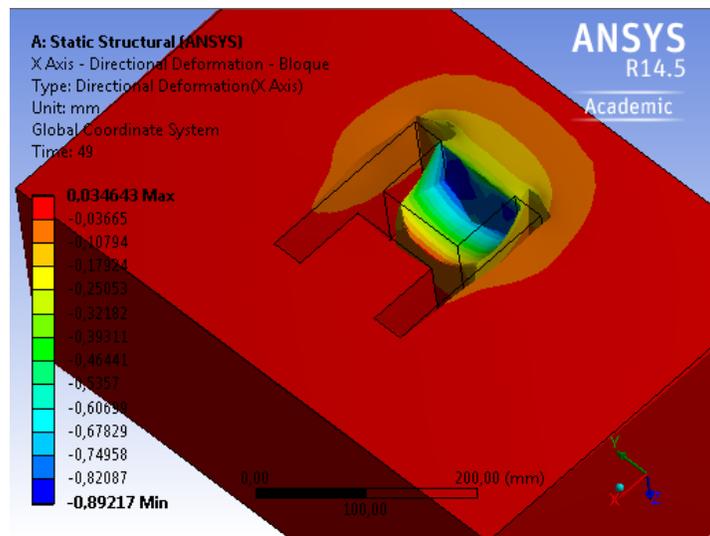


Figura 79 Deformada bloque de hormigón Llave 8, eje débil

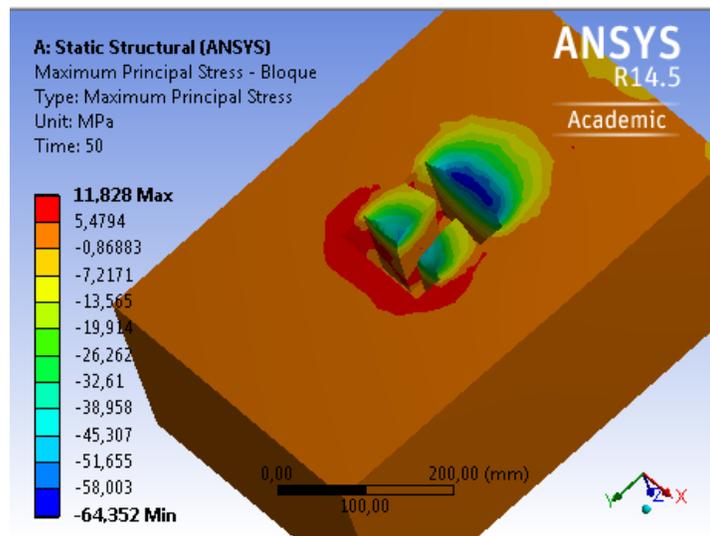
#### 5.4.2. Tensiones principales en el bloque de hormigón

Se analizan las tensiones principales máximas y mínimas en el bloque de hormigón, con el fin de determinar si se sobrepasan las resistencias a tracción y compresión. A pesar de que los parámetros de resistencia del hormigón son parámetros unidimensionales, estos son utilizados para contrastarlos con las tensiones presentes en los modelos, ya que se considera que es una aproximación adecuada.

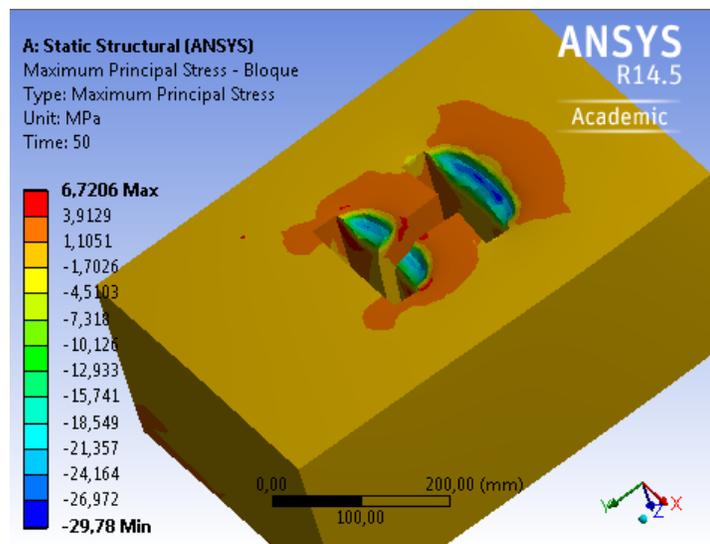
##### *Modelos con la carga aplicada en el eje fuerte*

##### *Tensiones principales máximas*

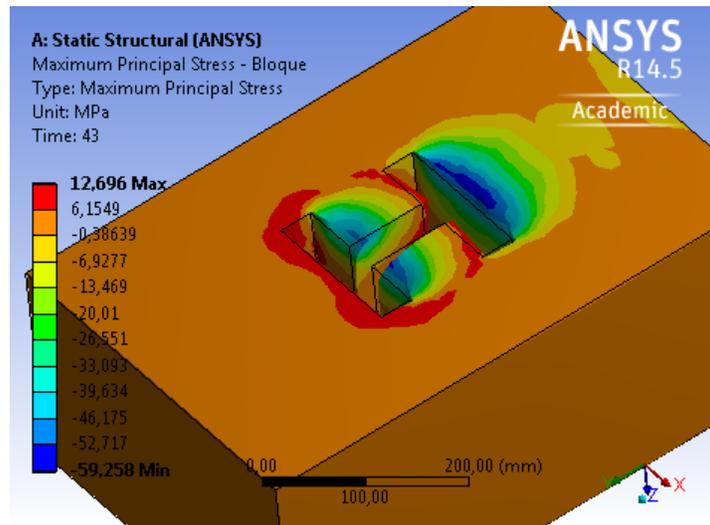
Las tensiones principales máximas se concentran en la zona de la casilla, en la cara superior del bloque de hormigón. Se puede notar en las figuras siguientes, que la mayoría de las tensiones corresponden a tracciones, excepto en la zona de la cara del ala que comprime al hormigón:



**Figura 80 Tensiones principales máximas en bloque, Llave 1, eje fuerte**

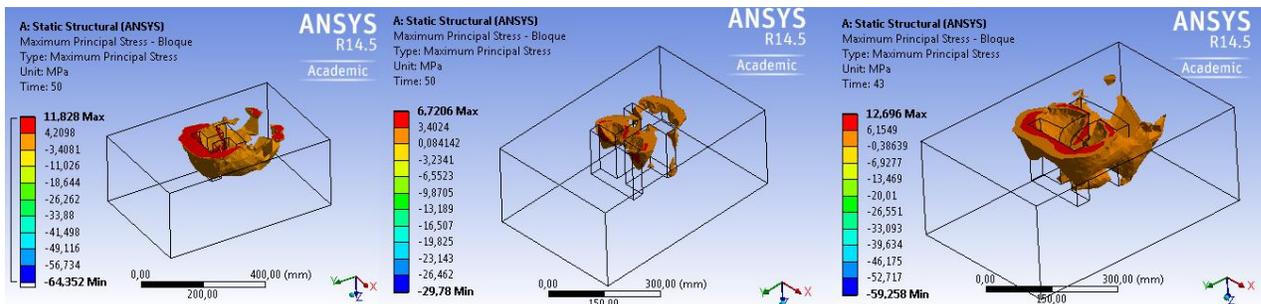


**Figura 81 Tensiones principales máximas en bloque, Llave 7, eje fuerte**



**Figura 82 Tensiones principales máximas en bloque, Llave 8, eje fuerte**

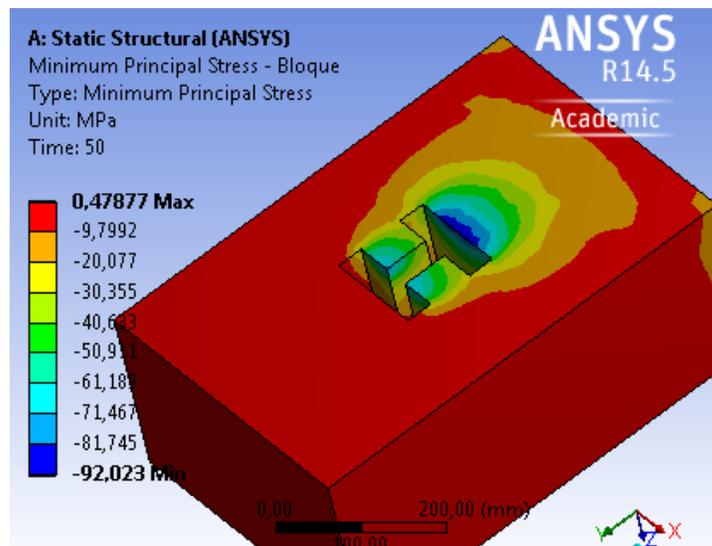
En la Figura 83 se exhiben las zonas del bloque donde se supera la resistencia a la rotura a tracción del hormigón, por lo que es esperable que en estas zonas exista fisuración. Se puede notar que corresponden a zonas concentradas en la casilla, por lo que no comprometen la estabilidad general del bloque.



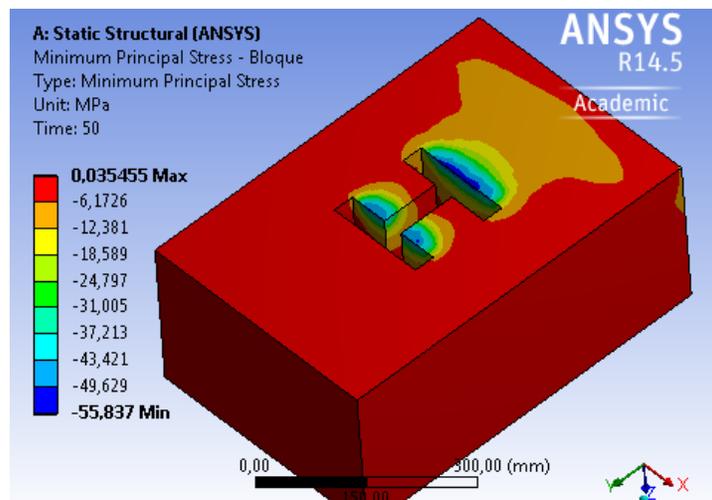
**Figura 83 Tensión principal máxima mayores a  $f_r=3$  MPa**

### *Tensiones principales mínimas*

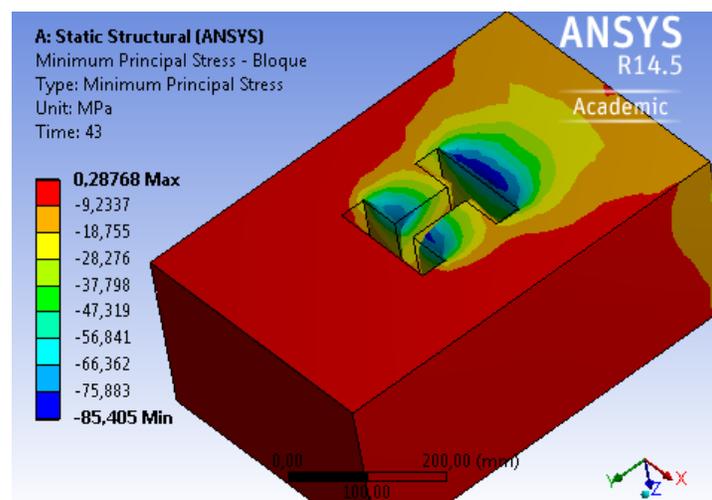
Las tensiones principales mínimas se concentran en la zona de la casilla del bloque. En las siguientes figuras, se aprecia que en algunas zonas, las tensiones principales mínimas superan la resistencia a la compresión del hormigón, por bastante:



**Figura 84 Tensiones principales mínimas en el bloque, llave 1, eje fuerte**

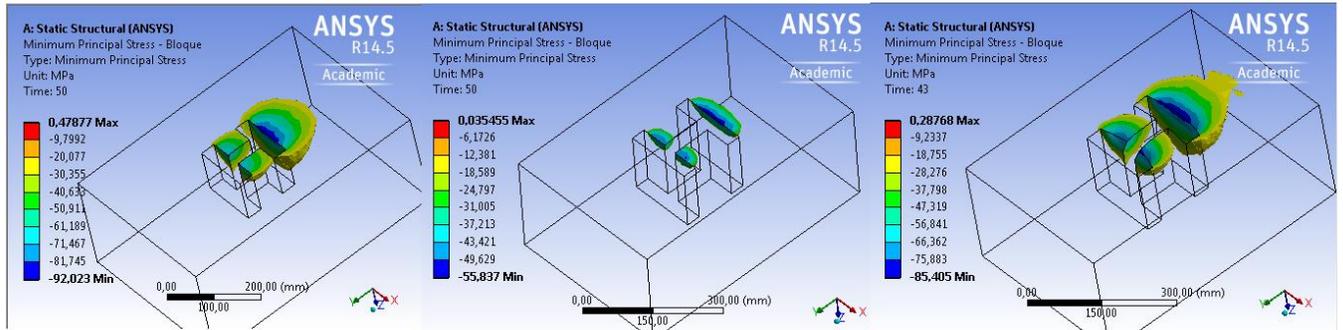


**Figura 85 Tensiones principales mínimas en el bloque, llave 7, eje fuerte**



**Figura 86 Tensiones principales mínimas en el bloque, llave 8, eje fuerte**

En la Figura 87 se exhiben las zonas del hormigón donde se supera la resistencia a la compresión, por lo que se espera aplastamiento. Según lo observado en las figuras, se puede apreciar que las zonas donde hay aplastamiento del hormigón son pequeñas en relación al tamaño del bloque, por lo que se supone que la estabilidad del bloque no se ve comprometida.

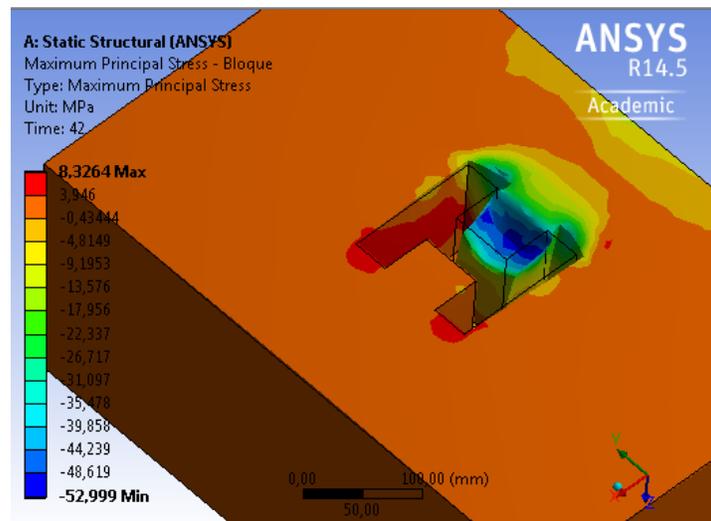


**Figura 87 Tensión principal mínima menor a  $f_c' = 24$  MPa**

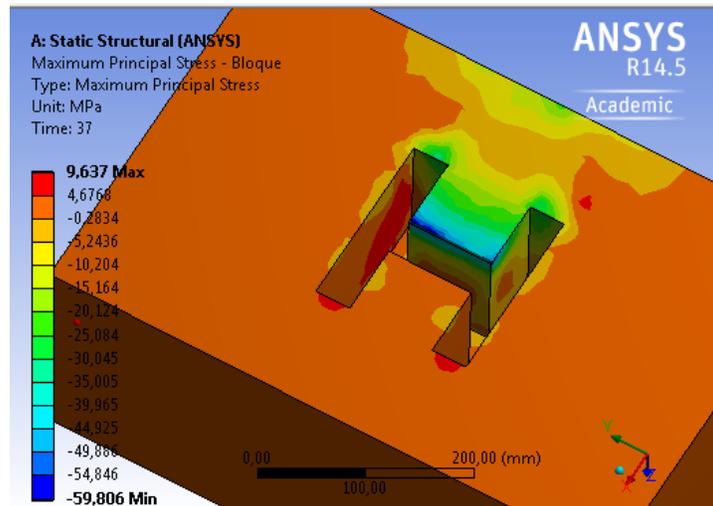
### ***Modelos con la carga aplicada en el eje débil***

Tensiones principales máximas

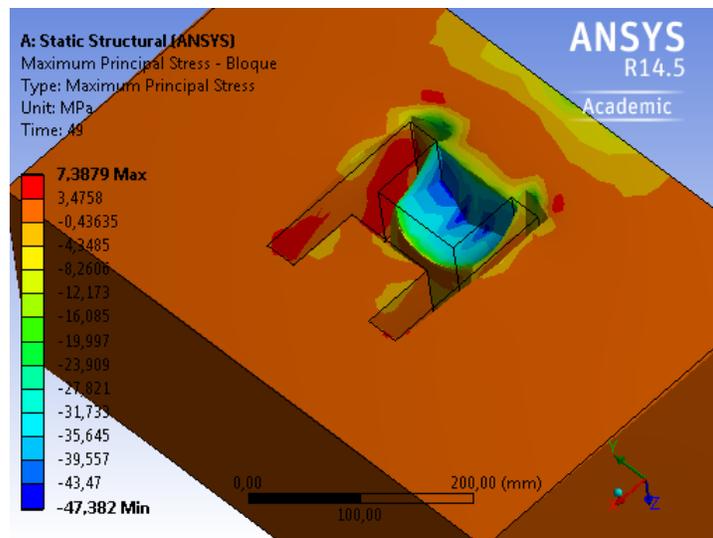
Al igual que en el caso de los modelos con las deformaciones aplicadas en el eje fuerte, en los modelos cargados en el eje débil las tensiones principales máximas se concentran en la casilla. En la mayoría del bloque, las tensiones principales máximas corresponden a tracciones, a excepción de la zona entre las alas que se oponen el desplazamiento. Las siguientes figuras muestran las tensiones principales máximas en el bloque:



