

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL



TESIS

**“ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE LAS LOSAS CON
PLACA COLABORANTE EN TÉRMINOS DE PARÁMETROS
GEOMÉTRICOS Y MECÁNICOS”**

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

ELABORADO POR

JEAN JAIRO CUEVA RIVERA

ASESOR

Dr. MIGUEL AUGUSTO DIAZ FIGUEROA

LIMA- PERÚ

2019

© 2019, Universidad Nacional de Ingeniería. Todos los derechos reservados

**“El autor autoriza a la UNI a reproducir la tesis en su totalidad o en parte,
con fines estrictamente académicos.”**

Cueva Rivera, Jean Jairo

jcuevar@uni.pe

950187021

DEDICATORIA

A mis padres, Simeon Cueva y Matilde Rivera, por su apoyo incondicional y por ser parte de mi formación personal y profesional; asimismo a mis hermanos, Lindy, Brener y Meidy, que fueron parte de mi motivación en la elaboración de esta tesis.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, un agradecimiento especial a mi asesor, el Dr. Miguel Diaz Figueroa, por su valiosa guía y sugerencias en la elaboración de esta tesis. De igual modo, a mis amigos del Laboratorio de Estructuras del CISMID, Luis Lavado, André Muñoz, Julian Palacios, Erika Flores, Larry Cárdenas y Germán Bautista, por su apoyo en el desarrollo de esta investigación y por las recomendaciones brindadas durante la etapa experimental. Asimismo, al Sr. Rollin Buse, representante de la empresa Aceros Procesados S.A., por auspiciar e impulsar este proyecto de investigación.

ÍNDICE

RESUMEN	7
ABSTRACT	8
PRÓLOGO	9
LISTA DE TABLAS	11
LISTA DE FIGURAS	12
LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS	17
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	20
1.1 GENERALIDADES.....	20
1.2 PROBLEMÁTICA	21
1.3 OBJETIVOS.....	22
1.3.1 Objetivo general.....	22
1.3.2 Objetivos específicos	23
1.4 HIPÓTESIS.....	23
1.4.1 Hipótesis general	23
1.4.2 Hipótesis específicas.	23
CAPÍTULO II. FUNDAMENTO TEÓRICO	24
2.1 Definición de la losa compuesta.....	24
2.1.1 Ventajas.....	24
2.1.2 Elementos de losa compuesta	24
2.1.2.1 Placa colaborante	25
2.1.2.2 Concreto	29
2.1.2.3 Malla de temperatura	29
2.1.2.4 Conectores de corte.....	29
2.1.3 Descripción de las placas colaborantes en estudio	30
2.2 Descripción del sistema constructivo	31
2.2.1 Ingeniería de detalles.....	31
2.2.2 Transporte	31
2.2.3 Almacenamiento	31
2.2.4 Izaje	32
2.2.5 Montaje de la placa colaborante.....	32
2.2.6 Instalación de los conectores de corte	32
2.2.7 Fijación	32
2.2.8 Ubicación Acero de refuerzo	33

2.2.9	Malla de temperatura	33
2.2.10	Vaciado de concreto	33
2.2.11	Curado del concreto.....	34
2.2.12	Desapuntalamiento	34
2.3	Análisis teórico de la losa compuesta.....	34
2.3.1	Mecanismos de interacción.....	34
2.3.1.1	Adherencia química	35
2.3.1.2	Adherencia mecánica proporcionada por las muescas	35
2.3.1.3	Adherencia mecánica debido a la fricción	35
2.3.1.4	Anclaje mecánico en los puntos de apoyo de la losa	36
2.3.2	Grado de interacción.....	36
2.3.2.1	Interacción total.....	37
2.3.2.2	Interacción parcial	37
2.3.2.3	Interacción nula.....	37
2.3.3	Tipos de comportamiento.....	38
2.3.4	Mecanismos principales de falla.....	39
2.3.4.1	Falla por flexión.....	40
2.3.4.2	Falla por deslizamiento longitudinal	40
2.3.4.3	Falla por corte vertical.....	41
2.3.4.4	Representación gráfica de los modos de falla	41
2.3.5	Métodos para calcular el esfuerzo cortante por adherencia mecánica .	42
2.3.5.1	Ensayos de adherencia por corte directo	42
2.3.5.2	Métodos basados en ensayos a flexión.....	44
2.3.6	Diseño de losa con placa colaborante.....	50
2.3.6.1	Estado No compuesto.....	50
2.3.6.2	Estado compuesto	51
2.3.6.3	Resistencia a flexión de la losa	52
2.3.6.4	Resistencia al corte vertical.....	53
CAPÍTULO III. ESTUDIO EXPERIMENTAL		54
3.1	Ensayo a flexión.....	54
3.1.1	Descripción del ensayo	54
3.1.2	Descripción de los especímenes.....	55
3.1.3	Sistema de carga y medición	59
3.1.3.1	Equipos.....	59

3.1.3.2	Instrumentación del espécimen.....	61
3.1.4	Resultados.....	62
3.2	Medición de desplazamientos relativos.....	65
3.2.1	Descripción de la medición.....	65
3.2.2	Ubicación de los Transductores de medición.....	67
3.2.3	Resultados.....	68
3.3	Ensayos de los materiales.....	76
3.3.1	Concreto.....	76
3.3.2	Lámina de acero.....	78
CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....		80
4.1	Ensayo a flexión.....	80
4.2	Delimitación del estado de servicio.....	86
4.3	Método de diseño propuesto.....	90
4.4	Esfuerzo resistente al corte por adherencia mecánica.....	102
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		109
5.1	Conclusiones.....	109
5.2	Recomendaciones.....	112
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		114
ANEXO A. PANEL FOTOGRÁFICO.....		116
ANEXO B. ENSAYOS DE FLEXIÓN ESTÁTICA (M. DIAZ, 2009).....		120
ANEXO C. DESPLAZAMIENTO EN EL EXTREMO DE LA LOSA.....		126

RESUMEN

El comportamiento de la losa compuesta está condicionado, principalmente, por la interacción que existe entre el concreto y la placa colaborante, la conexión entre estos dos elementos es proporcionada por la adherencia química y mecánica que existe en la interfaz de los materiales que conforman la losa compuesta. Para el estudio de esta propiedad se han realizado una serie de ensayos a escala natural, como los ensayos a flexión, para identificar principalmente la carga de desprendimiento, que está directamente relacionada a la resistencia al corte longitudinal de la losa y que puede ser apreciada en la historia del comportamiento frente a cargas de flexión. Asimismo, se han realizado ensayos de corte directo longitudinal (Pull-out) en porciones de losa para poder cuantificar la adherencia a través de la carga máxima aplicada en la interfaz.

El estudio de la resistencia al corte longitudinal resulta ser muy importante, pues en la mayoría de casos, las condiciones geométricas de la sección y la esbeltez de la losa conllevan a este tipo de falla. Por ello esta investigación se encarga en estudiar a detalle esta condición de falla, a partir de los resultados experimentales previos y con nuevos especímenes construidos, con la finalidad de cubrir la mayor cantidad de situaciones posibles. Los resultados de los ensayos, como la carga de desprendimiento y la deflexión en la que ocurre, permite establecer una nueva relación entre la carga de desprendimiento, los parámetros geométricos y mecánicos. Esta nueva relación se aplica a cada uno de los perfiles de placa colaborante en estudio, y poder validar esta formulación como una propuesta alternativa al "Método m y k", que permita calcular la carga de desprendimiento y de funcionalidad, pues estos valores son útiles para la verificación y diseño de este tipo de losas.

Adicionalmente se presenta un estudio relacionado al esfuerzo cortante longitudinal, que se obtuvo a partir de los desplazamientos relativos, entre el concreto y la placa colaborante, medidos en el extremo de la losa y de manera simultánea al ensayo a flexión. El esfuerzo cortante longitudinal se determina a partir de métodos analíticos y ayuda a entender mejor el comportamiento de las losas compuestas y como se alcanza el punto de desprendimiento.

ABSTRACT

The behavior of the composite slab is conditioned, mainly, to the interaction that exists between the concrete and the steel deck, the shear connection between these two materials is provided by the chemical and mechanical adherence that exists at the interface of the materials that make up the slab. For the study of this property, a series of full-scale slab tests have been carried out, such as bending tests to identify the slipping load, which is directly related to the shear bond strength of the slab and which can be seen in the history of behavior under bending loads. Likewise, longitudinal direct shear tests (Pull-out) have been carried out on pieces of the slab to quantify the adherence through the maximum load applied at the interface.