**Figura 88 Tensión principal máxima, Llave 1, eje débil**

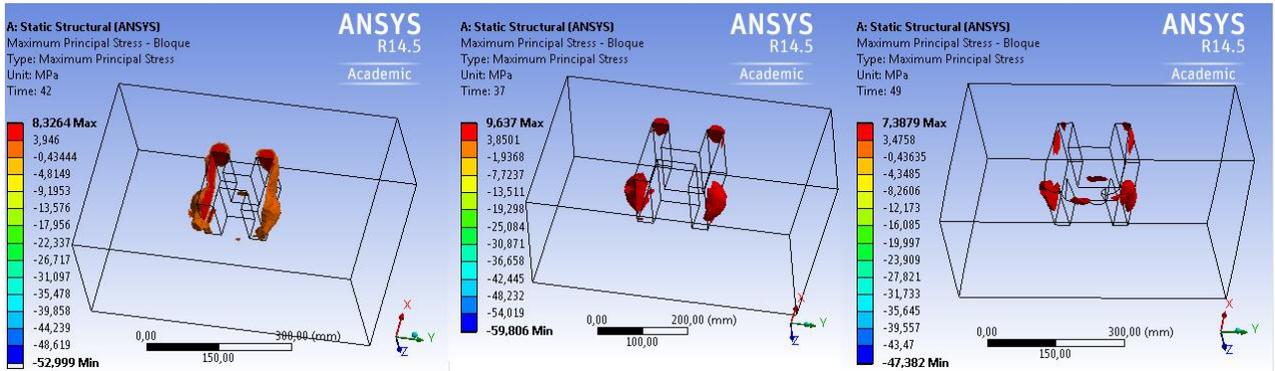


**Figura 89 Tensión principal máxima, Llave 7, eje débil**



**Figura 90 Tensión principal máxima, Llave 8, eje débil**

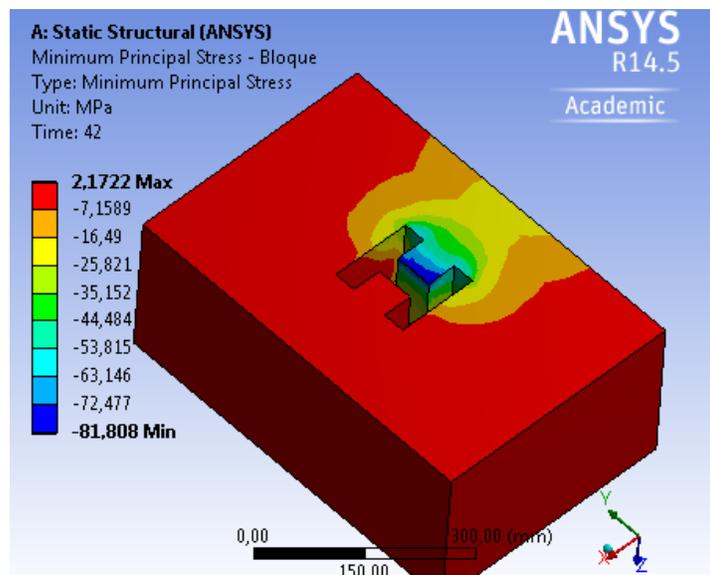
Se repite el proceso anterior y se exhiben las zonas de los bloques donde se sobrepasan la resistencia a la rotura por tracción en el hormigón (Figura 91). En este caso, las zonas donde se supera la tensión de rotura son aún más localizadas, por lo que se asume que la estabilidad del bloque se mantiene.



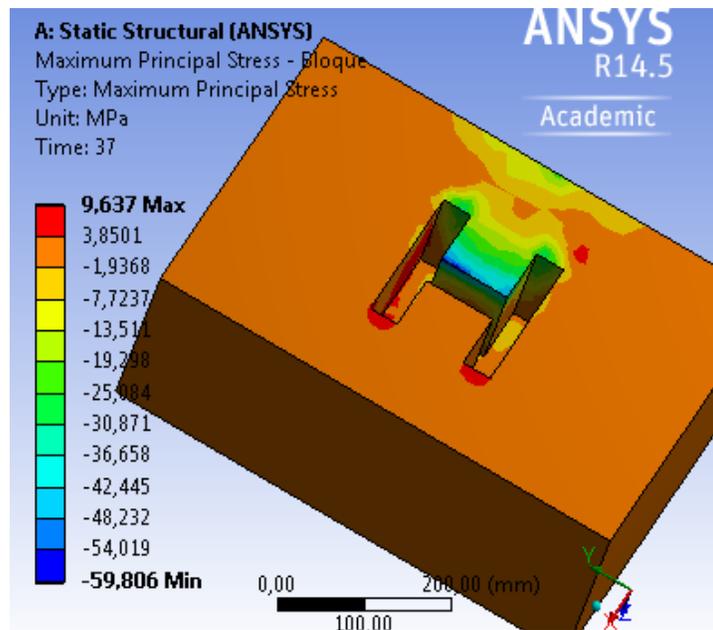
**Figura 91 Tensión principal máxima mayores a  $f_r=3$  MPa**

### *Tensiones principales mínimas*

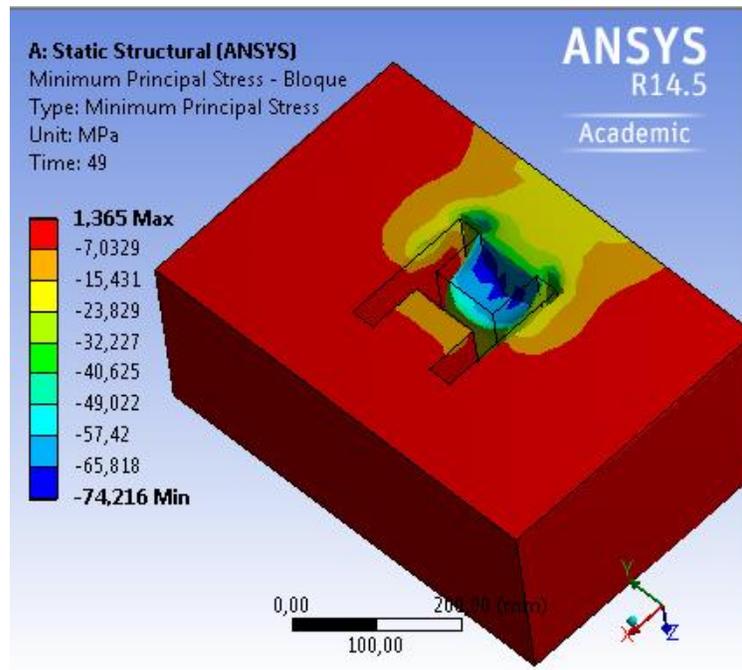
Se repite el análisis realizado anterior, esta vez en los modelos cargados en el eje débil. Las tensiones mínimas se pueden observar en las siguientes figuras. Estas se concentran en la zona de la casilla, específicamente en la cara que se opone al desplazamiento.



**Figura 92 Tensiones principales mínimas en el bloque, Llave 1, eje débil**



**Figura 93 Tensiones principales mínimas en el bloque, Llave 7, eje débil**



**Figura 94 Tensiones principales mínimas en el bloque, Llave 8, eje débil**

La resistencia a la compresión del hormigón se supera por bastante en algunas zonas, pero al igual que lo observado en los casos anteriores, se puede notar que el hormigón que ha sufrido aplastamiento es poco, y que probablemente no compromete la estabilidad general del bloque (Figura 95).

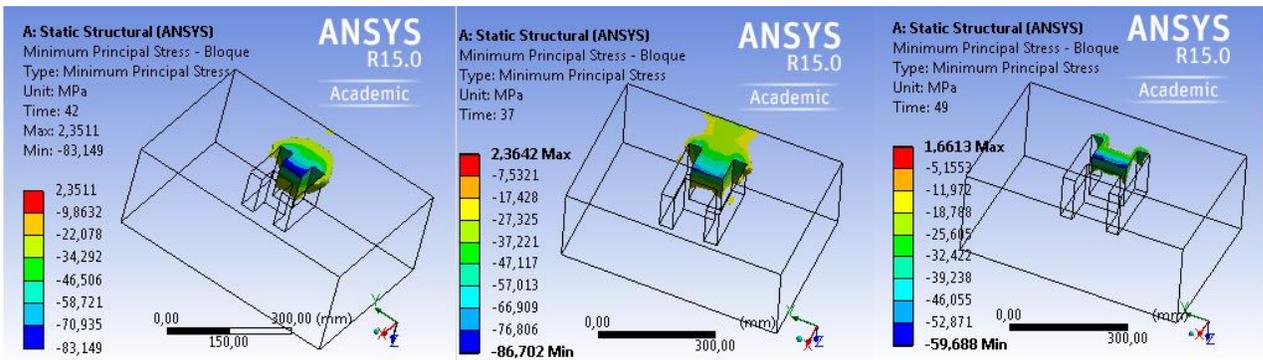


Figura 95 Tensión principal mínima menor a  $f_c' = 24$  MPa

### 5.4.3. Tensiones normales en cara de apoyo del bloque de hormigón

Se analizan las tensiones normales en la cara de apoyo del bloque, en la dirección del desplazamiento. La cara analizada debe soportar íntegramente la carga total aplicada sobre la estructura, por lo que se espera verificar si existe aplastamiento importante en ésta. En la Figura 96 se observan las tensiones para los modelos cargados en su eje fuerte y en la Figura 97 para los cargados en su eje débil.

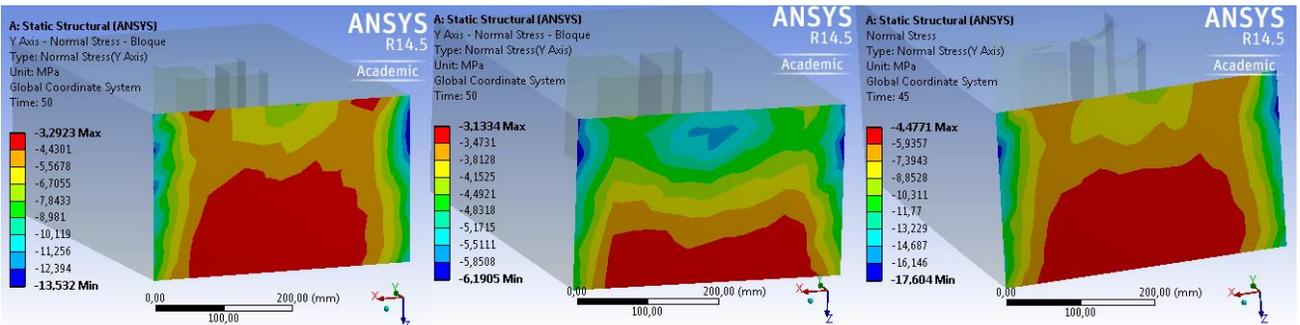


Figura 96 Tensiones normales en cara de apoyo del bloque, eje fuerte

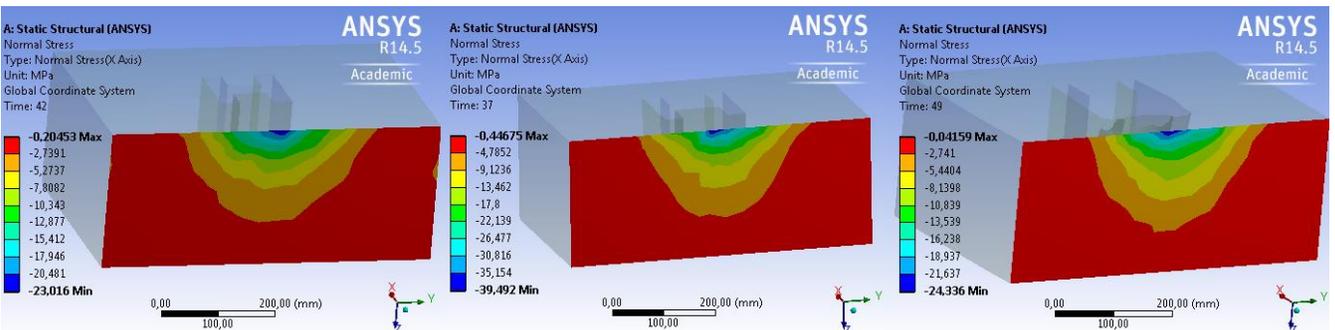


Figura 97 Tensiones normales en cara de apoyo del bloque, eje débil

Se puede observar que en ambos casos, las caras del bloque de hormigón se encuentran comprimidas en toda su superficie. La tensión máxima en la cara no supera en ningún caso la capacidad del hormigón a la compresión, por lo que no hay aplastamiento en esta zona.

#### 5.4.4. Tensiones equivalentes de Von Mises en el bloque de hormigón

Se utilizan las tensiones equivalentes de Von Mises para comparar la capacidad a la compresión conocida del hormigón (Valor unidimensional), con el estado tensional tridimensional en el bloque. Las siguientes tres figuras muestran la distribución de tensiones equivalentes de Von Mises para los modelos cargados en su eje fuerte:

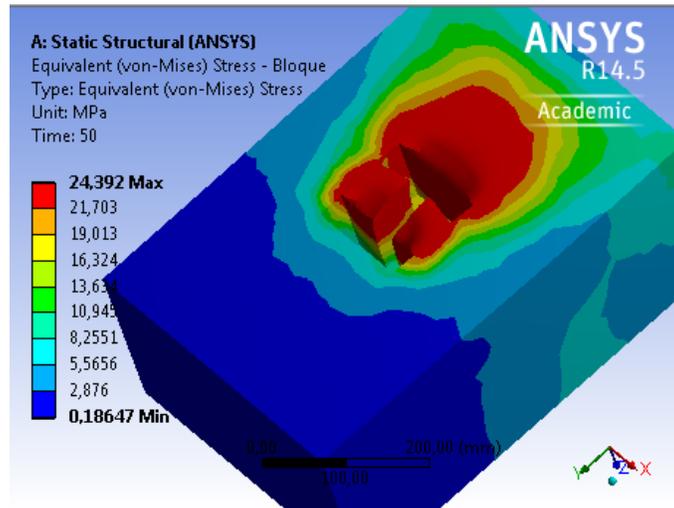


Figura 98 Tensión de Von Mises, Llave 1, eje fuerte

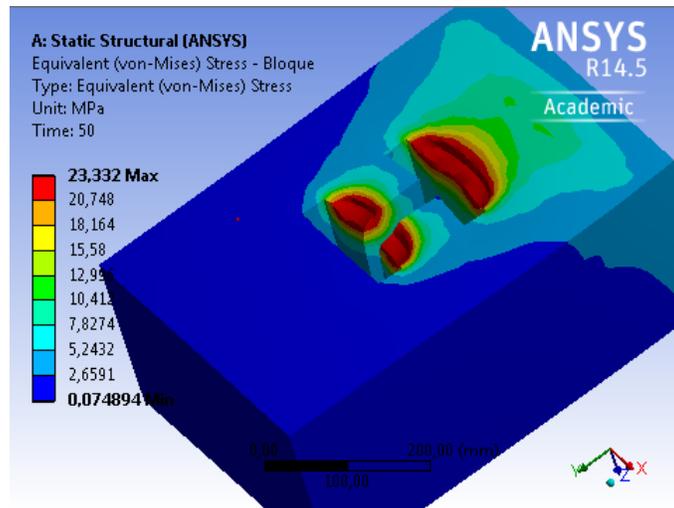
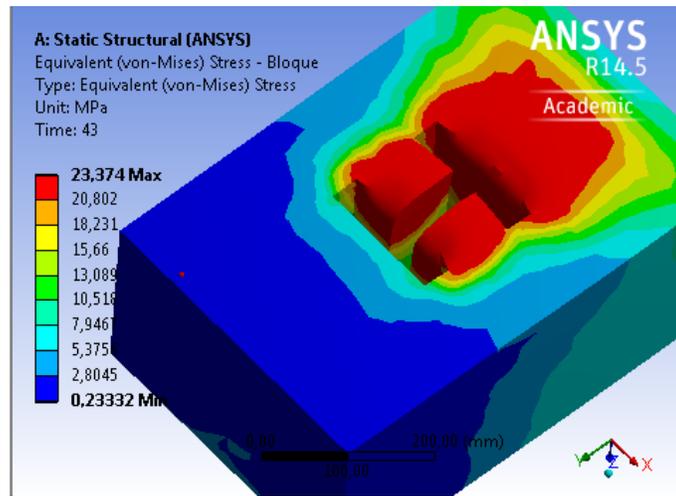
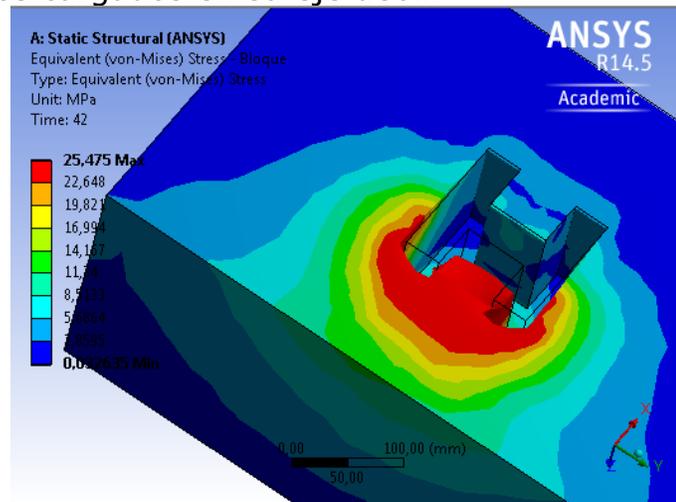