The study of the shear bond strength is very important because in most cases, the geometric conditions of the section and the slenderness of the slab will lead to this type of failure. For this reason, this research will be in charge of studying this failure condition, based on previously full-scale slab tests and new constructed specimens, in order to cover as many situations as possible. The results of the tests, such as the slipping load and the deflection in which it occurs, will allow establishing a new relationship between the slipping load, the geometric and mechanical parameters. This new relationship will be carried out for each of the steel deck profiles under study and this formulation will be validated as an alternative proposal to the "*m y k method*", which allows calculating the slipping and functionality load because these values are very useful for the verification and design of this type of composite slabs.

Additionally, a study related to the shear bond stress will be presented, which was obtained from the relative displacements, between the concrete and the steel deck, measured at the end of the slab and simultaneously to the bending test. The shear bond stress will be determined from analytical methods and will help to better understand the behavior of the slabs and how to reach the point of slipping.

PRÓLOGO

En este trabajo, el autor ha realizado la caracterización de las losas compuestas con placa colaborante de un fabricante nacional, que hasta la fecha ha suministrado a gran parte del sector construcción del país. La caracterización de este tipo de losas ha sido realizada utilizando parámetros geométricos y mecánicos, considerando las curvas de comportamiento obtenidas a partir de los ensayos de flexión realizados en losas compuestas con placa colaborante, con el fin de proponer una formulación que permita mejorar el cálculo de la resistencia a flexión de las placas colaborantes. Es importante mencionar que, en los estudios experimentales realizados en este tipo de losas se ha observado que su comportamiento está regido principalmente por la carga de desprendimiento del perfil de acero respecto al concreto.

De manera similar a las varillas de acero de refuerzo del concreto armado, la placa colaborante presenta relieves o hendiduras denominadas muescas, que son el principal mecanismo de adherencia mecánica entre la placa de acero y el concreto. En este sentido, es importante estudiarlo experimentalmente debido a que, de perfil a perfil, y de fabricante a fabricante, las muescas varían de geometría y configuración sobre la placa de acero.

Para poder caracterizar la carga de desprendimiento, los parámetros geométricos y mecánicos, el autor ha realizado una serie de ensayos de flexión en losas con placa colaborante considerando tres tipos de perfiles con calibre 18 (1.204 mm), tres espesores de losa y tres luces libres, que sumado a ensayos de flexión recopilados en losas con los mismos perfiles de placa colaborante en calibres 20 (0.909 mm) y 22 (0.749 mm), resultan en una sólida base de datos que es de utilidad para validar las hipótesis planteadas en la presente tesis.

Con el objetivo de mejorar las formulaciones existentes para la determinación de las cargas de desprendimiento, el autor ha desarrollado una serie de análisis de los resultados experimentales, como aplicación de métodos analíticos y simplificaciones en las hipótesis de interacción entre el concreto y la placa de acero, agrupación de parámetros para diferenciar los tipos de comportamiento entre las losas con diferentes características como perfil, calibre de perfil, luz libre y espesor de concreto.

Como resultado de los análisis de los diferentes parámetros geométricos y mecánicos, se ha obtenido un factor de reducción asociada al desprendimiento para que sea incorporado en la formulación propuesta en esta tesis como nuevo método de cálculo, que mejora el método existente denominado “m-k”, el cual fue calibrado en una tesis predecesora para estos mismos tipos de perfil (M. Diaz, 2009). En consecuencia, el método propuesto no sólo calcula de una manera más aproximada la resistencia de adherencia o carga de desprendimiento, sino lo hace de una manera generalizada, considerando criterios de funcionalidad del sistema como losa compuesta.

Por lo expuesto, se considera que el autor proporciona conclusiones sumamente útiles para ser compartidas con la comunidad científica y profesionales relacionados con el diseño y uso de losas compuestas con placa colaborante, y a la vez ha identificado posibles temas para investigaciones futuras.

Miguel Augusto Díaz Figueroa
Asesor de la tesis

LISTA DE TABLAS

Tabla Nº 2.1 Designación de revestimiento de galvanizado para la prueba en 3 puntos.....	25
Tabla Nº 2.2 Espesores de la lámina de acero para la placa colaborante.....	26
Tabla Nº 2.3 Factores mínimos de hendiduras (muescas).....	27
Tabla Nº 3.1 Propiedades físicas de los agregados.....	56
Tabla Nº 3.2 Características de las losas con el Perfil AD-730.....	56
Tabla Nº 3.3 Características de las losas con el Perfil AD-600.....	57
Tabla Nº 3.4 Descripción de los canales.....	61
Tabla Nº 3.5 Listado de los vaciados realizados.....	76
Tabla Nº 3.6 Resistencia a compresión del concreto.....	78
Tabla Nº 3.7 Resultado de los ensayos a tracción.....	79
Tabla Nº 4.1 Resultados del tipo de comportamiento para el perfil AD-730.....	81
Tabla Nº 4.2 Resultados del tipo de comportamiento para el perfil AD-600.....	82
Tabla Nº 4.3 Resultados del tipo de comportamiento de los 35 especímenes... ..	83
Tabla Nº 4.4 Parámetros “m” y “k” para cada tipo de perfil.....	91
Tabla Nº 4.5 Porcentaje de reducción según el tipo de perfil.....	96
Tabla Nº 4.6 Límites de las losas esbeltas y compactas para cada perfil.....	96
Tabla Nº 4.7 Parámetros del nuevo método propuesto.....	98
Tabla Nº 4.8. Resultados del esfuerzo resistente al corte por adherencia a partir del ensayo a flexión.....	107
Tabla Nº 4.9. Resultados del ensayo de adherencia.....	107

LISTA DE FIGURAS

Figura N° 2.1 Componentes de la losa con placa colaborante.....	25
Figura N° 2.2 Muestras Tipo 1.....	27
Figura N° 2.3 Muestras Tipo 2.....	28
Figura N° 2.4 Muestras Tipo 3.....	28
Figura N° 2.5 Detalle de la sección transversal de las muescas.....	28
Figura N° 2.6 Dimensiones del Perfil AD-900 (mm).....	30
Figura N° 2.7 Dimensiones del perfil AD-600 (mm).....	30
Figura N° 2.8 Dimensiones del perfil AD-730 (mm).....	30
Figura N° 2.9 Distribución de muescas.....	35
Figura N° 2.10 Adherencia por fricción.....	36
Figura N° 2.11 Conectores de corte.....	36
Figura N° 2.12 Comportamiento de la losa compuesta según el grado de interacción.....	38
Figura N° 2.13 Comportamiento de las losas con placa colaborante.....	39
Figura N° 2.14 Mecanismos principales de falla de las losas con placa colaborante.....	39
Figura N° 2.15 Liberación longitudinal en el extremo de la losa.....	40
Figura N° 2.16 Separación vertical en el extremo de la losa.....	41
Figura N° 2.17 Curva de resistencia y modos de falla.....	42
Figura N° 2.18 Ensayo push-out propuesto por Schuster (1970).....	43
Figura N° 2.19 Ensayo pull-out propuesto por Daniels (1988).....	43
Figura N° 2.20 Esquema para determinar los parámetros m y k.....	45
Figura N° 2.21 Grieta diagonal en la losa.....	46
Figura N° 2.22 Fuerza longitudinal en toda la luz rasante.....	46
Figura N° 2.23 Gráfica típica del desplazamiento relativo vs carga aplicada para una losa compacta y esbelta.....	47
Figura N° 2.24 Condición de la losa al inicio del desplazamiento relativo.....	48
Figura N° 2.25 Deflexión y curvatura de la placa colaborante.....	50
Figura N° 2.26 Área efectiva de corte del concreto.....	53
Figura N° 2.27 Superposición de las áreas efectivas de corte.....	53
Figura N° 3.1 Ensayo a flexión de losas con placa colaborante.....	55
Figura N° 3.2 Pruebas realizadas a los agregados.....	56
Figura N° 3.3 Almacenamiento de la placa colaborante.....	58
Figura N° 3.4 Nivelación de la superficie de terreno.....	58

Figura N° 3.5 Encofrado lateral.....	58
Figura N° 3.6 Malla de temperatura.....	58
Figura N° 3.7 Preparación del concreto.....	58
Figura N° 3.8 Vaciado del concreto.....	58
Figura N° 3.9 Probetas de concreto.....	58
Figura N° 3.10 Aplicación de curador químico.....	58
Figura N° 3.11 Ubicación de la losa para el ensayo a flexión.....	59
Figura N° 3.12 Programa usado para la adquisición de datos.....	60
Figura N° 3.13 Distribución de los equipos en el ensayo a flexión.....	61
Figura N° 3.14 Ubicación de los transductores (canales).....	61
Figura N° 3.15 Ensayo a flexión de las losas con placa colaborante.....	62
Figura N° 3.16 Ensayo de flexión de los especímenes L-001, L-004 y L-007 con altura de losa (t) 146, 172 y 204 mm respectivamente.....	63
Figura N° 3.17 Ensayo de flexión de los especímenes L-002, L-005 y L-008 con altura de losa (t) 147, 174 y 203 mm respectivamente.....	63
Figura N° 3.18 Ensayo de flexión de los especímenes L-003, L-006 y L-009 con altura de losa (t) 145, 170 y 203 mm respectivamente.....	64
Figura N° 3.19 Ensayo de flexión de los especímenes L-010, L-012 y L-014 con altura de losa (t) 113, 133 y 153 mm respectivamente.....	64
Figura N° 3.20 Ensayo de flexión de los especímenes L-011, L-013 y L-015 con altura de losa (t) 115, 136 y 155 mm respectivamente.....	65
Figura N° 3.21 Habilitación de los ángulos de aluminio.....	66
Figura N° 3.22 Orientar correctamente los transductores para la medición.....	66
Figura N° 3.23 Aplicación del pegamento en la plancha metálica.....	66
Figura N° 3.24 Fijación de la plancha metálica en la cara lateral de la losa.....	66
Figura N° 3.25 Aplicación del pegamento en el ángulo de aluminio.....	66
Figura N° 3.26 Fijación de los ángulos de aluminio en la placa colaborante.....	66
Figura N° 3.27 Instrumentación para la medición de los desplazamientos relativos.....	67
Figura N° 3.28 Posición inicial del Transductor de desplazamiento (LVDT).....	67
Figura N° 3.29 Distribución de transductores en losas con el Perfil AD-600.....	68
Figura N° 3.30 Distribución de transductores en losas con el Perfil AD-730.....	68
Figura N° 3.31 Desplazamiento relativo final entre el concreto y la placa colaborante.....	68
Figura N° 3.32 Desplazamiento relativo en la cara Norte del espécimen L-001.....	69

Figura N° 3.33 Desplazamiento relativo en la cara Norte del espécimen L-002.	69
Figura N° 3.34 Desplazamiento relativo en la cara Sur del espécimen L-003. ...	70
Figura N° 3.35 Desplazamiento relativo en la cara Sur del espécimen L-004. ...	70
Figura N° 3.36 Desplazamiento relativo en la cara Sur del espécimen L-005. ...	71
Figura N° 3.37 Desplazamiento relativo en la cara Sur del espécimen L-006. ...	71
Figura N° 3.38 Desplazamiento relativo en la cara Norte del espécimen L-007.	72
Figura N° 3.39 Desplazamiento relativo en la cara Norte del espécimen L-008.	72
Figura N° 3.40 Desplazamiento relativo en la cara Sur del espécimen L-009. ...	73
Figura N° 3.41 Desplazamiento relativo en la cara Sur del espécimen L-010. ...	73
Figura N° 3.42 Desplazamiento relativo en la cara Sur del espécimen L-011. ...	74
Figura N° 3.43 Desplazamiento relativo en la cara Norte del espécimen L-012.	74
Figura N° 3.44 Desplazamiento relativo en la cara Norte del espécimen L-013.	75
Figura N° 3.45 Desplazamiento relativo en la cara Norte del espécimen L-014.	75
Figura N° 3.46 Desplazamiento relativo en la cara Norte del espécimen L-015.	76
Figura N° 3.47 Preparación de las probetas de concreto.	77
Figura N° 3.48 Ensayo a carga axial de probetas de concreto.	77
Figura N° 3.49 Dimensiones de las probetas según ASTM A370.	78
Figura N° 3.50 Probetas de lámina de acero.	78
Figura N° 3.51 Ensayo a tracción de probetas de acero.	79
Figura N° 4.1 Comportamiento dúctil de la losa con placa colaborante.	80
Figura N° 4.2 Comportamiento frágil de la losa con placa colaborante.	80
Figura N° 4.3 Tipo de comportamiento para las losas con el Perfil AD-900.	84
Figura N° 4.4 Tipo de comportamiento para las losas con el Perfil AD-730.	85
Figura N° 4.5 Tipo de comportamiento para las losas con el Perfil AD-600.	85
Figura N° 4.6 Delimitación del estado de servicio.	86
Figura N° 4.7 Deflexión medida en el desprendimiento para el perfil AD-900 y L=2.76 m.	87
Figura N° 4.8 Deflexión medida en el desprendimiento para el perfil AD-900 y L=3.78 m.	88
Figura N° 4.9 Deflexión medida en el desprendimiento para el perfil AD-730 y L=2.76 m.	88
Figura N° 4.10 Deflexión medida en el desprendimiento para el perfil AD-730 y L=3.78 m.	89
Figura N° 4.11 Deflexión medida en el desprendimiento para el perfil AD-600 y L=2.76 m.	89

Figura N° 4.12 Deflexión medida en el desprendimiento para el perfil AD-600 y L=3.78 m.	90
Figura N° 4.13 Regresión lineal para los resultados obtenidos con el Perfil AD-900.	92
Figura N° 4.14 Regresión lineal para los resultados obtenidos con el Perfil AD-730.	93
Figura N° 4.15 Regresión lineal para los resultados obtenidos con el Perfil AD-600.	93
Figura N° 4.16 Comparación de las cargas de desprendimiento teóricas y experimentales para el perfil AD-900.	94
Figura N° 4.17 Comparación de las cargas de desprendimiento teóricas y experimentales para el perfil AD-730.	94
Figura N° 4.18 Comparación de las cargas de desprendimiento teóricas y experimentales para el perfil AD-600.	95
Figura N° 4.19 Porcentaje de reducción para condicionar la funcionalidad del sistema.	96
Figura N° 4.20 Regresión lineal que limita la funcionalidad de las losas con el Perfil AD-900.	97
Figura N° 4.21 Regresión lineal que limita la funcionalidad de las losas con el Perfil AD-730.	97
Figura N° 4.22 Regresión lineal que limita la funcionalidad de las losas con el Perfil AD-600.	98
Figura N° 4.23 Comparación de las cargas teóricas asociadas a la funcionalidad y experimentales para el perfil AD-900.	99
Figura N° 4.24 Comparación de las cargas teóricas asociadas a la funcionalidad y experimentales para el perfil AD-730.	99
Figura N° 4.25 Comparación de las cargas teóricas asociadas a la funcionalidad y experimentales para el perfil AD-600.	100
Figura N° 4.26 Grieta diagonal principal que llega hasta la parte superior de la losa.	102
Figura N° 4.27 Deflexión total en los puntos 1 y 2 versus el desplazamiento relativo en el extremo.	102
Figura N° 4.28 Esfuerzo cortante longitudinal en el espécimen L-001.	103
Figura N° 4.29 Esfuerzo cortante longitudinal en el espécimen L-004.	103
Figura N° 4.30 Esfuerzo cortante longitudinal en el espécimen L-006.	104

Figura N° 4.31 Esfuerzo cortante longitudinal en el espécimen L-007.	104
Figura N° 4.32 Esfuerzo cortante longitudinal en el espécimen L-008.	105
Figura N° 4.33 Esfuerzo cortante longitudinal en el espécimen L-010.	105
Figura N° 4.34 Esfuerzo cortante longitudinal en el espécimen L-012.	106
Figura N° 4.35 Esfuerzo cortante longitudinal en el espécimen L-014.	106
Figura N° 4.36 Pandeo local de las caras laterales de los valles de la placa colaborante.....	108

LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS

SÍMBOLOS

- A_c : Área efectiva de corte del concreto.
- b : Ancho de la losa compuesta.
- d : Peralte de la losa compuesta.
- E_c : Módulo de elasticidad del concreto.
- E_c : Módulo de elasticidad del concreto.
- E_{sd} : Módulo de elasticidad de la lámina de acero de la placa colaborante.
- f'_c : Resistencia a la compresión del concreto.
- f_{sd} : Esfuerzo de fluencia de la lámina de acero.
- f_{sd} : Esfuerzo de fluencia de la lámina de acero.
- F_i : Fuerza cortante longitudinal resistente para el instante " i ".
- h : Altura total de la losa.
- I_{cr} : Momento de inercia de la sección agrietada.
- I_e : Momento de inercia efectiva de la losa compuesta.
- I_{sd} : Momento de inercia de la placa colaborante.
- L : Luz libre de la losa.
- L_s : Luz rasante (Distancia del apoyo al punto de carga más cercana).
- m y k : Parámetros del ajuste lineal reducido.
- M_D : Momento flector producido por la carga muerta.
- M_L : Momento flector producido por la carga viva.
- M_r : Momento actuante en la placa colaborante.
- M_r : Momento flector nominal.
- M_{ri} : Momento actuante en la placa colaborante para el instante " i ".
- M_{sd}^- : Momento flector negativo de la placa colaborante.
- M_{sd}^+ : Momento flector positivo de la placa colaborante.
- M_u : Momento flector último.
- n : Relación del módulo de elasticidad del acero y el concreto (E_{sd}/E_c).
- P_i : Carga aplicada para el instante " i ".
- P_h : Profundidad de la muesca.
- P_{lc} : Carga constructiva puntual por ancho unitario de la sección.
- R : Radio de curvatura de la losa sometida a flexión.
- s_i : Desplazamiento relativo en el extremo de la losa para el instante " i ".

- S_{inf} : Módulo de sección elástica a tracción de la losa compuesta.
- S_{sd_inf} : Módulo de sección elástica a tracción de la placa colaborante.
- S_{sd_sup} : Módulo de sección elástica a compresión de la placa colaborante.
- S_{sup} : Módulo de sección elástica a compresión de la losa compuesta.
- V_D : Fuerza cortante nominal de la lámina de acero.
- V_c : Fuerza cortante nominal del concreto.
- V_{desp} : Fuerza corte asociada al desprendimiento.
- V_u : Fuerza cortante última.
- W_D : Carga muerta uniformemente distribuida por unidad de área.
- W_L : Carga viva uniformemente distribuida por unidad de área.
- W_{dc} : Peso propio del concreto.
- W_{dd} : Peso propio de la placa colaborante.
- W_{ext} : Trabajo externo.
- W_{int} : Trabajo interno.
- W_{lc} : Carga constructiva distribuida.
- y_{cc} : Distancia de la fibra más comprimida hasta el eje neutro de la sección agrietada.
- δ_{1i} : Deflexión en el punto 1 para el instante " i ".
- δ_{2i} : Deflexión en el punto 2 para el instante " i ".
- δ_{adm} : Deflexión admisible de la placa colaborante.
- δ_{calc} : Deflexión calculada de la placa colaborante.
- ρ : Cuantía de la sección compuesta $A_{sd}/b \cdot d$.
- ρ_s : Factores de hendiduras o muescas.
- τ_{mt} : Esfuerzo resistente al corte por adherencia obtenido por el Método del Trabajo.
- τ_{po} : Esfuerzo resistente al corte por adherencia obtenido del ensayo *Pull-out*.

SIGLAS

ACI	: Instituto Americano del Concreto (American Concrete Institute).
AISI	: Instituto Americano del Hierro y el Acero (American Iron and Steel Institute).
ASCE	: Sociedad Americana de Ensayos y Materiales (American Society of Civil Engineers).
ANSI	: Instituto Nacional Estadounidense de Estándares (American National Standards Institute).
ASTM	: Sociedad Americana de Ensayos y Materiales (American Society for Testing and Materials).
CISMID	: Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres.
LRFD	: Diseño por Factores de Carga y Resistencia (Load and Resistance Factor Design).
LVDT	: Transformador diferencial de variación lineal (Linear Variable Differential Transformer).
NTP	: Norma Técnica Peruana.
RNE	: Reglamento Nacional de Edificaciones.
SDI	: Instituto de cubiertas de acero (Steel Deck Institute).

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1 GENERALIDADES

El sistema de entrepiso con placa colaborante se hizo conocido en el Perú a fines de la década de 1990, ello gracias a las ventajas que mostraba este tipo de losa a nivel mundial, en comparación a los sistemas tradicionales que existían en aquel entonces como es la losa aligerada y/o maciza. Este tipo de entrepiso consiste en una losa compuesta entre el concreto y la lámina de acero galvanizada, la conexión entre estos dos materiales es a través de la adherencia química y mecánica, esta última es proporcionada por las muescas o hendiduras ubicadas en las caras laterales de los valles del perfil, el cual permite que el sistema trabaje como una sección compuesta y pueda alcanzar su máxima capacidad.

Las ventajas de esta losa han permitido diversificar su uso en el sector construcción, tal es así que se puede ver su incorporación en viviendas, centros comerciales, mezanines, puentes peatonales y vehiculares, estacionamientos y entrepisos en general. Asimismo, este sistema se complementa mucho mejor con las estructuras metálicas debido a su fácil montaje con los demás elementos estructurales.

Existen tres modos que pueden producir la falla de una losa con placa colaborante (momento flector, cortante vertical y esfuerzo cortante longitudinal); sin embargo, la mayoría de losas fallan por el corte longitudinal y esto tiene una relación directa con la adherencia química y mecánica que existe entre la placa colaborante y el concreto en su estado endurecido. Esta falla típica condiciona, generalmente, que la losa deje de trabajar como un sistema compuesto y que pueda llegar a su máxima capacidad; por eso es importante estudiar estas losas sometidas a flexión, pues permite determinar cuál es la carga de desprendimiento y bajo qué deflexión ocurre ello, para poder saber si está dentro de los límites permisibles en su estado de servicio.

Actualmente existe una formulación semi-experimental, conocida como el "Método m y k " (Porter y Ekberg, 1976), con la que se puede calcular la resistencia al corte longitudinal. Para ello se requiere realizar una serie de ensayos para cada perfil y variando algunos de los parámetros más influyentes, como es el calibre (espesor de la plancha), resistencia del concreto, espesor de la losa y luz libre. Esta metodología se ve indicada en normas internacionales (ASCE, 1992) en donde se

toma en cuenta la resistencia del concreto para el ajuste lineal y obtención de los valores “m y k”; caso contrario ocurre con el Eurocódigo 4 (1994) y otros investigadores que consideran que la resistencia del concreto no tiene un efecto significativo en la capacidad de la losa (Seleim and Schuster, 1985; Luttrell, 1987).

En investigaciones previas se realizaron ensayos a flexión estática de 36 losas (M. Diaz, 2009) con los perfiles AD-600, AD-900 y AD-730 para distintas combinaciones de los parámetros geométricos y con espesores de lámina de acero de 0.909 mm y 0.749 mm (Calibre 20 y Calibre 22 respectivamente). A partir de ello se mostró una serie de resultados de cargas de desprendimientos y cargas máximas para cada espécimen. Asimismo, en esa misma investigación se realizaron ensayos *Pull-out*, que es una prueba de adherencia que permite cuantificar el esfuerzo cortante longitudinal en una porción de losa.

El propósito de estos ensayos es entender el comportamiento de estas losas con perfiles previamente seleccionados, y así complementar los criterios de diseño de estos elementos, pues generalmente solo se realiza la verificación para la flexión positiva y negativa, cortante y punzonamiento, y se deja de lado el diseño por cortante longitudinal.

Con la finalidad de ampliar los resultados obtenidos hasta ahora, en esta investigación, se realizará una serie de ensayos con los perfiles AD-730 y AD-600 con espesor de lámina de acero de 1.504 mm (calibre 18) y esto ayudará a estudiar mucho mejor el comportamiento a flexión de las losas de acuerdo a sus parámetros geométricos (perfil, espesor de la lámina de acero, espesor de la losa y luz libre) y mecánicos (resistencia a compresión del concreto y resistencia a tracción del acero). Con estos datos se buscará uniformizar la información y poder plantear una metodología alternativa al “Método m y k”, para poder determinar la sobrecarga admisible y asegurar la funcionalidad del sistema.

1.2 PROBLEMÁTICA

El estudio del comportamiento de este tipo de losas es de mucho interés, pues permite caracterizar un perfil en específico e identificar el funcionamiento de esta bajo sus propiedades geométricas como área de acero y esbeltez de la losa. Asimismo, a través de los resultados, se puede identificar el tipo de falla por flexión, cortante longitudinal y corte vertical; todo esto bajo el principio de que en losas esbeltas predomina una falla por flexión y para losas compactas una falla por corte vertical, siendo las losas intermedias una zona de transición en donde

se produce una falla por cortante longitudinal y que en realidad es la predominante en todas las losas en estudio.