Figura 99 Tensión de Von Mises, Llave 7, eje fuerte

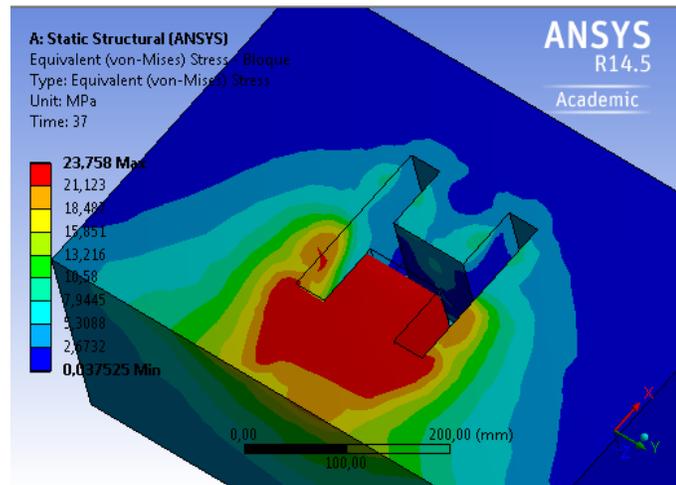


**Figura 100 Tensión de Von Mises, Llave 8, eje fuerte**

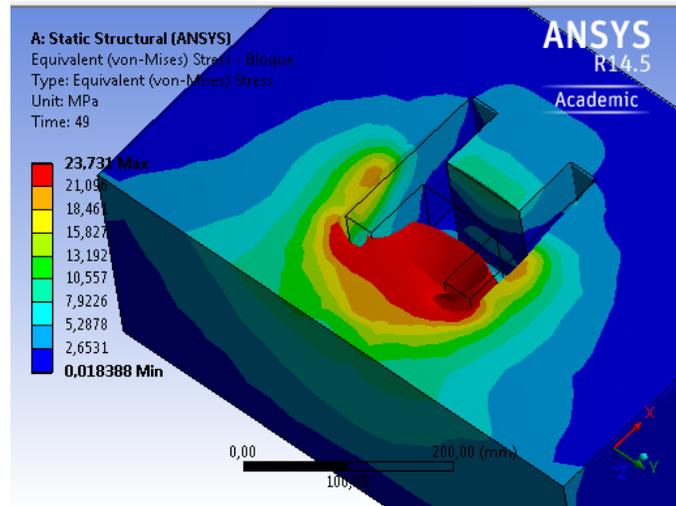
A continuación, se observan tensiones equivalentes de Von Mises para los tres modelos cargados en su eje débil:



**Figura 101 Tensión equivalente de Von Mises, Llave 1, eje débil**



**Figura 102 Tensión equivalente de Von Mises, Llave 7, eje débil**

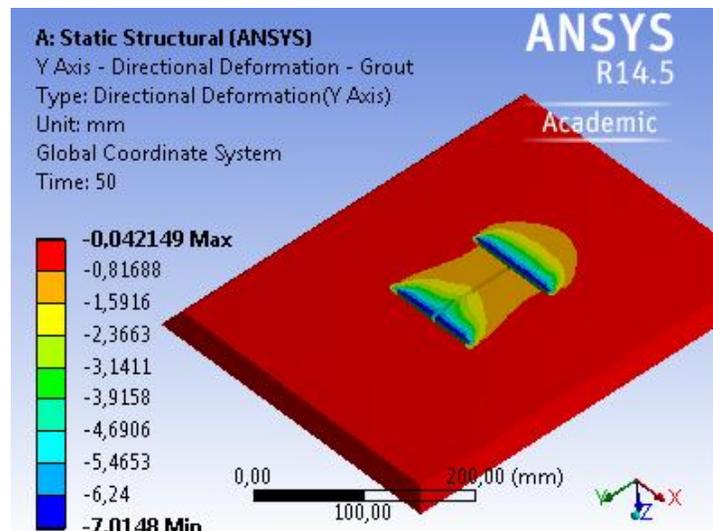


**Figura 103 Tensión equivalente de Von Mises, Llave 8, eje débil,**

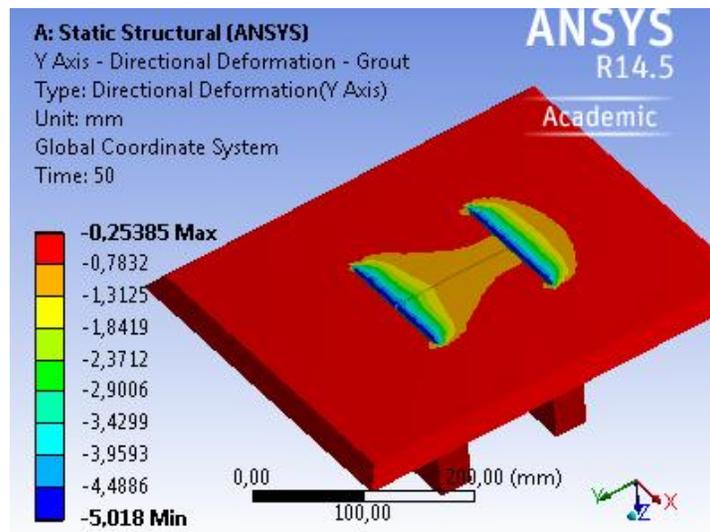
Se puede notar que para los dos casos vistos, las tensiones se concentran en la casilla de hormigón. En las partes comprimidas del hormigón en la casilla, se alcanza la capacidad de hormigón, y como se mencionó anteriormente se espera aplastamiento en estas zonas. Sin embargo, se observa que esto sucede en sectores localizados del bloque, mientras en el resto, las tensiones se mantienen bajo la capacidad del hormigón, manteniendo la estabilidad del sistema.

#### **5.4.5. Deformaciones en el grout**

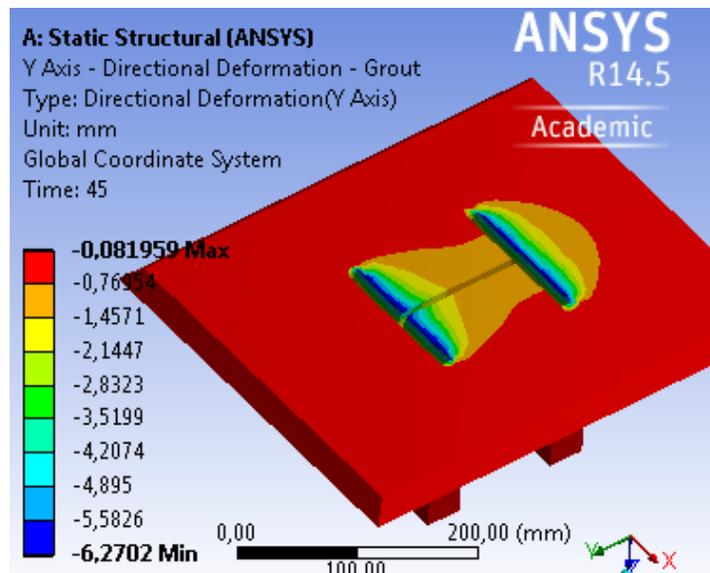
A continuación, se tienen las deformaciones en el grout para los modelos con carga aplicada en el eje fuerte, en la dirección Y. Las figuras siguientes corresponden a las deformaciones finales para el último estado de carga.



**Figura 104 Deformaciones en Y en grout, Llave 1, eje fuerte**

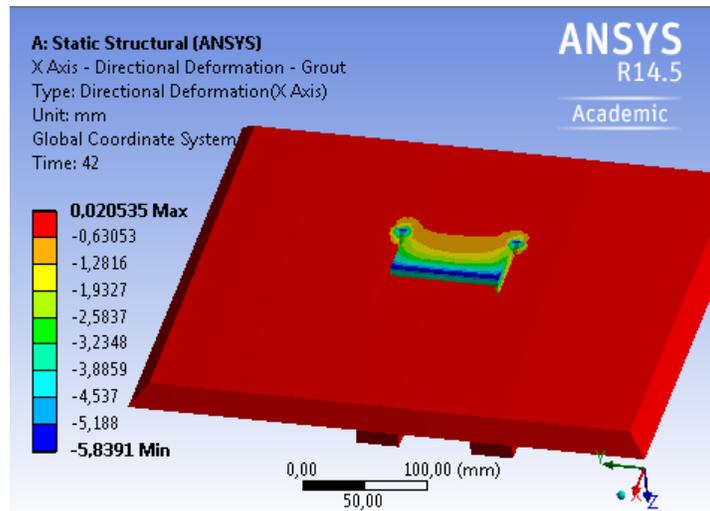


**Figura 105 Deformaciones en Y en grout, Llave 7, eje fuerte**

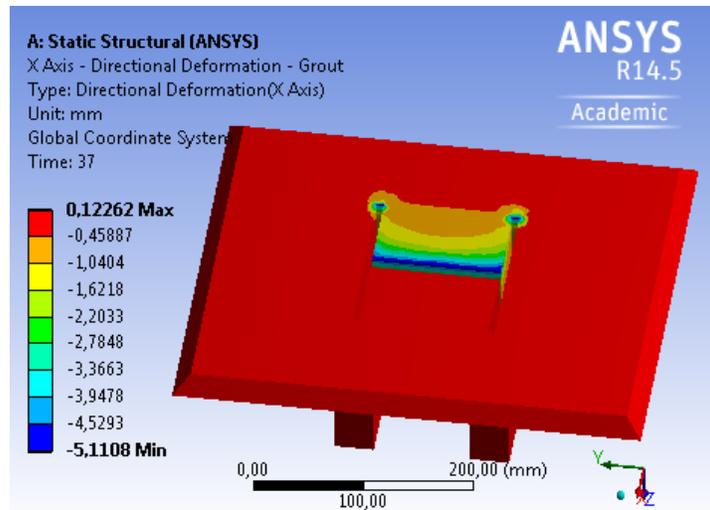


**Figura 106 Deformaciones en Y en grout, Llave 8, eje fuerte**

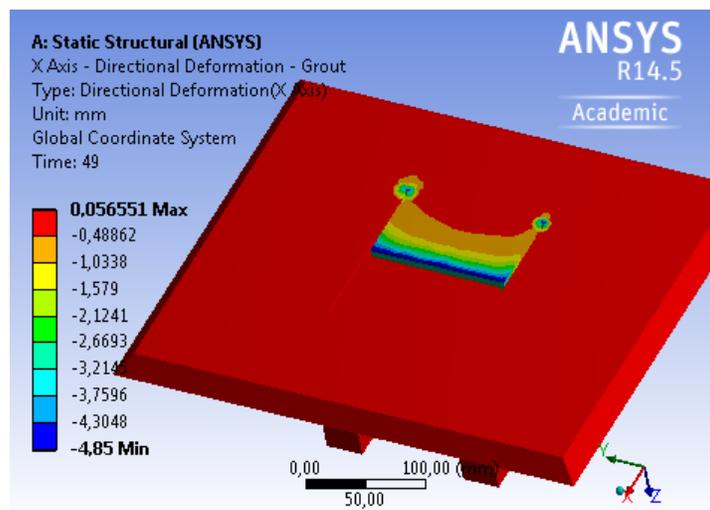
También se analizan las deformaciones en el grout para los modelos con carga aplicada en el eje débil, en la dirección X. Las figuras siguientes corresponden a las deformaciones para el último estado de carga.



**Figura 107 Deformaciones en Y en grout, Llave 1, eje débil**



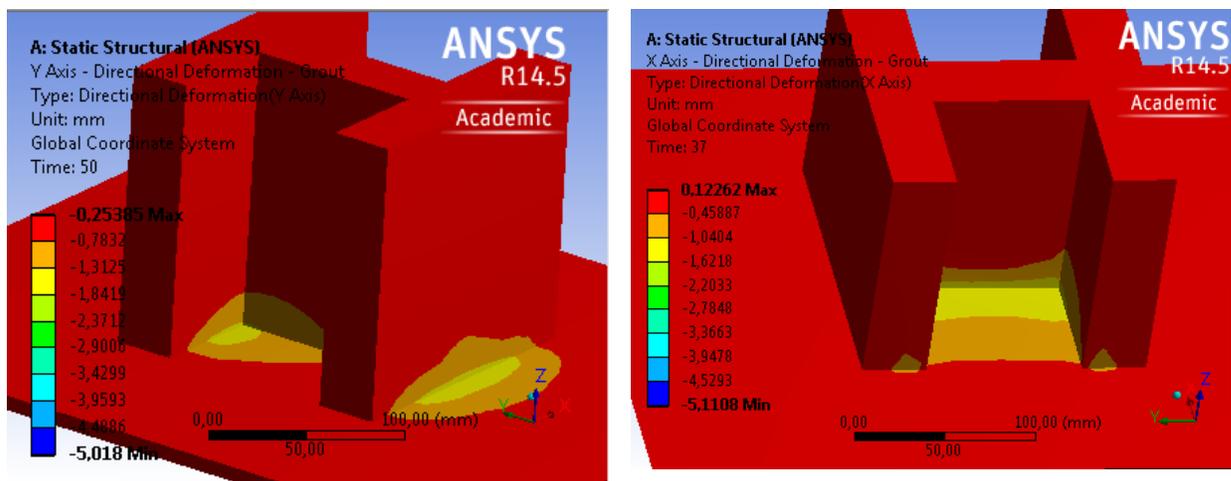
**Figura 108 Deformaciones en Y en grout, Llave 7, eje débil**



**Figura 109 Deformaciones en Y en grout, Llave 8 eje débil**

Se observa que las deformaciones máximas se concentran en el grout comprimido en contacto con las alas para el caso en que el desplazamiento se aplica en el eje fuerte, y para el caso en que el desplazamiento se aplica en el eje débil se concentran en el grout comprimido en contacto con el alma. Las deformaciones máximas observadas son grandes, y muy cercanas a las aplicadas a la placa base.

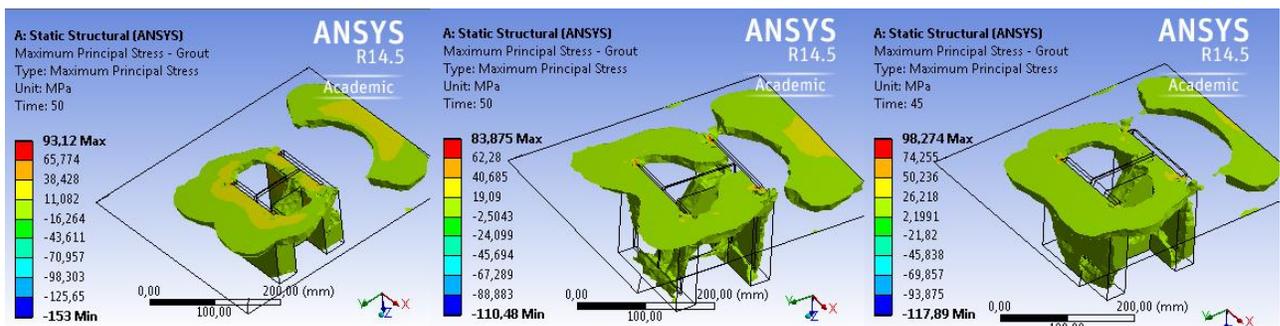
En la Figura 110 se puede apreciar que el grout en contacto con el hormigón sufre deformaciones mucho menores, es decir, las deformaciones más importantes se producen en la cara superior del grout, en contacto con lo placa base. Para el caso de la llave 7 cargada en su eje débil, el grout ubicado en las zonas de contacto entre la placa base y la llave supera los 5 mm de desplazamiento, mientras que el en las zonas en contacto con el hormigón no alcanza los 1,5 mm de desplazamiento.



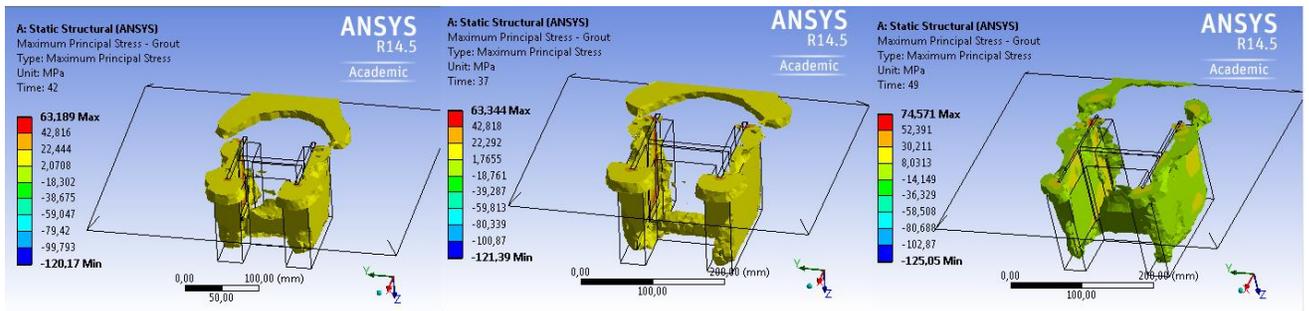
**Figura 110 Desplazamiento máx. del grout dentro del bloque de hormigón, para la llave 7, Eje débil a) Carga aplicada en el eje fuerte b) Carga aplicada en el eje débil**

#### 5.4.6. Tensiones Principales en el grout

Las figuras siguientes muestran las tensiones principales máximas. Las zonas visibles de grout son aquellas que superan la tensión admisible a tracción estimada (4 MPa) y que por lo tanto se espera fisuración.

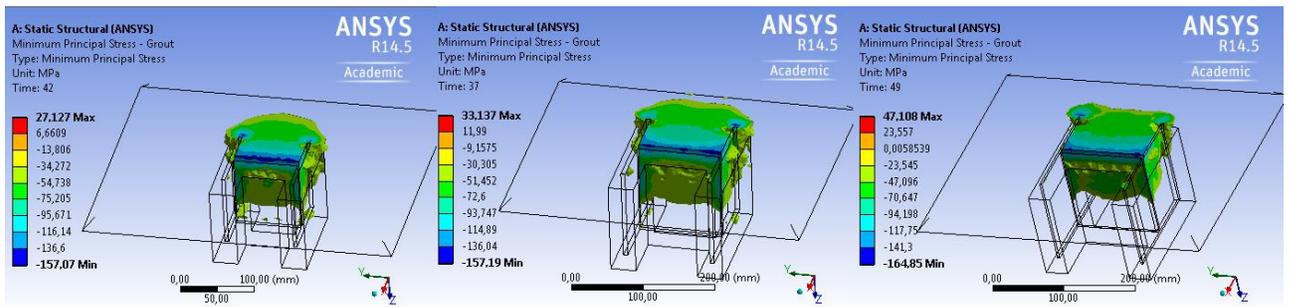


**Figura 111 Tensiones principales máximas que superan  $f_r=4$  MPa, eje fuerte**

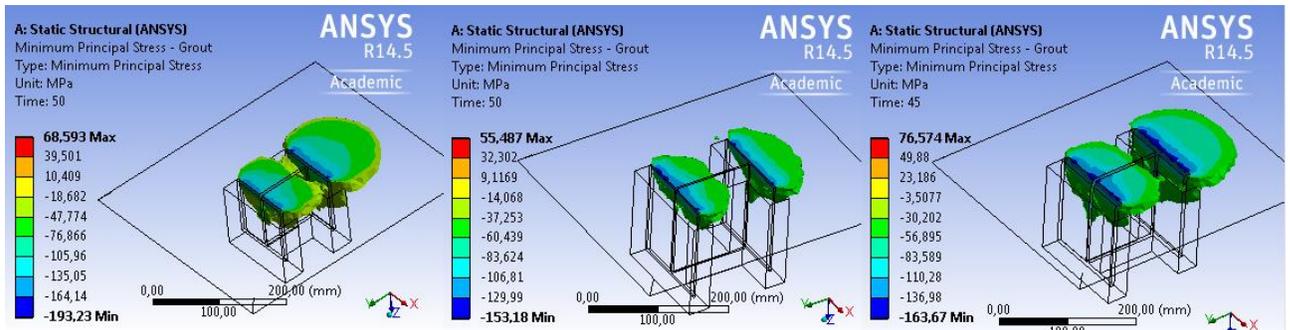


**Figura 112 Tensiones principales máximas que superan  $f_r=4$  MPa, eje débil**

Las siguientes figuras muestran las tensiones mínimas en el grout, donde se supera la capacidad a la compresión estimada en el grout (40 MPa). En estas zonas se espera que haya aplastamiento.



**Figura 113 Tensiones principales mínimas que superan  $f_c'=43$  MPa, eje débil**



**Figura 114 Tensiones principales mínimas que superan  $f_c'=43$  MPa, eje fuerte**

Las tensiones principales máximas superan la capacidad a la rotura del grout en los sectores cercanos a la casilla. En estas zonas se espera que haya fisuración del grout. Por otro lado, también se observa que la capacidad a la compresión del grout también fue superada por las tensiones principales mínimas, por lo que se espera aplastamiento importante debido al alto estado tensional. Se debe recordar que el grout se encuentra confinado por el hormigón y la placa base, por lo que se mantiene parte de su estabilidad una vez aplastado.

## 5.5. Comentarios

Los resultados en deformaciones y tensiones analizadas en los modelos ANSYS concuerdan con las observaciones registradas por Silva (2012) y Villar (2013) sobre los ensayos.

### 5.5.1. Deformaciones en las llaves de corte

Las llaves tuvieron un desplazamiento máximo en la base superior conectada a la placa, casi igual al desplazamiento de la placa con respecto al bloque. La deformación se propaga hacia abajo por la llave inserta en el grout, hasta el nivel donde comienza la casilla del bloque de hormigón. Bajo este nivel prácticamente no hay deformación en la llave. Esto sugiere una deformación debida a esfuerzos de corte.

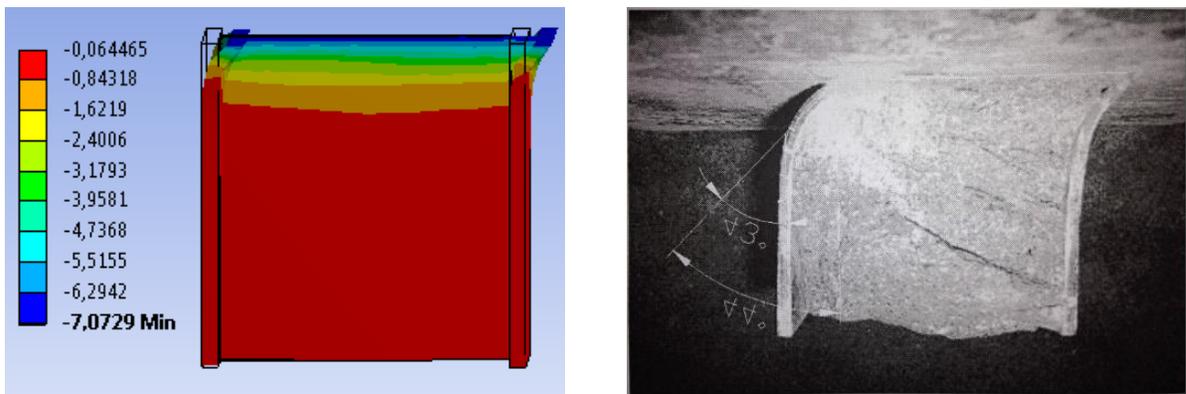


Figura 115 Deformada Llave 1, eje fuerte a) Modelo ANSYS b) Ensayo (Silva, 2012)

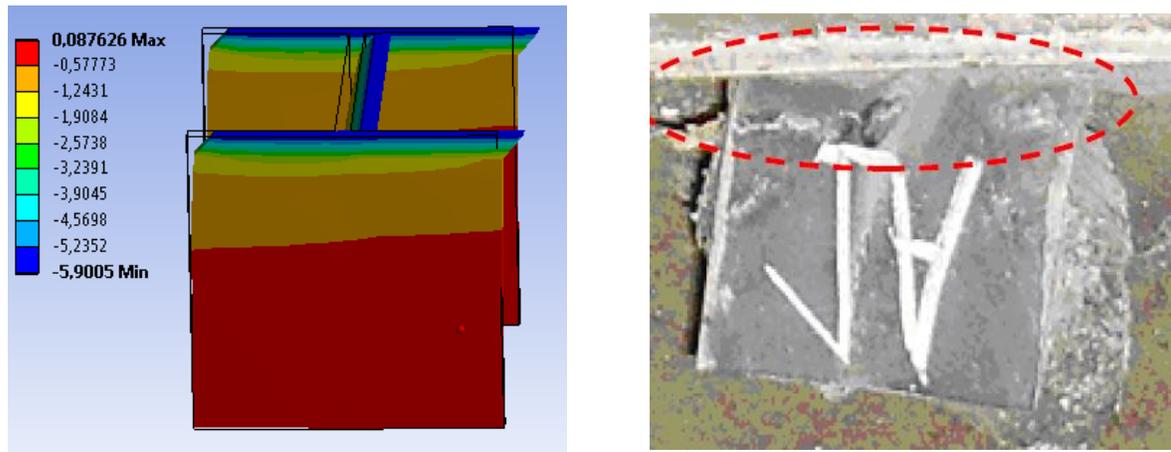


Figura 116 Deformada Llave 1, eje débil a) Modelo ANSYS b) Ensayo (Villar, 2013)

### 5.5.2. Tensiones en la llave de corte

Se analizan las tensiones de corte en la dirección del desplazamiento de la placa base, tensiones normales en Z y tensiones equivalentes de Von Mises.

Las tensiones de corte superan la tensión de fluencia del acero en todas las llaves. Para las llaves cargadas en su eje fuerte la plastificación ocurre principalmente en las almas de las llaves, mientras que cuando son cargadas en su eje débil la plastificación ocurre en las alas.

Las tensiones normales en Z dan cuenta que la flexión juega un papel mucho menor en la plastificación de la llave en relación al corte. Para las llaves cargadas en su eje fuerte, las tensiones de tracción producidas por la flexión superan la fluencia del acero en una pequeña zona de las alas, incluso sin superar la tensión de fluencia en algunas llaves (Llave 7 cargada en su eje fuerte, y llave 7 cargada en su eje débil) mientras que para las llaves cargadas en su eje débil, los esfuerzos de tracción superan la fluencia en una zona pequeña del alma. Por otro lado, las zonas de las llaves donde las tensiones de corte superan la tensión de fluencia corresponden a gran parte de las alas, en el caso de las llaves cargadas en el eje fuerte, y gran parte del alma, en el caso de las cargadas en su eje débil.

Al estudiar la evolución de las tensiones en la llave junto con el desplazamiento en la placa base, se aprecia que en las llaves cargadas en su eje fuerte el fin de la respuesta lineal de la estructura está directamente relacionado con la plastificación de las almas, mientras que en las llaves cargadas en su eje débil, se relaciona con la plastificación de las alas. Esto sugiere que la fluencia del sistema se debe a los esfuerzos de corte en las llaves.

### **5.5.3. Deformaciones y tensiones en el bloque de hormigón**

El bloque de hormigón modelado representa la fundación en la cual se embebe la llave de corte. Es importante mantener la integridad y estabilidad de éste, asegurando una falla dúctil en el acero, antes que una falla frágil en el hormigón.

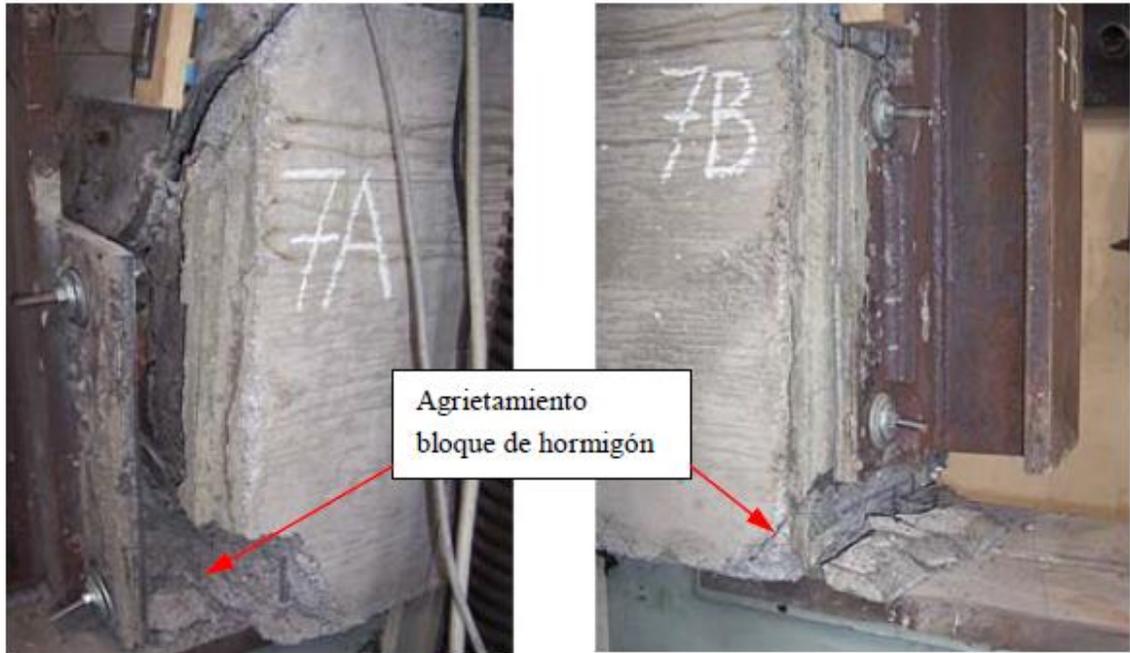
Las deformaciones observadas en todos los sistemas modelados son suficientes para alcanzar el aplastamiento del hormigón. Las mayores deformaciones se concentran en las zonas comprimidas del bloque cercanas a la casilla donde se ubica la llave (Zonas en contacto con el grout, que se opone al desplazamiento).

Al estudiar el estado tensional del bloque, se aprecia que se supera la resistencia del hormigón a la compresión y a la rotura. Es decir, en zonas cercanas a la casilla del bloque hay hormigón aplastado, y existen fisuras en algunas zonas. Sin embargo esto sucede en sectores localizados en el bloque, que no afectan la estabilidad de éste.

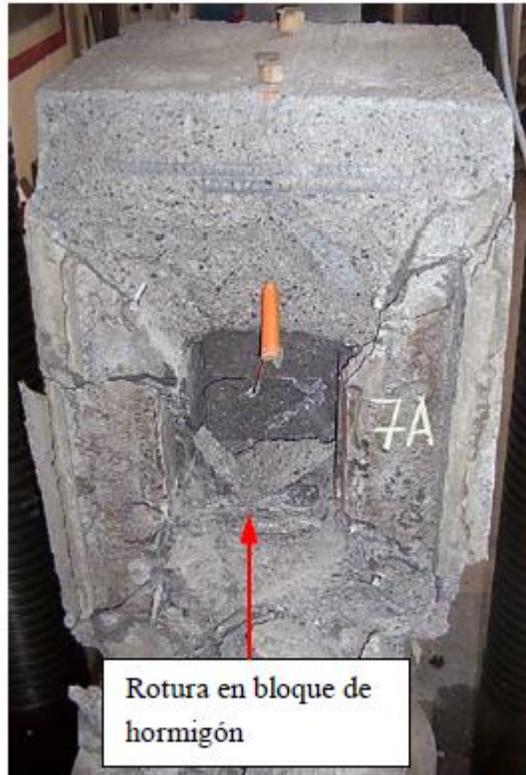
Esto concuerda con las observaciones realizadas por Silva (2012) y Villa (2013), donde se reportan fisuras y desprendimiento en los bloques, y aplastamiento en las zonas cercanas a las llaves.



**Figura 117** Bloque de hormigón después del ensayo (Silva, 2012)



**Figura 118** Agrietamiento bloque de hormigón y desprendimiento de grout (Villar, 2013)



**Figura 119 Zona de rotura bloque de hormigón llave de corte 7 (Villar, 2013)**

#### **5.5.4. Deformaciones y tensiones en el grout**

Del mismo modo como se hizo con el bloque de hormigón, se analizan las deformaciones y estado tensional del grout en los modelos.

Las deformaciones alcanzadas en el grout son muy cercanas a las aplicadas en la placa base. Las compresiones máximas se producen en la cara superior del grout, en contacto con la placa base y en contacto con la llave de corte, que se opone al desplazamiento de ésta. Por otro lado, las tensiones de tracción máximas se ubican cercanas a la zona de la casilla en la cara superior y dentro de ésta. Las tensiones de compresión y tracción máximas superan la capacidad del grout, por lo que se espera aplastamiento en el grout en contacto con las caras de las alas para las llaves cargadas en su eje fuerte, y en el grout entre alas en contacto con el alma en el lado que se opone al desplazamiento de la llave cuando se carga en su eje débil. También se esperan fisuras en el grout que rodea la casilla y dentro de ella, sin embargo, al encontrarse confinada por la placa y el hormigón, no hay desprendimientos importantes en estas zonas. Esto concuerda con las observaciones de Silva (2012) y Villa (2013) en los ensayos.

## **Capítulo 6: Análisis y comparación de los resultados obtenidos**

En este capítulo se presentan los análisis de los resultados obtenidos de los modelos ANSYS, y las comparaciones realizadas con los ensayos experimentales a llaves de corte con geometría doble T. Para esto, se comienza con un análisis separado para el caso de las llaves cargadas en su eje fuerte y las llaves cargadas en su eje débil. Se comparan las respuestas generales del sistema, identificando el límite lineal en cada llave. Además, se incluyen las respuestas de ambas probetas de una llave ensayada (Llave A y llave B), ya que se observa que en algunos casos se presentan diferencias en éstas que deben ser tomadas en cuenta. La respuesta de las probetas A son denominadas "Ensayo A", y la de las probetas B "Ensayo B".

### **6.1. Comparación modelos ANSYS vs. Ensayos experimentales**

Se comparan las respuestas de los modelos con los obtenidos en los ensayos. Al igual como se hizo en el capítulo de calibración, se grafica la carga aplicada vs desplazamiento en la placa base. Se identifica de forma visual los puntos de fluencia del sistema y se contrastan las rigideces obtenidas de los modelos con los obtenidos de forma experimental. Además se identifican los esfuerzos de flexión en la superficie de la llave de corte, conectada con la placa base, ya que según la hipótesis tomada por la AISC (AISC, 2003) la llave se comportaría como una viga en cantiléver y la flexión máxima se encontraría en la base unida a la placa base. La flexión es normalizada por los momentos plásticos de cada llave, y se grafican en función del desplazamiento aplicado a la placa base.