En la mayoría de los ensayos a flexión se suele obtener solamente datos de cargas y desplazamientos (a los tercios y centro de la luz), y muchas veces esta información es limitada para poder entender el funcionamiento de las losas y estudiar los esfuerzos cortantes longitudinales en la interfaz. Por eso es necesario instrumentar la losa de manera que se pueda medir el corrimiento en los extremos, desplazamientos relativos entre la placa colaborante y el concreto, para poder cuantificar la resistencia al esfuerzo cortante longitudinal (Abdullah, 2004) y que a su vez está relacionado a la carga de desprendimiento. Adicionalmente, es importante identificar cual es la deflexión para la carga de desprendimiento y verificar si está dentro de los límites de servicio, esto permitirá definir los límites de la funcionalidad del sistema.

En el diseño de este tipo de entresijos, los diseñadores realizan las verificaciones para la flexión positiva, negativa y corte vertical a partir de la geometría de cada sección y perfil. Sin embargo, en la mayoría de casos el diseño se basa en tablas de sobrecargas para cada perfil, que por lo general no considera todas las condiciones de falla, como la comprobación por cortante longitudinal. Esto se debe, principalmente, a que no se desarrollan ensayos a escala natural de este tipo de losas y no se hace un correcto análisis de los resultados. Asimismo, es importante mencionar que la configuración (forma y distribución) de las muescas, hendiduras o relieves en los valles, no es la misma en los tres perfiles en estudio, por lo que no sería correcto generalizar su aporte en la resistencia al corte longitudinal.

Por eso es importante plantear una metodología que parta desde el estudio experimental y tratamiento de los resultados hasta la elaboración de las tablas de sobrecargas admisibles que garantice la funcionalidad del sistema de entresijo con placa colaborante y sea entendible para los diseñadores.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo general

Caracterizar el comportamiento de las losas con placa colaborante, a partir de la carga de desprendimiento, parámetros geométricos y mecánicos con el fin de

proponer una formulación alternativa al “Método m y k”, que permita determinar la carga de desprendimiento y la que limite la funcionalidad del sistema.

1.3.2 Objetivos específicos

- Determinar el esfuerzo resistente al corte por adherencia a partir de métodos analíticos y simplificaciones en la interacción entre el concreto y la lámina de acero de la placa colaborante.
- Determinar bajo qué características geométricas se obtiene una falla dúctil o frágil para las losas con placa colaborante.
- Definir un factor de reducción para la fuerza cortante asociada al desprendimiento, de manera que la funcionalidad del sistema esté incluida en el nuevo método.

1.4 HIPÓTESIS

1.4.1 Hipótesis general

La presente investigación muestra que se puede encontrar una relación entre la carga de desprendimiento, obtenida de los ensayos a flexión, con los parámetros mecánicos y geométricos de cada losa, y así poder desarrollar una propuesta alternativa al “Método m y k” (Porter y Ekberg, 1976). En este nuevo planteamiento se tomará en cuenta la resistencia a la compresión del concreto y el esfuerzo de fluencia del acero, con el fin de uniformizar la información, pues los ensayos fueron realizados en distintas etapas.

1.4.2 Hipótesis específicas.

- La luz libre influye directamente en el factor de reducción de la fuerza cortante asociada al desprendimiento y puede ser determinado para cada perfil en estudio.
- El esfuerzo resistente al corte por adherencia, obtenido a través de métodos analíticos, puede resultar similar a lo obtenido en los ensayos *Pull-out*.

CAPÍTULO II. FUNDAMENTO TEÓRICO

En este capítulo se plantean las definiciones generales sobre las losas con placa colaborante, asimismo se explica el comportamiento de estas en su estado de servicio y sus modos de fallas principales en base a estudios previos. Finalmente se presentará las formulaciones matemáticas empleadas para poder llevar a cabo el procesamiento de datos.

2.1 Definición de la losa compuesta

Una losa compuesta, según el ASCE¹ (1992), es definida como un sistema que está conformado por concreto estructural (normal o liviano) ubicado permanentemente por encima de la placa colaborante, en donde este último cumple la función de ser un encofrado en la etapa de construcción y posteriormente ser parte del refuerzo positivo de la losa en su etapa de servicio. La placa colaborante, ya sea con o sin apuntalamiento, debe de proporcionar una suficiente rigidez y resistencia para poder soportar la carga muerta producida por el concreto en su estado fresco y por las cargas vivas en la etapa de construcción.

2.1.1 Ventajas

Son tres las principales ventajas que proporciona la losa con placa colaborante en comparación con los sistemas tradicionales:

- Proporcionar una plataforma segura de trabajo.
- Actuar como un encofrado perdido.
- Brindar un refuerzo positivo suficiente para los efectos de tracción, debido a la flexión, producidas en la losa.

2.1.2 Elementos de losa compuesta

Este sistema de losa compuesta está conformado por los siguientes elementos: concreto estructural, placa colaborante, malla de temperatura, y conectores de corte. En la Figura N° 2.1 se muestra la losa con todos los elementos mencionados, y a su vez se muestra la conexión que existe entre este tipo de entrepiso y la viga metálica.

¹ American Society of Civil Engineers (ASCE) Sociedad Estadounidense de Ingenieros Civiles.

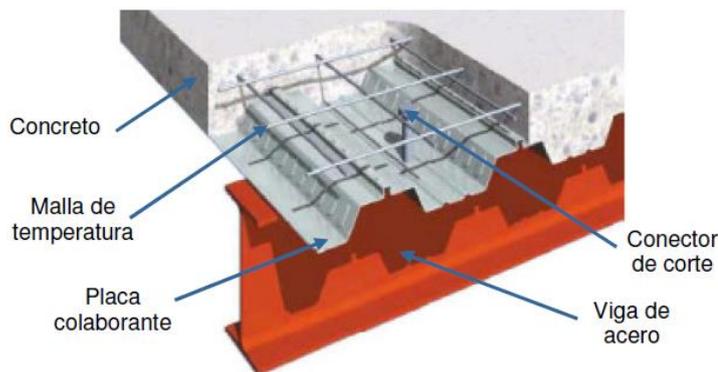


Figura N° 2.1 Componentes de la losa con placa colaborante.
Fuente: M. Díaz 2009.

2.1.2.1 Placa colaborante

La placa colaborante se elabora a partir de láminas de acero estructural galvanizado que vienen en bobinas de 1220 mm de ancho aproximadamente, esta plancha pasa un proceso de rolado en frío, que está conformado por unos rodillos ubicados secuencialmente y que van dando la forma final al perfil.

En la Tabla N° 2.1 se indica la designación del revestimiento según ASTM² A653 “Especificaciones normalizadas para láminas de acero revestidas de zinc (galvanizado) o aleación de hierro y zinc (ferrogalvanizadas) por baño en caliente”.

Tabla N° 2.1 Designación de revestimiento de galvanizado para la prueba en 3 puntos.
Fuente: ASTM A653.

Designación de revestimiento	Ambos lados oz/ft ² (g/m ²) mínimo	Un solo lado oz/ft ² (g/m ²) mínimo
G30	0.30 (90)	0.10 (30)
G40	0.40 (120)	0.12 (36)
G60	0.60 (180)	0.20 (60)
G90	0.90 (275)	0.32 (94)
G100	1.00 (305)	0.36 (110)

La placa colaborante en estudio tiene un galvanizado G90, conocido también como un galvanizado pesado, que es recomendado para climas agresivos.

El espesor de las láminas de acero (ver Tabla N° 2.2) tiene mucha importancia en el diseño de la losa y sobre todo para la condición inicial de la placa colaborante, que trabaja como plataforma de trabajo. El espesor de las láminas influye

² American Society for Testing and Materials (ASTM) Sociedad Americana de Ensayos y Materiales.

directamente en el momento de inercia de sección y ello puede mejorar su comportamiento a flexión para las cargas mencionadas.

Tabla N° 2.2 Espesores de la lámina de acero para la placa colaborante.
Fuente: SDI 2017.