La identificación visual de los límites lineales de los ensayos se realiza considerando el punto en que se observa un cambio en el comportamiento inicial de la curva de respuesta de las probetas. Por otro lado, también se toman en cuenta las deformaciones a lo largo de la llave, medidas por los transductores internos, lo que provoca en algunos casos una diferencia en los límites de fluencia identificados por Silva (2012) y Villar (2013) de los identificados en este trabajo. Como ya se ha mencionado, los transductores internos miden los desplazamientos en la llave en distintos puntos de su altura embebida en el bloque. Durante el rango lineal, se observa un desplazamiento conjunto de todos los puntos de la llave, hasta que la plastificación de ésta provoca un aumento considerable en los desplazamientos medidos en la placa, y una disminución del desplazamiento medido en zonas más profundas de la llave.

Ya se ha mencionado en capítulos anteriores que los modelos ANSYS no consideran el aporte de los pernos de anclaje a la resistencia al corte del sistema. En general, esto corresponde a una buena caracterización del

comportamiento de la estructura ensayada. Sin embargo, se considera la posibilidad de que las perforaciones de la placa base sean tapadas total o parcialmente por el grout de nivelación, haciendo que los pernos tomen parte de la fuerza de corte. Para analizar este caso se estima la capacidad al corte de los pernos, considerando los ensayos realizados a éstos por Villar (2013) y Silva (2012).

**Tabla 29 Propiedades del material y geometría de pernos de anclaje**

<b>fy</b> <b>[MPa]</b>	<b>εy</b>	<b>τy</b> <b>[MPa]</b>	<b>E</b> <b>[MPa]</b>	<b>G</b> <b>[MPa]</b>	<b>A</b> <b>[mm<sup>2</sup>]</b>	<b>h</b> <b>[mm]</b>
477	0,007	286	79.489	30.572	50	40

Tomando las propiedades mecánicas de los pernos, y lo observado en la Figura 120, se estima la fuerza de corte que es capaz de tomar cada perno, en función del desplazamiento de la placa base con respecto al bloque de hormigón.

$$F_c = A_p \cdot \tau = A \cdot G \cdot \gamma = G \cdot \tan^{-1}\left(\frac{D_p}{e_p}\right)$$

**Ecuación 20**

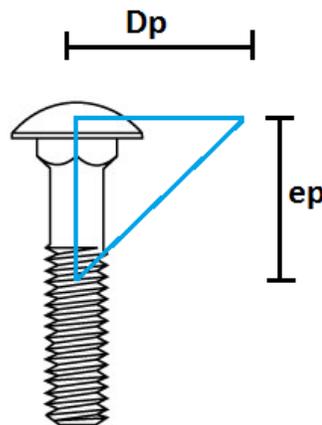
Dónde:

$A_p$ : Área transversal perno (50 mm<sup>2</sup>).

$\tau$ : Esfuerzo de corte en el perno.

$G$ : Módulo de cizalle.

$e_p$ : Espesor de la placa base (25 mm).



**Figura 120 Fuerzas de corte en el perno**

Finalmente, la capacidad máxima que los pernos pueden aportar al sistema, se alcanza cuando la sección de estos comienza a fluir por tensiones de corte:

$$F_{corte\ max} = \tau_y * A_p$$

**Ecuación 21**

$F_{corte}$  máximo por perno: 1,46 tonf

$F_{corte}$  en 4 pernos: 5,84 tonf

Dónde:

- $A_p$ : Área transversal perno (50 mm<sup>2</sup>).
- $\tau$ : Esfuerzo de corte en el perno.
- G: Módulo de cizalle.
- $e_p$ : Espesor de la placa base (25 mm).
- $\tau_y$ : Tensión de fluencia al corte (0,6fy).

### 6.1.1. Llaves con carga aplicada en el eje fuerte

#### Llave 1

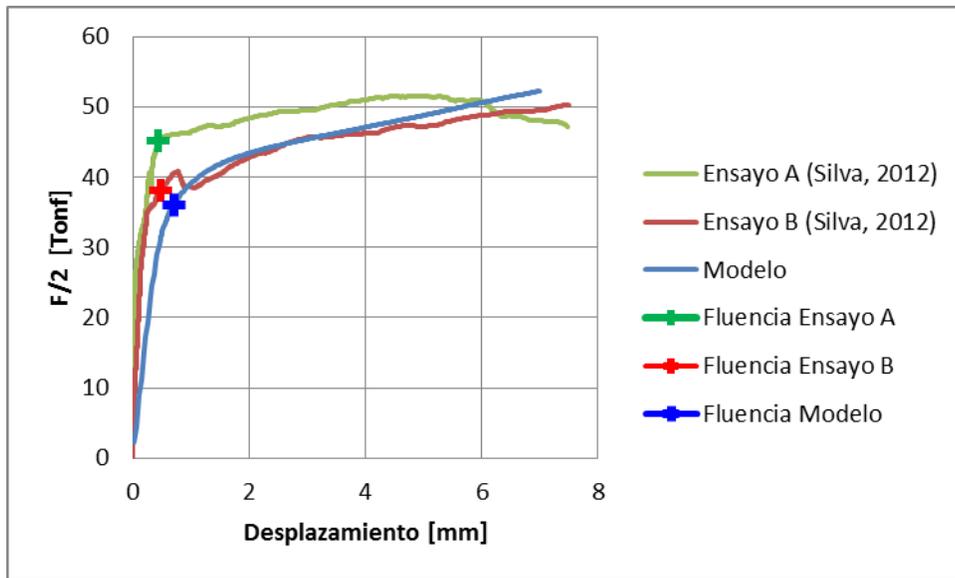


Figura 121 Respuesta F vs. Desplazamiento Llave 1

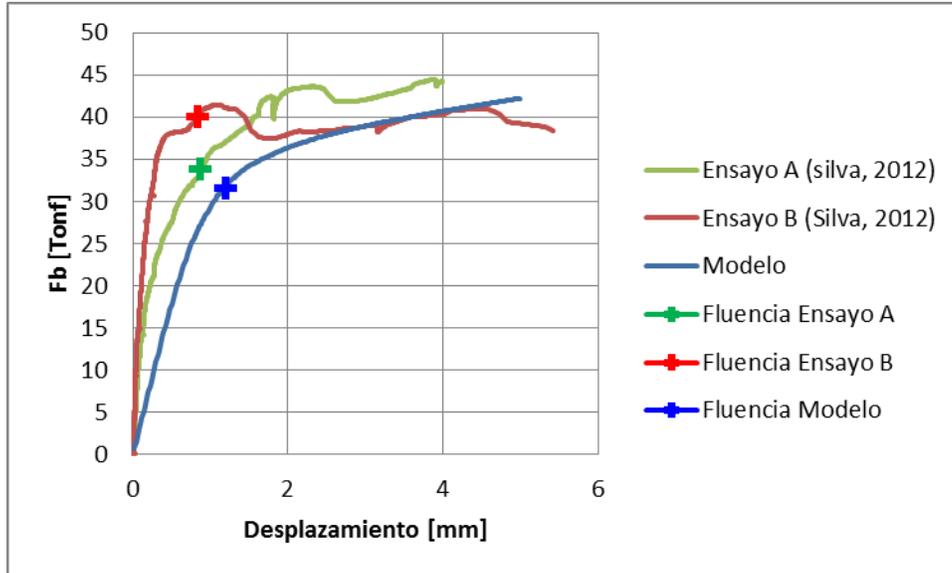
Tabla 30 Rigideces Llave 1 Eje fuerte

	Desp [mm]	F/2 [tonf]	Rigidez [tonf/mm]	Rigidez/Rigidez modelo
<b>Modelo</b>	0,7	36	51,4	1
<b>Ensayo A</b>	0,45	45	100	1,94
<b>Ensayo B</b>	0,5	38	76	1,48

En la llave n° 1 se observa una diferencia en la rigidez del tramo lineal del modelo en comparación con la rigidez inicial del ensayo. Se aprecia que la probeta A del ensayo tuvo una capacidad ligeramente mayor, mientras que la probeta B tiene un buen ajuste con los modelos en su tramo post fluencia. Las probetas ensayadas tuvieron rigideces mayores que la obtenida en el modelo, siendo aproximadamente 50% mayor en la probeta B y 95% mayor en la probeta A.

## Llave 7

Para el ensayo de la llave 7 se cuentan con dos celdas de carga distintas, por lo que se tiene el valor de la carga aplicada en cada llave por separado. A continuación se muestran las curvas obtenidas en ambas probetas del ensayo, junto con la curva obtenida del modelo ANSYS.



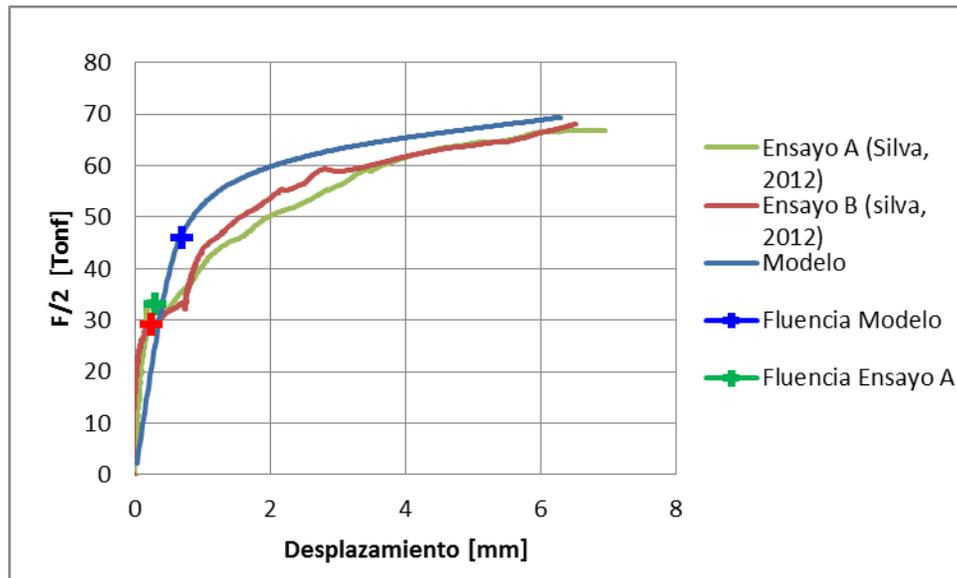
**Figura 122 Respuesta F vs. Desplazamiento Llave 7**

**Tabla 31 Rigideces Llave 7 Eje fuerte**

	<b>Desp [mm]</b>	<b>F/2 [tonf]</b>	<b>Rigidez [tonf/mm]</b>	<b>Rigidez/Rigidez modelo</b>
<b>Modelo</b>	1,2	32	26,3	1
<b>Ensayo A</b>	0,85	34	38,4	1,48
<b>Ensayo B</b>	0,85	40	47,1	1,79

Al igual que lo observado en la llave 1, los ensayos de la llave 7 presentan una rigidez inicial mayor. En el caso de la llave A, el ensayo está en toda la curva aproximadamente unas 5 tonf por encima de la curva obtenida de los modelos. La curva de la llave B está por encima de la curva de los modelos, hasta llegar a la fluencia, donde alcanza un máximo y luego disminuye la carga, hasta juntarse con la curva obtenida del modelo.

## Llave 8



**Figura 123 Respuesta F vs. Desplazamiento Llave 8, eje fuerte**

Se establece como límite lineal pasado las 30 tonf, donde ocurre un quiebre en la respuesta de las probetas en el ensayo. Sin embargo se observa un aumento de la capacidad post-fluencia mayor al observado en las otras llaves. En la respuesta obtenida de los ensayos, la carga de fluencia es aproximadamente la mitad de la carga máxima resistida por el sistema. Esto no sucede en la respuesta obtenida del modelo donde se obtiene una respuesta lineal más prolongada, con mayor carga y mayor desplazamiento de fluencia. Sin embargo, la carga máxima alcanzada por el modelo es muy cercana a la alcanzada experimentalmente.

**Tabla 32 Rigideces Llave 8 Eje fuerte**

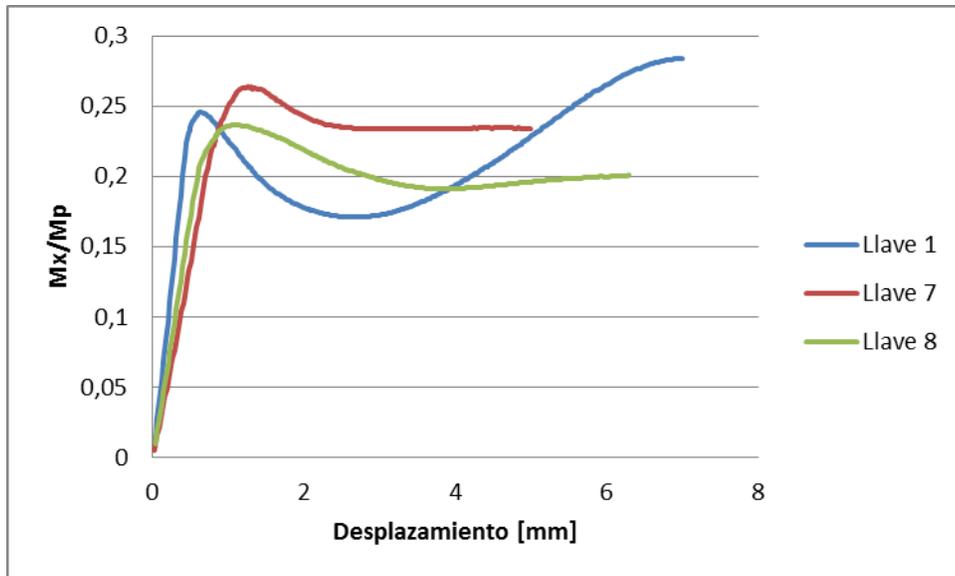
	<b>Desp [mm]</b>	<b>F/2 [tonf]</b>	<b>Rigidez [tonf/mm]</b>	<b>Rigidez/Rigidez modelo</b>
<b>Modelo</b>	0,7	46	65,7	1
<b>Ensayo A</b>	0,3	33	110	1,67
<b>Ensayo B</b>	0,25	29	116	1,77

### ***Esfuerzos de flexión en la base de la llave conectada a la placa base***

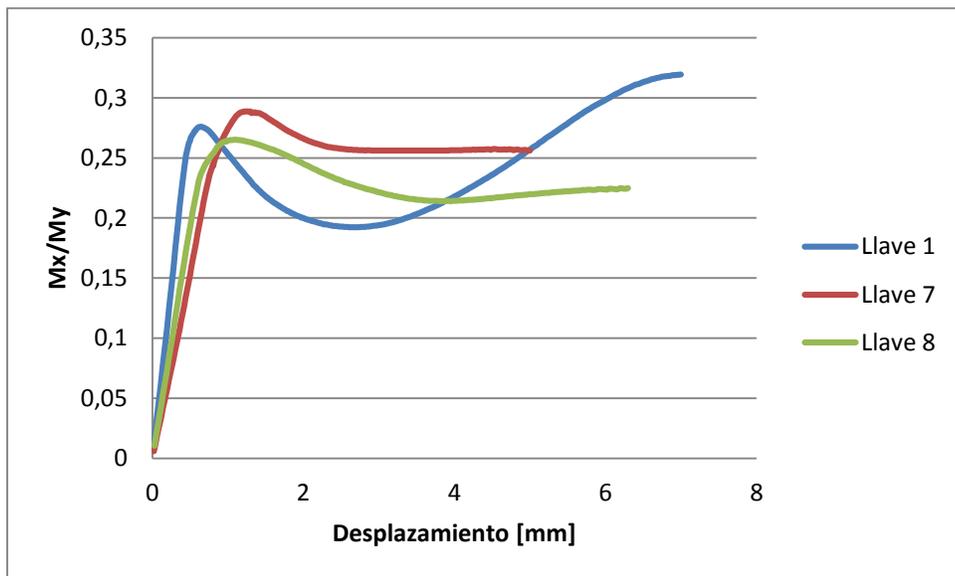
Las flexiones en las llaves nunca superan el momento plástico de la sección. En la Figura 124 es posible apreciar que las flexiones alcanzan un peak, llegando a aproximadamente un cuarto del momento plástico.

En general, vemos que la flexión en la base aumenta de forma lineal inicialmente, hasta alcanzar un peak, y luego decrece. Sin embargo la llave 1 vuelve a tener un aumento en la flexión superando incluso el peak inicial.

Esto puede explicarse considerando las grandes deformaciones que se alcanzan en la base de la llave, siendo la más solicitadas de todas (Llegando hasta los 7 mm).



**Figura 124 Esfuerzos de flexión vs desplazamiento, eje fuerte**



**Figura 125 Esfuerzos de flexión vs desplazamiento, eje fuerte**

## **Resumen de resultados de llaves cargadas en el eje fuerte**

### Rigidez

A continuación se presenta un resumen de las razones de las rigideces promedios de los ensayos y de los modelos ANSYS.

**Tabla 33 Resumen razón rigidez ensayo/rigidez modelo eje fuerte**

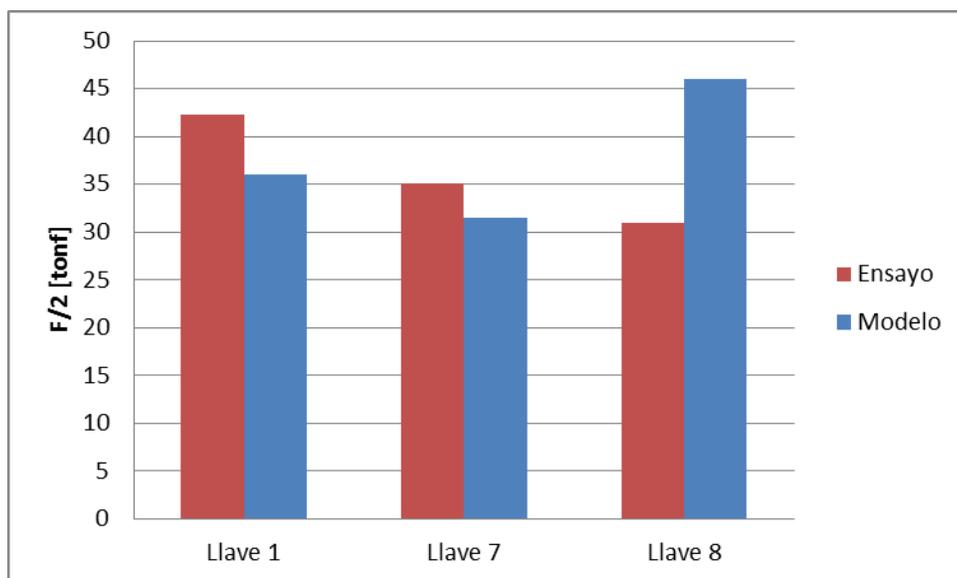
<b>Llave n°</b>	<b>Razón llave A</b>	<b>Razón llave B</b>
1	1,94	1,48
7	1,46	1,79
8	1,67	1,77

En los ensayos se encuentra una rigidez considerablemente mayor a la obtenida en las respuestas de los modelos ANSYS. Una posibilidad es que los pernos de anclaje aporten resistencia en el tramo lineal de la respuesta, debido a presencia de grout en las perforaciones de la placa. Determinado ya el aporte máximo que pueden dar los pernos trabajando al corte, se estima la rigidez que éstos aportarían al sistema:

**Tabla 34**

<b>Llave n°</b>	<b>Rigidez promedio ensayo [Tonf/m]</b>	<b>Aporte de los pernos a la rigidez</b>
1	73	14%
7	56	17%
8	113	20%

En la Tabla 34 se observa que el aporte de los pernos trabajando al corte puede llegar hasta el 20% de la rigidez del sistema. Sin embargo, las diferencias entre las rigideces obtenidas de los ensayos y las obtenidas de los modelos son mayores, por lo que debe existir algún elemento en la instalación que rigidiza el sistema, que no ha sido incorporado en los modelos.



**Figura 126 Comparación carga de fluencia ensayo vs modelo, eje fuerte**

En la Figura 126 se observa que el valor de la carga de fluencia obtenida en los modelos es cercana a la obtenida en los ensayo, excepto en la llave 8 donde se tiene una diferencia de aproximadamente 14 tonf. Además esta es la única llave donde la carga de fluencia del modelo está por sobre la de los ensayos.

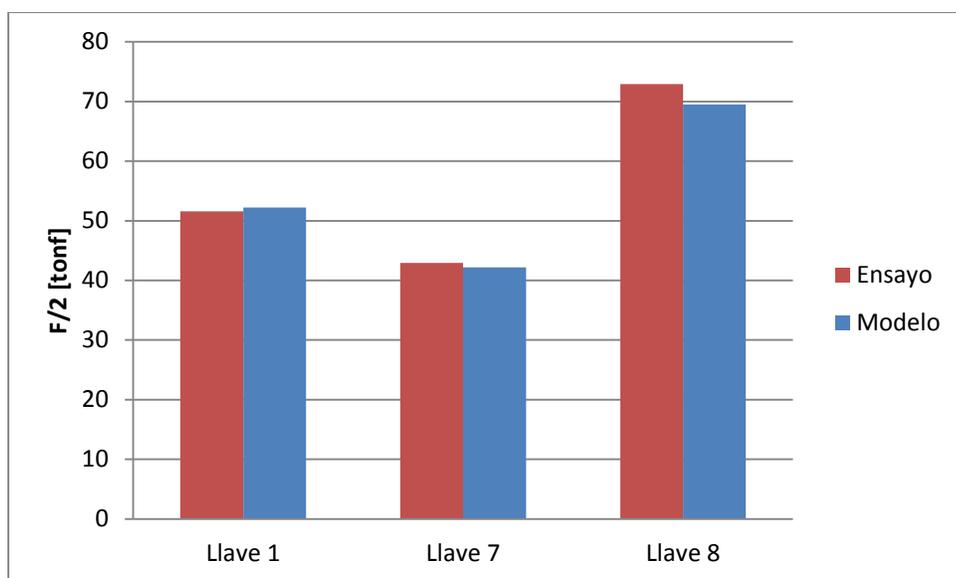
#### Capacidades máximas

En la Tabla 35 se resumen los valores de carga máxima obtenida en el modelo, que es alcanzada en el último estado de carga. También se detallan las cargas máximas obtenidas en el ensayo, y la carga obtenida en éste cuando se llegan a los desplazamientos finales de los modelos. Se puede apreciar que estos dos últimos valores son bastante cercanos.

**Tabla 35 Cargas máximas Eje fuerte**

Llave	MODELO		ENSAYO		
	Carga máxima [tonf]	Desplazamiento [mm]	Carga máxima [tonf]	Carga al fin del modelo [tonf]	
<b>1</b>	52,2	7	51,6	51,5	99,8%
<b>7</b>	42,2	5	42,94	38,1	88,7%
<b>8</b>	69,5	6,3	72,9	66,74	91,5%

La capacidad máxima de los modelos se obtiene para el último estado de carga de éstos. En la Figura 127 se observa que las cargas máximas obtenidas en los modelos son muy cercanas a las obtenidas en los ensayos.



**Figura 127 Carga máxima ensayo vs modelo Eje fuerte**

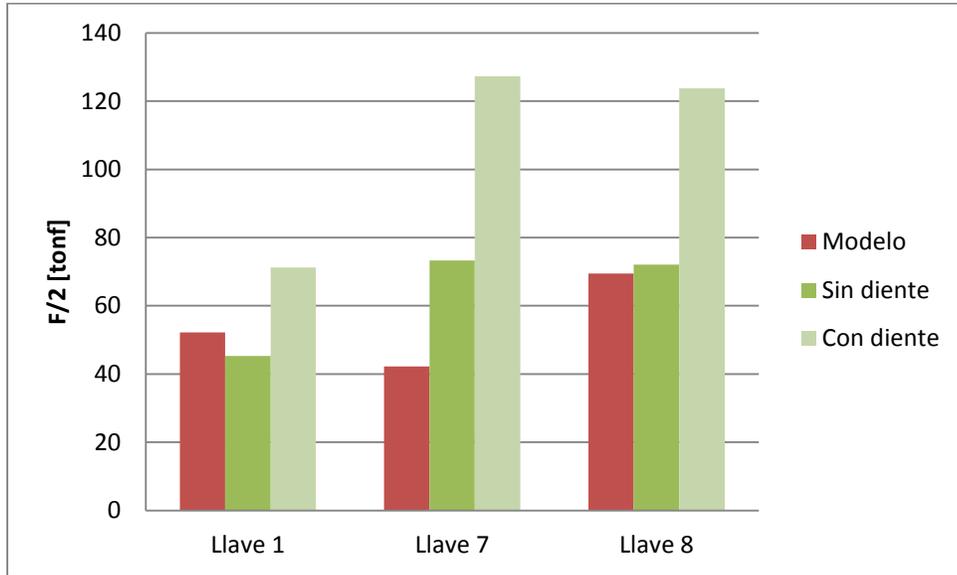
### Capacidades nominales

En la Tabla 36 se resumen las capacidades nominales determinadas en el capítulo 3. Se incluyen las capacidades máximas considerando una falla por aplastamiento del hormigón, con el aporte del diente de hormigón entre las alas (V1) y sin el aporte de éste (V2). También incluye la capacidad por fluencia por corte, de la sección transversal completa de la llave, y sólo la plastificación de las alas.

**Tabla 36 Capacidades nominales Eje fuerte**

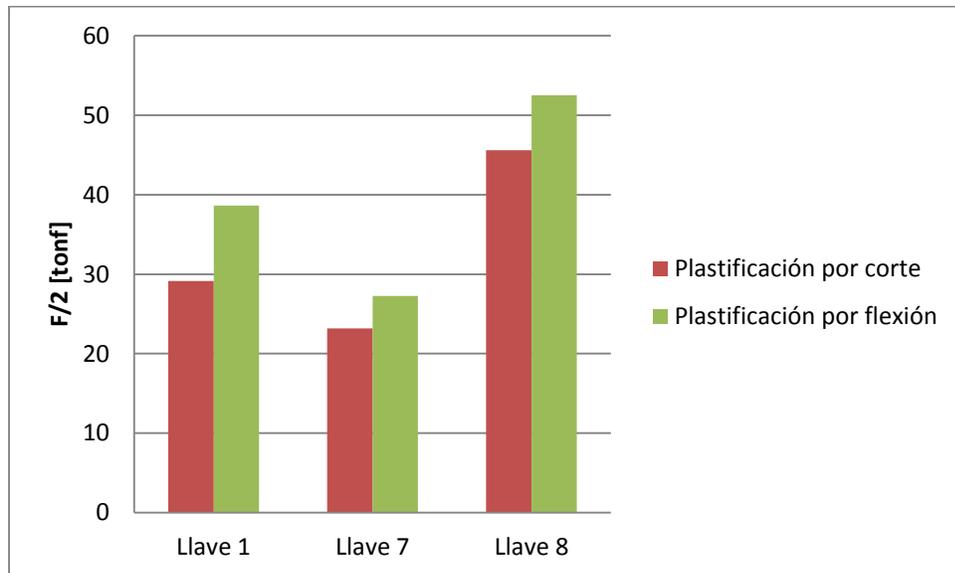
Llave	V hormigón [Tonf]		V acero por corte [tonf]		V acero por flexión [tonf]
	V1	V2	Fluencia en el alma	Fluencia completa	
1	45	71	10	29	39
7	73	127	8	23	27
8	72	124	16	46	53

Observando la Figura 128 es posible notar que en todas las llaves, la capacidad por aplastamiento del hormigón, considerando el aporte del diente entre las alas, está aproximadamente unas 10 tonf por sobre la capacidad máxima del ensayo en la llave n° 1, y sobre las 20 tonf en las llaves n° 7 y 8. Por otro lado, al no considerar el aporte del diente de hormigón entre las alas del perfil, la capacidad por aplastamiento del hormigón se ubica por sobre la capacidad máxima del ensayo solo en la llave n° 2, mientras que en las otras dos llaves la capacidad real y nominal del hormigón son muy cercanas.



**Figura 128 Comparación capacidad máxima modelos vs capacidad nominal por aplastamiento hormigón, eje fuerte**

Al comparar las cargas de fluencia identificadas en las curvas del ensayo, con las cargas de plastificación por corte de los perfiles doble T (Figura 130), se observa que la plastificación de las alas ocurre antes que la fluencia del sistema, mientras que la plastificación total de la sección del perfil ocurre aproximadamente 10 tonf antes en las llaves 1 y 7, y unas 2 tonf después en la llave 8. Esta observación apoya la idea de que la fluencia del sistema ocurre una vez que se ha alcanzado la plastificación de la sección completa del perfil, y ésta se propaga por unos centímetros en el alma por debajo de la superficie de la llave conectada a la placa base.



**Figura 129 Comparación fluencia modelo vs capacidades nominales acero, eje fuerte**

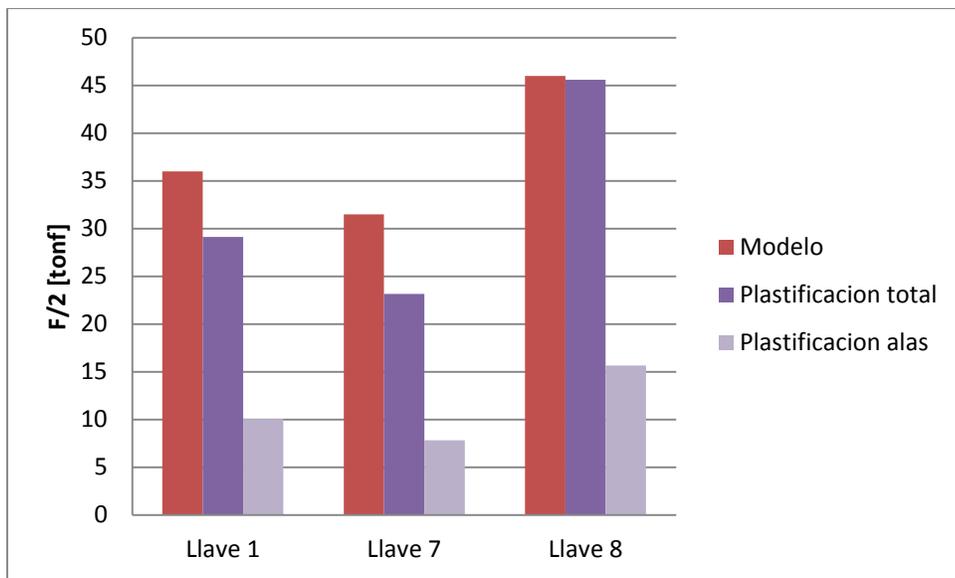
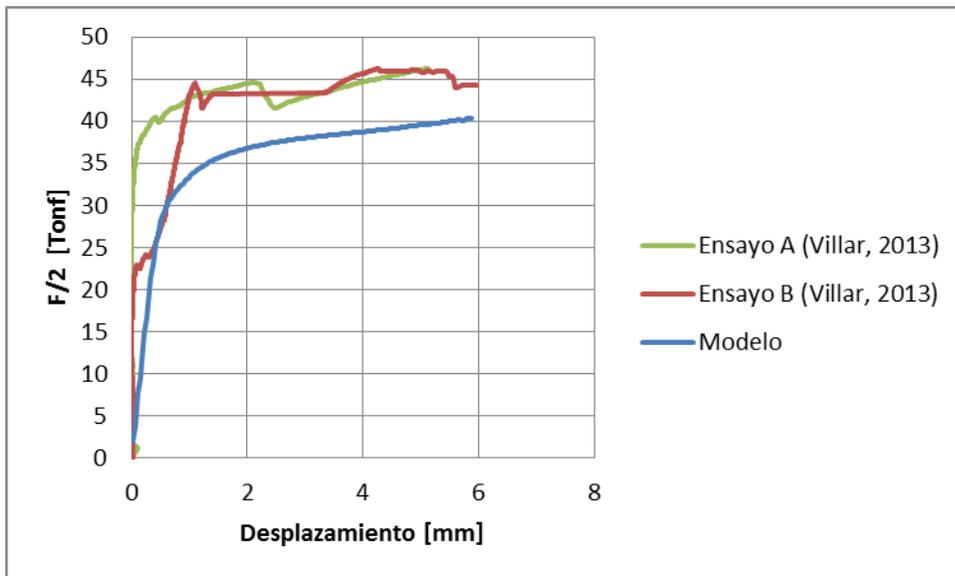


Figura 130 Comparación carga de fluencia ensayo vs capacidad nominal por plastificación acero por corte, eje fuerte

### 6.1.2. Llaves con carga aplicada en el eje débil

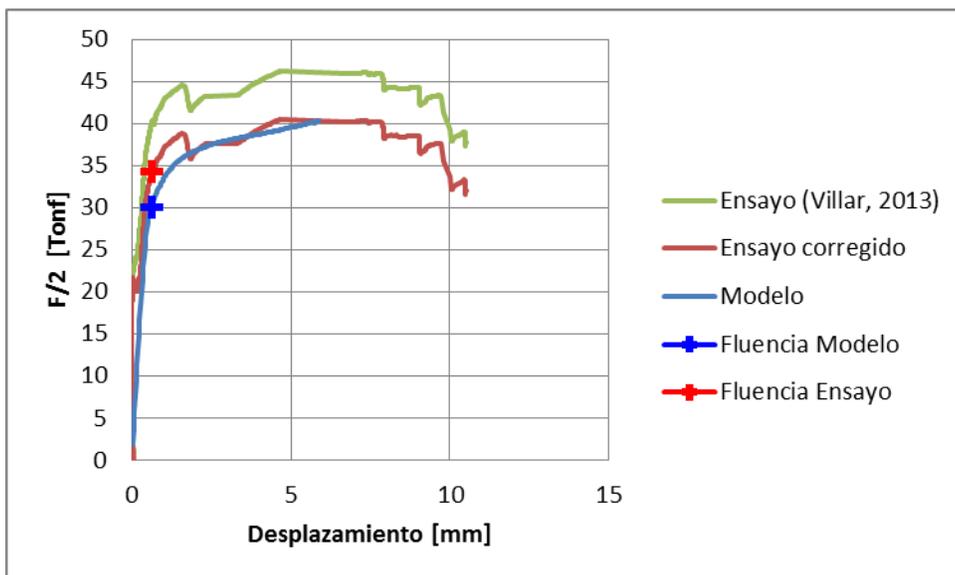
#### **Llave 1**

Comparando la respuesta de la llave 1, obtenida por el modelo ANSYS y la respuesta obtenida en los ensayos (Figura 131), se observa que esta última presenta una resistencia bastante mayor. A pesar de no encontrarse registros de observaciones de grout en las perforaciones de la placa base, se estudia la posibilidad de que los pernos de anclaje hayan aportado resistencia. Es por esto que se incluye una corrección de la curva F vs desplazamiento experimental para la llave 1. La corrección se realiza considerando el aporte de los 4 pernos de anclaje, en función del desplazamiento de la placa base medida, utilizando la **iError! No se encuentra el origen de la referencia.** ya deducida, hasta que estos alcanzan la tensión de fluencia por corte.