Gage N° (Calibre)	Espesor de diseño (mm)	Espesor mínimo (mm)
22	0.75	0.71
20	0.91	0.86
18	1.20	1.14
16	1.52	1.44

Las recomendaciones para este material, según el SDI³ 2017, se muestran a continuación:

- Los espesores mínimos de acero, sin revestimiento de zinc, tal como se entregan en el lugar de trabajo no deben ser menor al 95% del espesor de diseño indicado, sin embargo, se pueden permitir espesores menores en las curvas, como en las esquinas, que se producen debido al rolado en frío.
- La lámina de acero usada en la placa colaborante debe tener un esfuerzo de fluencia mínimo especificado, que debe ser cercano o exceder los 230 MPa (2300 Kgf/cm²).

Influencia de la geometría de la placa colaborante

Muecas (hendiduras laterales)

Las muecas influyen considerablemente en el comportamiento de la losa, sobre todo en la resistencia al corte longitudinal. Las variables relacionadas con las muecas, que pueden mejorar la resistencia rasante de la losa compuesta, son:

- La profundidad efectiva.
- La disposición a lo largo de la placa colaborante.
- La orientación.
- La densidad.

³ Steel Deck Institute (SDI) Instituto de cubiertas de acero.

Existen distintos tipos de muescas en perfiles pre-calificados (SDI, 2017) que permite poder cuantificar la densidad y distribución de estas a partir de factores de hendiduras (ρ_s), los límites de estos factores están definido en la Tabla N° 2.3.

Tabla N° 2.3 Factores mínimos de hendiduras (muescas).
Fuente: SDI 2017.

Tipo de muescas	Altura de la placa colaborante (mm)	Mínimo ρ_s
1	37.5	5.5
1	50.0	12.0
1	75.0	18.0
2	37.5	5.5
2	50.0	8.5
2	75.0	8.5
3	37.5	5.5
3	50.0	10.0
3	75.0	12.0

- Para las muescas Tipo 1 (Figura N° 2.2)

$$\rho_{s1} = 12(l_e/S)$$

- Para las muescas Tipo 2 (Figura N° 2.3)

$$\rho_{s2} = 12(l_1 + l_2)/S$$

- Para las muescas Tipo 3 (Figura N° 2.4)

$$\rho_{s3a} = 12(\text{Suma de longitudes } l_1 \text{ en una distancia } S_1)/S_1$$

$$\rho_{s3b} = 12(\text{Suma de longitudes } l_2 \text{ en una distancia } S_2)/S_2$$

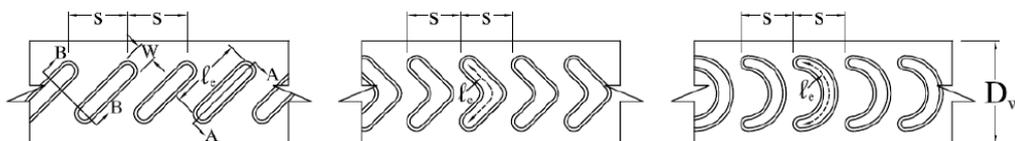


Figura N° 2.2 Muescas Tipo 1.
Fuente: SDI 2017.

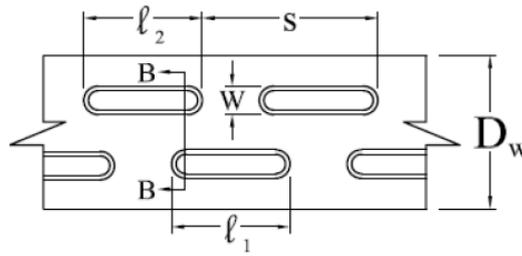


Figura N° 2.3 Muestras Tipo 2.
Fuente: SDI 2017.

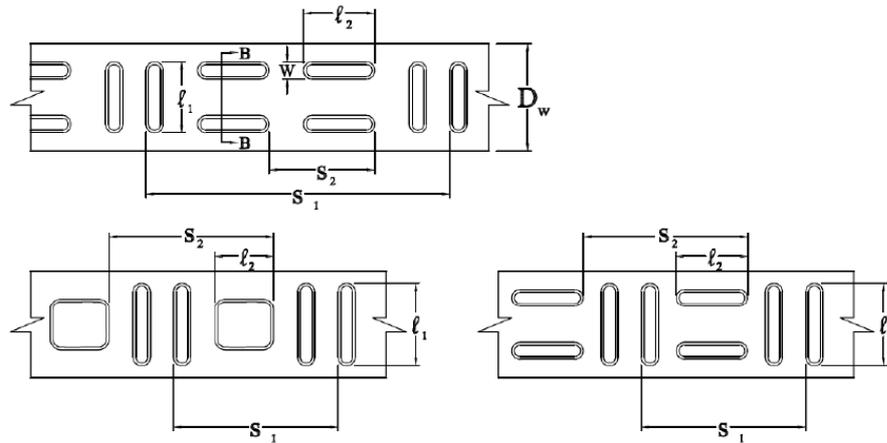


Figura N° 2.4 Muestras Tipo 3.
Fuente: SDI 2017.

La profundidad de las muescas, P_h , no debe ser menor que 0.89 mm (0.035 in) y no debe ser mayor que 2.67 mm (0.105 in). Además, estas no deben ser menor al 90% de la profundidad de diseño (SDI, 2017).

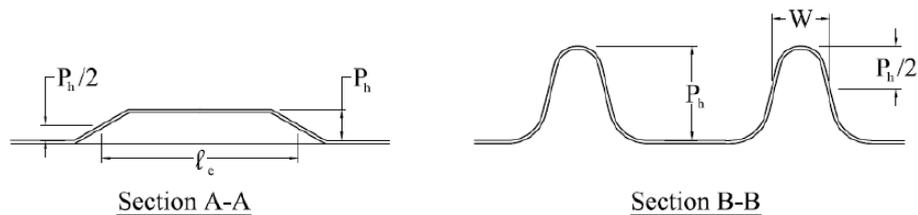


Figura N° 2.5 Detalle de la sección transversal de las muescas.
Fuente: SDI 2017.

Aberturas de los valles

La inclinación de las caras laterales de los valles permite un ahorro de volumen de concreto, asimismo estas proporcionan una buena retención vertical, es decir, mantener su geometría evitando su desmolde en la etapa en que la placa colaborante funciona como plataforma de trabajo.

2.1.2.2 Concreto

El concreto, en su estado endurecido, tiene el propósito resistir los esfuerzos a compresión cuando la losa este sometida a efectos de flexión, es decir cuando esta puesta en servicio. Los requisitos de diseño y durabilidad deben ser verificados de acuerdo al ACI⁴ 318, Capítulo 19; y adicionalmente se mencionan algunas recomendaciones dadas por el SDI 2017.

- La resistencia a compresión del concreto especificada no deberá ser menor a 21 MPa (210 Kgf/cm²).
- La máxima resistencia a compresión del concreto, usada para determinar la resistencia de la losa compuesta, no debe exceder los 42 MPa (420 Kgf/cm²).
- No se debe permitir la presencia de sales clorhídricas en la mezcla de concreto, pues puede deteriorar la placa colaborante.

2.1.2.3 Malla de temperatura

La malla de acero de refuerzo tiene el propósito fundamental de absorber los efectos de la retracción de fraguado y los cambios térmicos que ocurren en el concreto mientras se va endureciendo. Adicionalmente se requiere esta malla para amarrar la estructura con el fin de garantizar que actúe como se supone en el diseño.

El diseño de la malla de temperatura deberá cumplir con los requisitos mínimo indicados en el ACI 318.

2.1.2.4 Conectores de corte

Los conectores de corte más comunes en este tipo de sistemas de entrepiso son los Tipo Nelson Stud, que tienen una cabeza cilíndrica y sin roscado. Estos elementos son fijados en el ala de la viga metálica mediante soldadura, y son ubicados de manera intercalada para poder distribuir mejor los esfuerzos cortantes producidos en la interfaz de la sección compuesta. Otra función importante es proporcionar mayor ductilidad a la losa compuesta, pues permite deflexiones mayores a las que se esperan en el rango inelástico.

⁴ American Concrete Institute (ACI) Instituto Americano del Concreto.

2.1.3 Descripción de las placas colaborantes en estudio

En este estudio se ha trabajado con tres perfiles de placa colaborante, todos ellos tienen un ancho útil de 900 mm, y pueden ser de tres espesores, calibre 22 (0.749 mm), calibre 20 (0.909 mm) y calibre 18 (1.204 mm).