**Figura 131 Respuesta F vs. Desplazamiento Llave 1**

Analizando la Figura 132 se observa un buen acercamiento de la respuesta del modelo con la respuesta corregida del ensayo, por lo que se considera la posibilidad del aporte de los pernos como una hipótesis probable, y se utiliza la curva corregida de ahora en adelante.



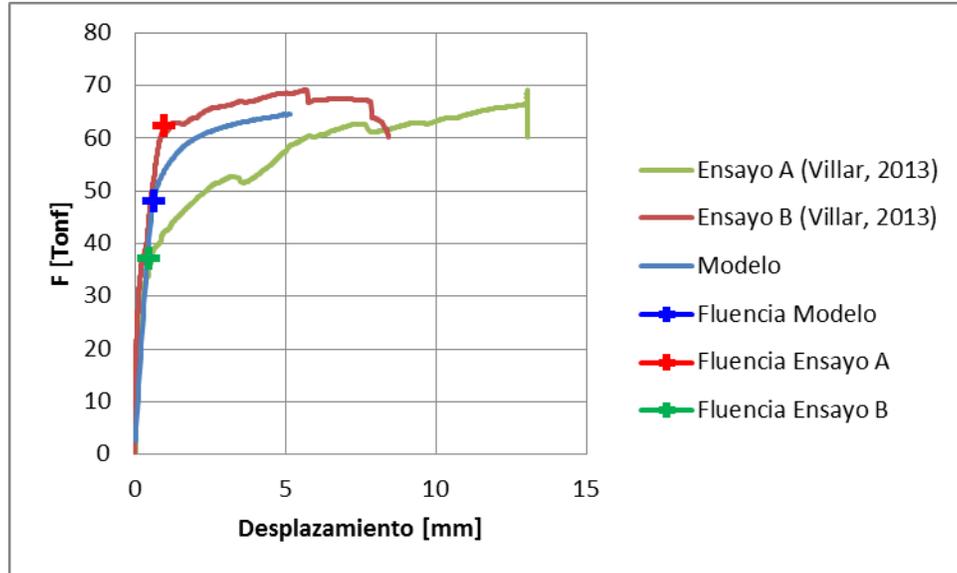
**Figura 132 Respuesta F vs. Desplazamiento Llave 1 Corregida**

**Tabla 37 Rigidez Llave 1 Eje débil**

	Desp [mm]	F [tonf]	Rigidez [tonf/mm]	Rigidez/Rigidez modelo
<b>Modelo</b>	0,5	28	56	1
<b>Ensayo A</b>	0,3	31,5	105	1,88
<b>Ensayo B</b>	1	34	34	0,6

## Llave 7

La llave n° 7 cargada en el eje débil, cuenta con dos celdas de carga para las dos llaves del ensayo (Llave A y Llave B). Esto permite tener el registro de la carga resistida por cada llave. En este caso, la coordenada vertical "F" representa la carga medida por cada celda de carga.



**Figura 133 Respuesta F vs. Desplazamiento Llave 7**

En la Figura 133 se observa que la respuesta del modelo ANSYS tiene un comportamiento similar al de la llave B del ensayo. Las rigideces iniciales de ambas respuestas son muy cercanas, sin embargo, la respuesta de la llave B presenta una carga de fluencia y una resistencia post fluencia mayor. La respuesta de la llave A presenta una rigidez muy cercana a la obtenida del modelo, pero con carga de fluencia menor. Finalmente, las cargas máximas alcanzadas por ambas llaves del ensayo, y por los modelos son muy similares.

**Tabla 38 Rigidez Llave 7 Eje débil**

	Desp [mm]	F [tonf]	Rigidez [tonf/mm]	Rigidez/Rigidez modelo
<b>Modelo</b>	0,65	48	73,8	1
<b>Ensayo A</b>	1	62,2	62,2	0,84
<b>Ensayo B</b>	0,5	37	74,0	1,00

## Llave 8

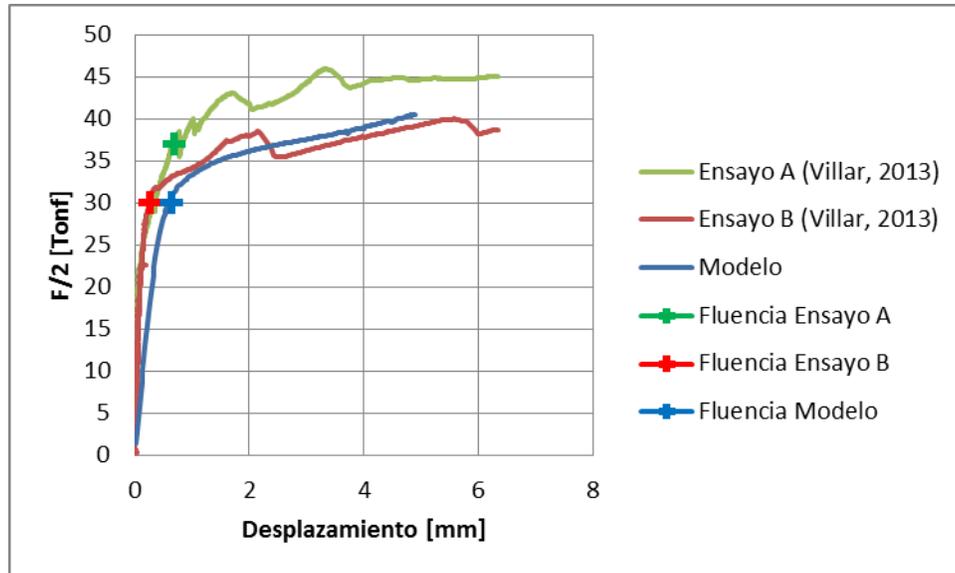


Figura 134 Respuesta F vs. Desplazamiento Llave 8

En la Figura 134 se aprecia que las dos llaves del ensayo 8 tuvieron diferencias en sus respuestas. El ensayo tuvo una rigidez levemente mayor que la obtenida en el modelo ANSYS. Una vez alcanzada la fluencia del sistema, la respuesta de la llave B tiene un buen ajuste con el modelo, mientras que la llave A tuvo una capacidad de unas 5 tonf aproximadamente por sobre la respuesta de la llave B.

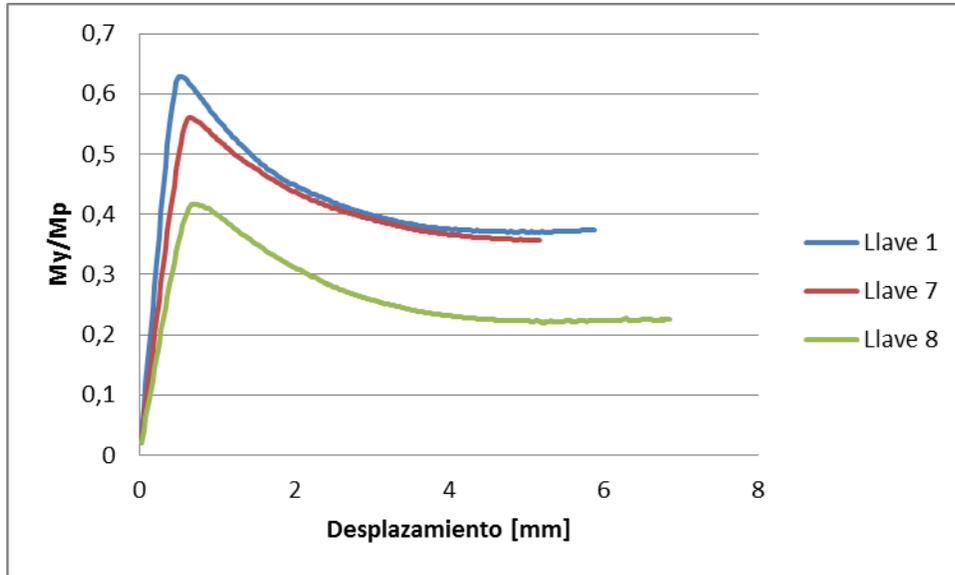
Tabla 39 Rigidez Llave 8 Eje débil

	Desp [mm]	F [tonf]	Rigidez [tonf/mm]	Rigidez/Rigidez modelo
<b>Modelo</b>	0,65	30	46,2	1
<b>Ensayo A</b>	0,70	37	52,9	1,15
<b>Ensayo B</b>	0,28	30	107,1	2,32

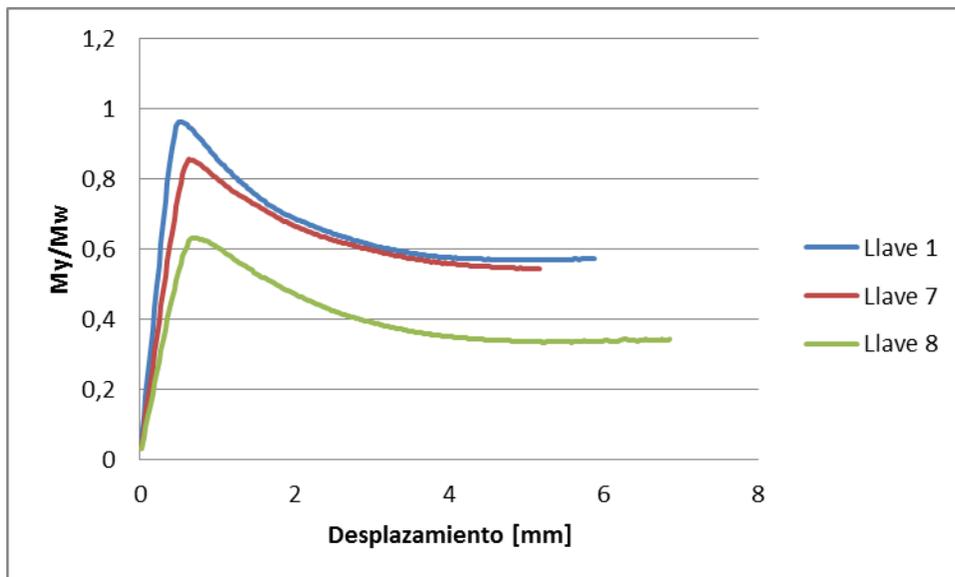
### **Esfuerzos de flexión e la base de la llave conectada a la placa base**

En las Figura 135 y Figura 136 se observa que al igual que en los modelos cargados en el eje fuerte de las llaves, en este caso las flexiones en las llaves nunca superan el momento plástico de la sección, ni el de la primera fluencia. Se observa que el peak de flexión en la base se ubica aproximadamente en un 60%, 58% y 41% del momento plástico ( $M_p$ ) en las llaves 1, 7 y 8 respectivamente. Por otro lado, con respecto al momento de la primera fluencia ( $M_w$ ), esta se ubica cercana al 100%, 85% y 62% para las llaves 1, 7 y 8.

Según esto, se aprecia que si la llave de corte actuara como una viga en voladizo, como lo indican las normas de diseño, la base conectada de las llaves modeladas no alcanzaría la plastificación. Sin embargo los modelos revelaron que esta cara se plastifica completamente.



**Figura 135 Esfuerzos de flexión vs desplazamiento, eje débil**



**Figura 136 Esfuerzos de flexión vs desplazamiento, eje débil**

***Resumen de resultados de llaves cargadas en el eje débil***

Al igual que en el caso de los modelos cargados en el eje fuerte de las llave, en este caso no se alcanzan los momentos plásticos en ninguna de las llaves evaluadas. Como es de esperarse, el momento flector en las llaves cargadas en el eje débil es bastante más cercano al momento de la primera fluencia ( $M_w$ ) que en el caso de las llaves cargadas en su eje fuerte. Se puede notar que en el caso de la llave n°1 el momento flector casi alcanza el momento de la primera fluencia.

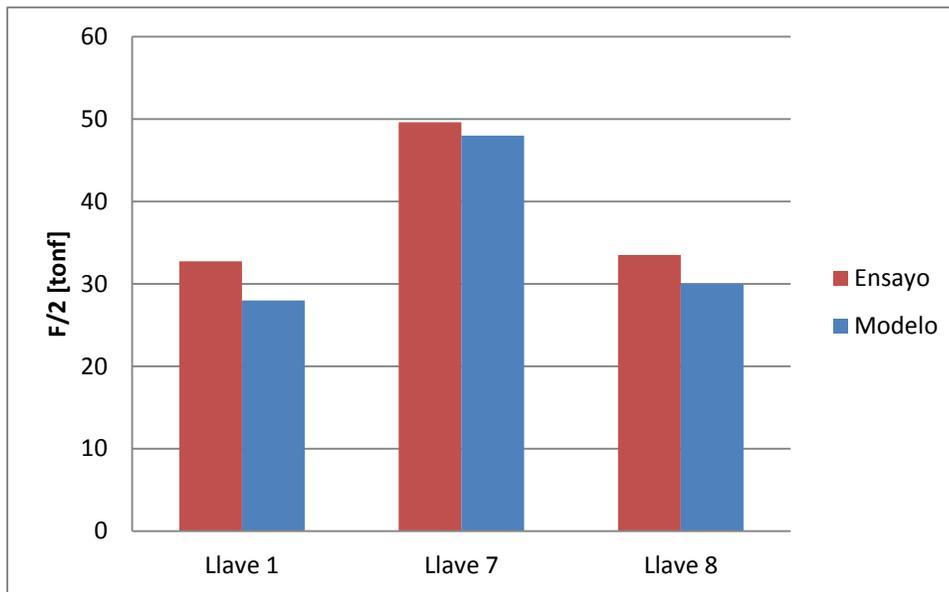
## Rigidez

A continuación se presenta un resumen de las razones de las rigideces promedios de los ensayos y de los modelos ANSYS.

**Tabla 40 Resumen razón rigidez ensayo/rigidez modelo eje débil**

Llave n°	Razón llave A	Razón llave B
1	1,88	0,61
7	0,84	1,00
8	1,15	2,32

Se observa una gran diferencia en las rigideces de las llaves de un mismo ensayo, siendo la llave 8 la que presenta la mayor diferencia. En la Figura 137 se aprecia que la carga de fluencia promedio de los ensayos es muy similar a la carga de fluencia de los modelos en todas las llaves, lo que indica que la diferencia de rigidez viene dada por una diferencia en la deformación a la que comienza la fluencia.



**Figura 137 Comparación carga fluencia ensayo vs modelos**

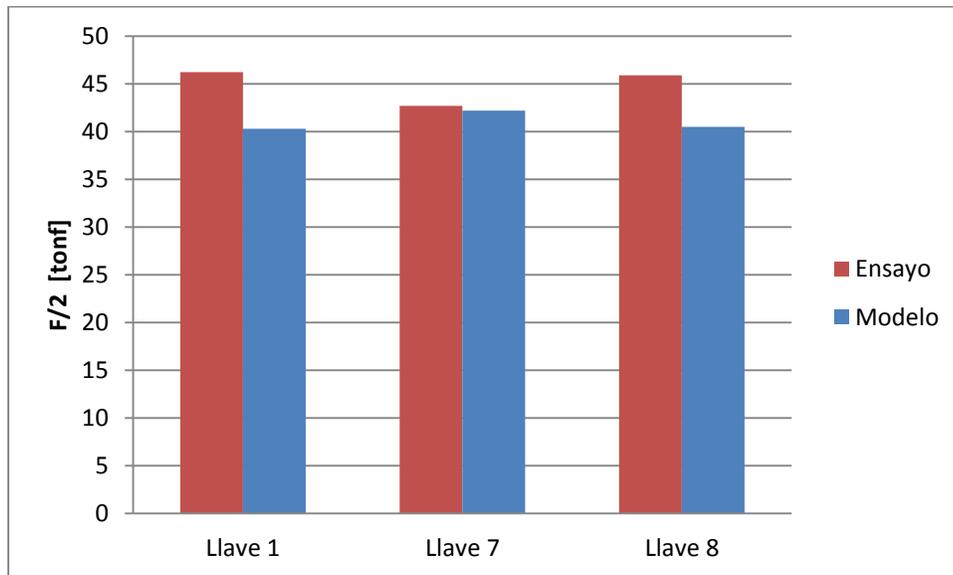
## Capacidades máximas

**Tabla 41 Cargas máximas Eje débil**

Llave	MODELO		ENSAYO		
	Carga máxima [tonf]	Desplazamiento [mm]	Carga máxima [tonf]	Carga al fin del modelo [tonf]	
1	40,3	5,88	46,2	46	99,6%
7	42,2	5	42,7	38,1	89,2%
8	40,5	4,9	45,9	39,5	86,1%

La Tabla 41 resume las capacidades máximas obtenidas en los modelos ANSYS, correspondiente al último estado de carga, y las capacidades máximas en los ensayos, y las cargas obtenidas en éstos cuando se llega a la última deformación de los modelos. Se puede notar que estos dos últimos valores son bastante cercanos.

Al comparar las capacidades máximas con las cargas obtenidas en los ensayos a la última deformación de los modelos (Figura 138), se ve que los valores se acercan bastante.