Perfil AD-900

Este perfil tiene 6 valles por ancho útil y tiene una altura de 38 mm; además solo se producen de calibre 20 y 22. Las dimensiones de este perfil se ven indicadas en la Figura N° 2.6.

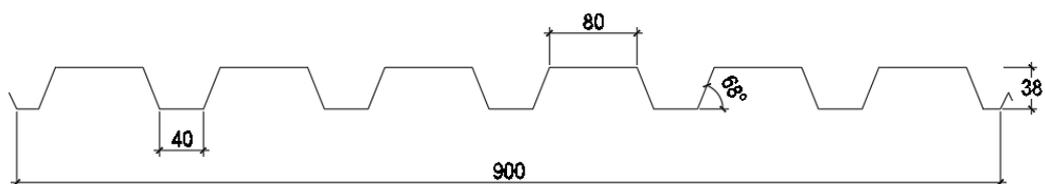


Figura N° 2.6 Dimensiones del Perfil AD-900 (mm).

Perfil AD-600

Este perfil tiene 4 valles por ancho útil y tiene una altura de 60 mm; además se producen en los tres calibres mencionados. Las dimensiones de este perfil se ven indicadas en la Figura N° 2.7.

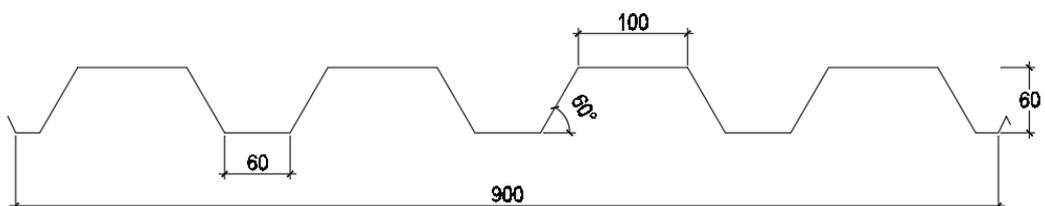


Figura N° 2.7 Dimensiones del perfil AD-600 (mm).

Perfil AD-730

Este perfil tiene 3 valles por ancho útil y tiene una altura de 75 mm; además se producen en los tres calibres mencionados. Las dimensiones de este perfil se ven indicadas en la Figura N° 2.8.

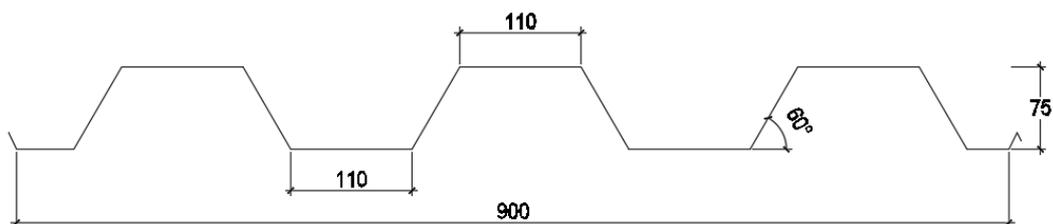


Figura N° 2.8 Dimensiones del perfil AD-730 (mm).

2.2 Descripción del sistema constructivo

2.2.1 Ingeniería de detalles

La ingeniería de detalles son las actividades que se realizan en gabinete para optimizar los recursos al momento de cubrir un área, tal como generar una buena funcionalidad en obra y reducir los desperdicios al mínimo. Como parte de esta optimización se recomienda tener medidas iguales en el modulado de la placa colaborante, para facilitar el proceso de fabricación e instalación, y se debe tener en cuenta una longitud mínima de apoyo sobre la viga (5 cm) y en otros casos se deberá contemplar el traslape entre las placas colaborantes.

En esta etapa se deberá indicar la cantidad de conectores de corte en base a los cálculos realizados, asimismo indicar el tipo de conector y el espaciamiento tanto en las vigas paralelas y/o perpendiculares a la dirección de la losa. Toda esta información deberá estar indicada en los planos estructurales con sus respectivas especificaciones.

2.2.2 Transporte

Esta etapa contempla el transporte de la placa colaborante desde la planta de la fábrica hasta su destino final, en algunos casos el lugar de la obra condicionará la longitud máxima a transportar y esto debido a la facilidad de circulación que pueda tener la movilidad en cierto tipo de vía, en base a ello la longitud máxima que se podría transportar sería de 12 metros.

La manera de acomodar la placa colaborante es importante en el momento de su transporte, es por ello que solo se permite colocar 25 planchas, una encima de otra, y no exceder de 1.5 toneladas por paquete.

2.2.3 Almacenamiento

Corresponde a la disposición del material en obra durante el tiempo que no será usado y para conservar su calidad se deberá proteger y aislar de la intemperie mediante unas mantas de plástico, evitando el contacto directo con el polvo u otros agentes externos.

Además, para evitar deformaciones iniciales en la placa colaborante, por el peso de las demás, se deberá colocar el paquete sobre unas durmientes que estará separadas 0.60 m, que a su vez impedirá el contacto directo con el terreno.

2.2.4 Izaje

Se denomina izaje al proceso por el cual la placa colaborante se transporta desde la zona de almacenamiento hasta el lugar final donde será colocada. El tipo de proyecto y la extensión de esta condicionarán el tipo de izaje manual o mecánico, en ambos casos se debe tener cuidado con los puntos de soporte para que la placa colaborante no sufra deformaciones en su sección transversal y longitudinal.

2.2.5 Montaje de la placa colaborante

Corresponde a la ubicación final de la placa colaborante, es decir colocarla entre las vigas de apoyo, y la longitud de contacto deberá ser como mínimo 5 cm. En la etapa de ingeniería de detalles se debe indicar si se requiere apuntalar al centro de la luz o a los tercios (según la luz libre), pues inicialmente la placa colaborante trabajará como una plataforma de trabajo y deberá soportar todas las cargas vivas de construcción. La unión transversal de estos perfiles será a través de las pestañas ubicadas en los extremos, y se debe garantizar una buena conexión para que toda el área cubierta trabaje de manera conjunta. En caso de requiera hacer un corte longitudinal, se puede realizar ello con esmeriles, cizallas eléctricas o manuales.

2.2.6 Instalación de los conectores de corte

Los conectores de corte deben ser soldados directamente en el ala de la viga metálica para que junto al concreto y a la placa colaborante formen un sistema compuesto. La cantidad y/o espaciamiento de los conectores serán definidos en base a los diseños correspondientes.

Antes de soldar el conector se debe perforar la placa colaborante con una broca sacabocado o algún otro sistema de perforación que no altere la integridad de la sección ni deteriore el galvanizado, pues podría ser un punto vulnerable frente a los agentes externos. Una vez perforada la plancha se deberán soldar en todo el perímetro del perno que está en contacto con la viga, con un espesor y un tipo de soldadura indicado.

2.2.7 Fijación

El proceso de fijación hace referencia a mantener la placa colaborante en su posición final de trabajo, esto por medidas de seguridad y para que en la etapa de vaciado no ocurran desplazamiento de la plataforma de trabajo. Esta fijación se puede obtener mediante pernos auto perforantes que son ubicados en los extremos de las planchas con la viga de apoyo.

No se recomienda usar puntos de soldadura como parte del proceso de fijación, pues esto daña a la placa colaborante.

2.2.8 Ubicación Acero de refuerzo

Debido a que la placa colaborante proporciona el refuerzo para momento positivo, se deberá identificar las zonas de apoyos en donde se presenten momentos negativos, pues en dichos lugares se deberán colocar varillas, por debajo de la malla de temperatura, que tomen las tracciones debido a la flexión.

En caso que haya ductos de dimensiones considerables se deberá añadir refuerzo en todo el borde de la abertura para reducir los efectos locales.

2.2.9 Malla de temperatura

La malla de temperatura es un refuerzo que está presente en cualquier tipo de losa y su función es resistir los efectos de temperatura y contracción de fragua del concreto, permitiendo reducir considerablemente las grietas en la cara superficial de la losa. Tradicionalmente se arman a partir de varillas (corrugadas o lisas) atortoladas en las intersecciones, pero actualmente existen mallas electrosoldadas que cumplen el mismo propósito y facilitan el trabajo.

Esta malla debe tener un recubrimiento de 2 cm para que pueda funcionar de manera eficiente, adicionalmente esta debe estar apoyada sobre unos soportes prefabricados que garantice el recubrimiento y la horizontalidad mientras se realice el vaciado del concreto.