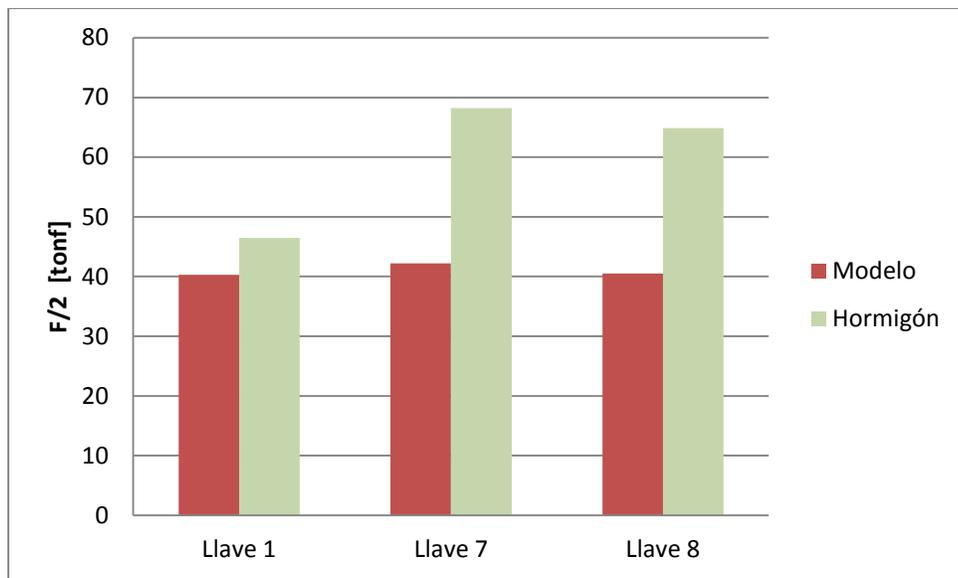
**Figura 138 Carga máxima ensayo vs modelo Eje débil**

### Capacidades nominales

En la Tabla 42 se resumen las capacidades nominales determinadas en el capítulo 3 para llaves cargadas en el eje débil. Se incluyen las capacidades máximas considerando una falla por aplastamiento del hormigón, y una falla por fluencia del acero de la llave de corte, por solicitaciones de corte y de flexión.

**Tabla 42 Capacidades nominales Eje débil**

Llave	V hormigón [tonf]	V acero por corte [tonf]		V acero por flexión [tonf]
		Fluencia en el alma	Fluencia completa	
1	46	9	29	17
7	68	14	50	35
8	65	8	28	19



**Figura 139 Comparación capacidad máxima modelos vs capacidad nominal por aplastamiento hormigón, eje débil**

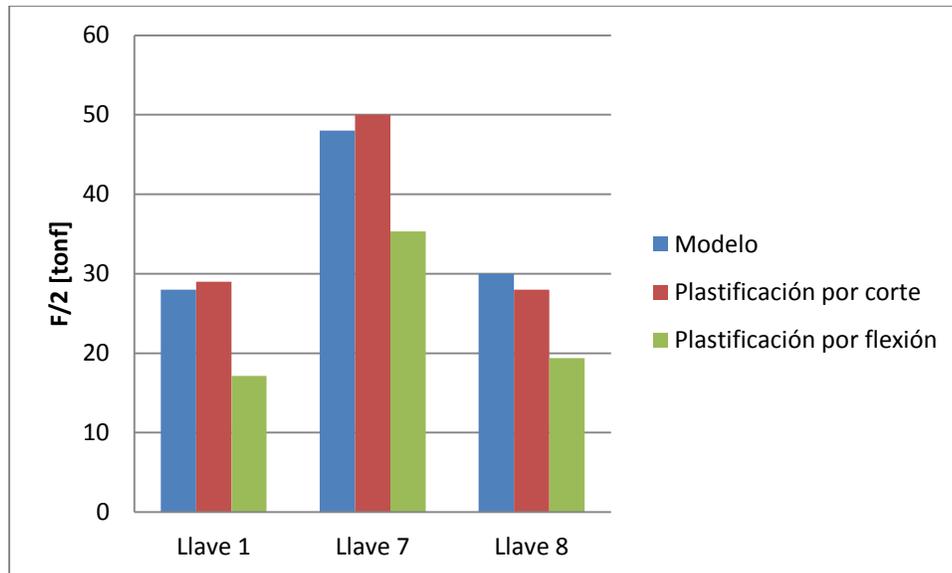
Al comparar la capacidad máxima de los ensayos con la capacidad máxima del hormigón, se observa que en el caso de las llaves 2 y 3 esta última es bastante superior a la carga máxima alcanzada por las llaves ensayadas.



**Figura 140 Zona de rotura hormigón llave de corte 1A y 1B (Villar, 2013)**

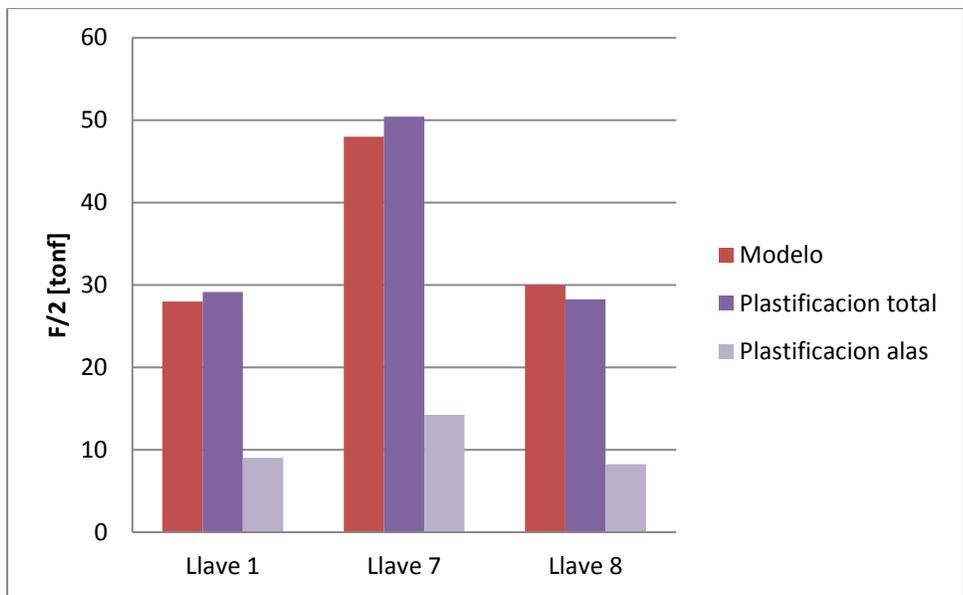
En el caso de la llave 1, los valores de las cargas son prácticamente las mismas. Esto coincide con observaciones reportadas por Villar sobre una falla cónica en el hormigón en la zona de casilla (Figura 140).

La Figura 141 revela que la carga de plastificación de la sección transversal completa de la llave es considerablemente menor que la fluencia identificada en los modelos (diferencia de 11, 13 y 11 tonf para las llaves 1, 7 y 8 respectivamente). Por otro lado, la carga de plastificación por corte es cercana a la fluencia del modelo, lo que indica que este último se encuentra ligado a los esfuerzos de corte en la llave, y no a la flexión.



**Figura 141 Comparación fluencia modelo vs capacidades nominales acero, eje débil**

En la Figura 142, se observa que la plastificación de las alas por corte ocurre mucho antes que la fluencia del sistema, identificada en los ensayos y en los modelos. La plastificación completa de la sección, por otro lado, se encuentra unas pocas toneladas por debajo de las fluencias identificadas para las llaves 1 y 8, y con cargas muy parecidas en la llave 7. Estas observaciones coinciden con el comportamiento general del sistema descrito en el capítulo 5. Una vez que la sección de la llave se ha plastificado en toda su área en contacto con la placa base, comienza a fluir parte de las alas por debajo de esta superficie, marcando esto el fin del tramo lineal de la respuesta general del sistema.



**Figura 142 Comparación carga de fluencia modelos vs capacidad nominal por plastificación acero por corte, eje débil**

## 6.2. Comentarios

Existe una alta variación entre los valores de las rigideces de las probetas ensayadas, y éstas tienen, en general, una rigidez mayor a los modelos ANSYS. Sin embargo, hay un buen ajuste de las cargas de fluencia. Como ya se ha nombrado, la diferencia en las rigideces sugiere que existe un aporte adicional en el tramo lineal de la respuesta de la estructura, que no se ha considerado en los modelos. Se ha estimado que el aporte de los pernos de anclaje a la rigidez del sistema puede alcanzar hasta un 20% de ésta, lo que hace necesario considerar otros factores, como la subestimación de las propiedades mecánicas de los materiales, o diferencias entre la instalación ensayada y la modelada. Sin embargo, las modelaciones tienen un buen ajuste con lo ensayado en el rango no lineal de respuesta lo que nos permite la utilización de éstos para el análisis de los modos de falla, y del estado tensional en la llave.

La carga de fluencia general del sistema es muy cercana a la carga de plastificación de la sección transversal completa de la llave. Una vez alcanzado el límite lineal, se observa en general un buen ajuste en la respuesta de la estructura modelada, en relación a los ensayos. Además, se observa que la capacidad máxima alcanzada por las llaves ensayadas coincide con la carga resistida por la llave modelada en el último estado de carga. Esto tiene relación con la carga máxima que permite estabilidad en el modelo tal que éste converja.

Las capacidades máximas medidas en los ensayos y obtenidas de los modelos son en general bastante menores a la capacidad nominal del hormigón. Según lo analizado anteriormente, existe aplastamiento y fisuras locales en el bloque, pero los resultados del modelo reflejan que ocurre primero una falla dúctil por fluencia en la llave de acero, antes que una falla general en el bloque de hormigón.

Finalmente, se compara la fluencia general del sistema con las capacidades nominales de la llave de acero, considerando una plastificación por esfuerzo de corte, y por flexión. En los modelos con las cargas aplicadas en el eje fuerte se observa que los valores de la capacidad por flexión son bastante cercanos a la carga de fluencia del sistema, superando por poco a este último en las llaves 1 y 8. Mientras que en los modelos con carga aplicada en el eje débil, se observa que el valor de carga de plastificación por flexión es aproximadamente 10 tonf menor que la carga de fluencia del sistema. La resistencia por plastificación debido a la flexión en la llave es menor, sin embargo, como se concluye en el capítulo 5, los esfuerzos normales en Z aportan poco a la plastificación de la llave.

## Capítulo 7: Conclusiones y comentarios

En este capítulo se presentan las conclusiones finales del trabajo realizado. Además se comentan las limitaciones de éste y recomendaciones para futuros trabajos.

Una vez finalizado el análisis de los modelos de las tres llaves de corte cargadas en su eje fuerte, y tres llaves de cargadas en su eje débil, es posible rescatar varias conclusiones:

El programa de elementos finitos es una herramienta eficiente y útil para analizar estructuras como la de este trabajo. Sin embargo, es importante tener conciencia sobre las limitaciones y complejidades de éste. Los modelos realizados en ANSYS proporcionan información relevante, para los objetivos de este trabajo, dando resultados de forma numérica y visual.

En este trabajo se modelan tres llaves cargadas en su eje fuerte, y tres llaves cargadas en su eje débil. Las geometrías de las llaves modeladas se basan en los ensayos experimentales realizados por Silva (Silva, 2012) y Villar (Villar, 2013), con el fin de reproducir los ensayos realizados, y obtener información que no es posible adquirir experimentalmente, como por ejemplo, distribución de deformaciones y tensiones en toda la llave.

Para reproducir los ensayos fue necesario un proceso de calibración para determinar parámetros desconocidos. De este proceso se determinaron las formulaciones consideradas de los materiales, y el coeficiente de fricción. Finalmente se obtienen valores adecuados, dentro de lo esperado y que logran un ajuste aceptable con las respuestas experimentales la mayoría de las llaves. La tensión de fluencia del acero y la capacidad a la compresión del hormigón se obtienen de los ensayos realizados a los materiales por Silva y Villar.

### ***Modelos con desplazamiento aplicado en dirección del eje fuerte de la llave:***

Al aplicar carga sobre la placa base, comienza una respuesta lineal que finaliza en menos de dos de milímetros de desplazamiento de la placa con respecto al bloque. Rápidamente comienza la plastificación de la sección de la llave en contacto con la placa base. Ésta comienza en la base conectada a la placa, en las alas de la llave, y se propaga por toda la superficie. Mientras tanto, el grout comprimido en contacto con las alas comienza a aplastarse, seguido por el hormigón. La plastificación de la sección de la llave se propaga al alma, hasta algunos centímetros por debajo de la placa base. Este último evento marca el fin del tramo lineal inicial de la respuesta general del sistema.

### ***Modelos con desplazamiento aplicado en dirección del eje débil de la llave:***

Al igual que en el caso descrito anteriormente, el sistema comienza con un tramo lineal, de alta rigidez. Apenas la placa base comienza a deslizarse sobre el grout, el acero de la llave de corte comienza a plastificarse en las cuatro puntas de las alas. Casi al mismo tiempo, hay aplastamiento del grout en compresión ubicado entre las alas del perfil, y luego del hormigón. Por último, se propaga la plastificación del acero, por toda la superficie del perfil en el plano en contacto con la placa, y se expande hasta un par de centímetros por debajo, en las alas. Este último evento marca la fluencia del sistema.

### ***Tensiones en la llave de corte:***

El análisis de tensiones deja en evidencia que la plastificación de la llave se debe a los esfuerzos de corte, y que la flexión tendría poca participación en ésta. El fin del tramo lineal en las respuestas de las llaves cargadas en el eje fuerte, está marcada por la plastificación de parte del alma. Mientras que en las llaves cargadas en su eje débil, el límite lineal está marcado por la plastificación de las alas. Una vez alcanzado el límite elástico, las llaves incursionan en el rango no lineal, resultando en grandes deformaciones. El hormigón en compresión se aplasta y en tracción se fisura, causando el colapso final de la estructura.

### ***Deformaciones en la llave de corte:***

La deformación observada en los modelos coincide con la obtenida en los ensayos experimentales. El segmento de la llave embebido en el bloque de hormigón casi no presenta deformaciones, y a partir de la altura que está por sobre el bloque, embebida en el grout, la llave presenta una inclinación, alcanzando su mayor deformación en la base de la llave, conectada a la placa. Esta deformación coincide con una falla por plastificación por corte.

Finalmente, todo lo anterior permite confirmar que el modo de falla predominante en la llave de corte corresponde a una plastificación en la sección transversal, debido a los esfuerzos de corte. Esto descarta el modo de falla asociado a la flexión, asumido por las normas de diseño, descartando también que la llave se comporte como una viga en cantiléver.

### ***Limitaciones de este trabajo:***

Las principales limitaciones de este trabajo están relacionadas a las simplificaciones realizadas en la modelación de las llaves.

- El comportamiento asignado a los materiales en los modelos corresponde a una simplificación de la realidad. En primer lugar, no se considera la pérdida de resistencia del hormigón por aplastamiento, ni

la fisuración de éste. En segundo lugar, se considera una curva tensión deformación bilineal para el acero, sin llegar a la rotura del material

- No se considera el refuerzo de las barras de acero en el bloque de hormigón. Este confiere resistencia a la tracción y confinamiento al hormigón.
- Los modelos son realizados considerando un desplazamiento constante, aplicado sobre la llave. No se considera el efecto de una sollicitación cíclica.
- Por último, no se estuvo presente en la elaboración de los ensayos de las llaves de corte ya que este correspondía a un trabajo anterior. Se considera que la presencia de los ensayos pudo haber aportado antecedentes relevantes para el análisis de los modelos.

## Bibliografía

- European Committee for Standardization. (1992). *Eurocode 2: Design of Concrete Structures*. Bruselas.
- ACI 318-08. (2008). *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*. EE.UU: American Concrete Institute.
- ACI 349-01. (2001). *Code Requirements for Nuclear Safety Related Concrete Structures*. EE.UU: American Concrete Institute.
- Aguirre, C. (2009). Non linear behaviour of shear lugs and steel buidings 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*. EE.UU: American Institute of Steel Construction.
- AISC. (2006). *Steel Design Guide N°1: Base Plate and Anchor Rod Design*. EE.UU: American Institute of Steel Construction.
- AISC. (2010). *Seismic Proviton for Steel Buildings*. EE.UU: American Institute of Steel Construction.
- AISC. (Specification for Steel Construction). *2010*. EE.UU: American Institute of Steel Construction.
- ANSYS. (2012). Workbench Version 14.0 on-line user's manual.
- CEN. (2004). *Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1 : General*. Bruselas.
- Hognestad, H. E. (1955). Concrete stress distribution in ultimate strength design. In ACI, *ACI Journal Proceedings* (Vol. 52, pp. 455-479). EE.UU: American Concrete Institute.
- ICHA. (2000). *Manual de Diseño para Estructuras de Acero*. Chile: Instituto Chileno de Acero.
- INN. (2003). *NCh 2369 Of. 2003: Diseño Sísmico de Estructuras e Instalaciones Industriales*. Chile: Instituto Nacional de Normalización.

- Nuñez, O. (2014). *Estudio Numérico de Llave de Corte de Acero en Cruz para Placas Base de Columnas*. Santiago: Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
- Palma, I. (2008). *Estudio Experimental de Llaves de Corte en Cruz*. Chile: Tesis para postular al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería Civil. Universidad Federico Santa María.
- Popovics. (1973). *A Numerical approach to the complete stress strain curve for concrete*. Cement and concrete research.
- Rotz, & Reifschneider. (1989). Combined Axial and Shear Capacity of Embedments in Concrete". *10th International Conference, Structural Mechanics in Reactor Technology*.
- Silva, J. (2012). *Estudio Experimental de Llaves de Corte en "I"*. Valparaíso: Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad Federico Santa María.
- Villar, E. (2013). *Estudio Experimental de Llaves de Corte en H*. Chile: Memoria para postular al título de Ingeniero Civil.