2.2.10 Vaciado de concreto

Después de colocar la malla de temperatura y los accesorios correspondientes a las instalaciones sanitarias y eléctricas, se procede en acondicionar la plataforma de trabajo para que pueda soportar las cargas que se producirán por el proceso de vaciado, ya sea a través de bombas o carretillas. La ruta del vaciado de concreto deberá ser mediante tablonces que permitan distribuir las cargas puntuales producidas por los trabajadores o por las ruedas de la carretilla, esto con el fin de evitar deformaciones locales en la placa colaborante.

Antes de realizar el vaciado se deberá hacer una limpieza de toda la superficie de la placa colaborante, pues el polvo y otras partículas pueden disminuir, de manera significativa, la adherencia entre el concreto y la lámina de acero.

2.2.11 Curado del concreto

El proceso de curado hace referencia a mantener y controlar un contenido de humedad satisfactorio y una temperatura adecuada en el concreto, esto con el fin de que el concreto desarrolle la hidratación de los materiales cementantes. Es importante realizar este proceso durante los primeros 7 días después del vaciado, para que pueda alcanzar su resistencia de diseño.

El curado por vía húmeda puede ser sustituido por cualquier otro medio de curado, por ejemplo, el curado químico, pero se debe seguir las recomendaciones señaladas en E.060 del RNE⁵ o ACI 318-14.

2.2.12 Desapuntalamiento

En caso se haya colocado apuntalamiento temporal en la placa colaborante, de acuerdo al plano de apuntalamiento, se podrá realizar el retiro de estas a partir de los 7 días después del vaciado o cuando el concreto haya alcanzado el 75% de su resistencia a compresión.

Una vez realizado el desapuntalamiento, la losa empezará a trabajar como una sección compuesta y podrá soportar las sobrecargas previstas en su estado de servicio.

2.3 Análisis teórico de la losa compuesta

La losa con placa colaborante está conformada por una lámina de acero rolada en frío, con una geometría especificada según el tipo de perfil, y el concreto, siendo estos los elementos más importantes en este tipo de losas. La conexión entre estos dos elementos debe de ser garantizada para que el sistema trabaje como un sistema compuesto, y esto se obtiene a partir de una adecuada transferencia de esfuerzos rasante, el cual está relacionado directamente a la adherencia entre estos dos materiales. A continuación, se detallará las propiedades mecánicas, tipos de fallas y métodos para cuantificar la resistencia al corte longitudinal en este tipo de losas.

2.3.1 Mecanismos de interacción

La adherencia total que existe entre los dos elementos mencionados está afectada por distintos factores, y a su vez estos influyen directamente en la resistencia al corte longitudinal de la losa. La adherencia se divide en tres componentes principalmente (Burnet, 1998); sin embargo, también se tomará en cuenta el

⁵ Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE)

aporte de los anclajes mecánicos que garantizan la conexión entre la losa y las vigas.

2.3.1.1 Adherencia química

Es el enlace químico entre el concreto y la placa colaborante, se produce a medida que se va dando el proceso de fraguado. Esta propiedad resulta ser muy variable y difícil de controlar, por eso, a pesar de que esta adherencia pueda resultar alta, no son tomadas en cuenta para cuantificar la adherencia total.

2.3.1.2 Adherencia mecánica proporcionada por las muescas

Este tipo de adherencia resulta ser la más importante, pues puede ser cuantificado con una serie de ensayos y mediante el análisis de estos se puede mejorar esta propiedad. Para obtener este tipo de adherencia es necesario realizar unas hendiduras, también llamadas muescas, en la placa colaborante en su etapa de rolado en frío, antes de darle la geometría deseada. La función de estas muescas es similar a las corrugas que se pueden visualizar en las varillas de refuerzo, es decir ambos trabajan como interferencias mecánicas frente al deslizamiento longitudinal. Estas muescas pueden ubicarse tanto en la cara lateral y/o cara superior de los valles tal como se ve en la Figura N° 2.9.

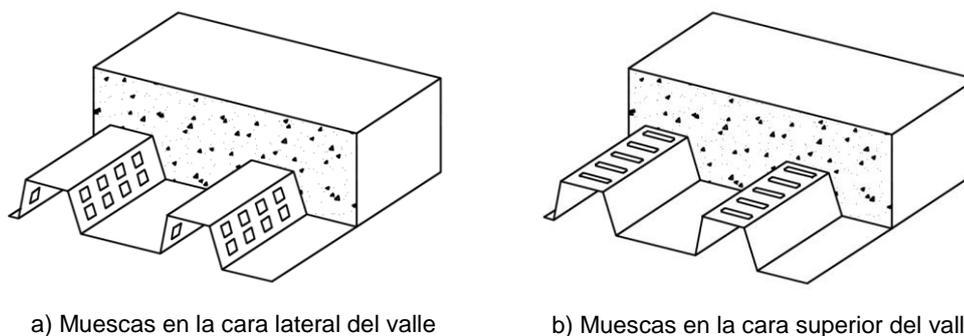


Figura N° 2.9 Distribución de muescas

2.3.1.3 Adherencia mecánica debido a la fricción

Las fuerzas normales que aparecen a todo lo largo de la superficie de contacto entre el concreto y la placa colaborante generan esfuerzos de fricción que se oponen al deslizamiento longitudinal. Este tipo de adherencia puede resultar mucho más eficiente si va acompañado de muescas en los valles; sin embargo, en placas colaborantes lisas, como se muestran en la Figura N° 2.10, también se puede apreciar esta propiedad, pero en menor magnitud.

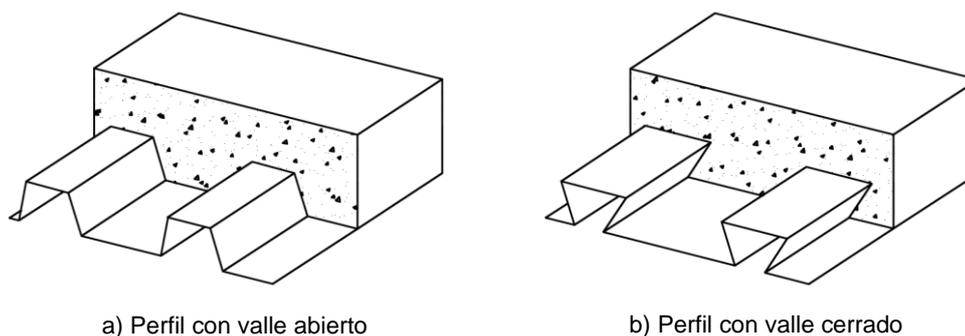


Figura N° 2.10 Adherencia por fricción

2.3.1.4 Anclaje mecánico en los puntos de apoyo de la losa

El uso de conectores de corte es muy común en este tipo de losas, pues generalmente se trata de aprovechar la porción de losa que descansa sobre las vigas de apoyo, para así conformar una viga con sección compuesta que resulta ser más resistente a flexión. Para garantizar esa sección compuesta se usan los conectores de corte que van soldados en el ala superior de la viga metálica, atravesando la placa colaborante y embebida en la losa. Estos conectores a su vez actúan como un anclaje mecánico en el extremo, restringiendo el deslizamiento longitudinal en la dirección de flexión. La disposición de estos anclajes se puede ver en la Figura N° 2.11.

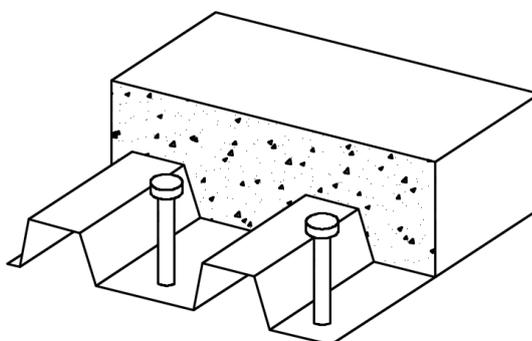


Figura N° 2.11 Conectores de corte

2.3.2 Grado de interacción

El comportamiento a flexión de estructuras compuestas, depende de la capacidad de transmisión de esfuerzos rasantes en la interfaz de ambos elementos, a esta propiedad se le conoce como grado de interacción. En los ensayos a flexión que se realizan a las losas con placa colaborante, se puede apreciar cómo va disminuyendo la interacción y como afecta ello en el comportamiento global del sistema.

2.3.2.1 Interacción total

En esta primera situación no existe un deslizamiento relativo entre la placa colaborante y el concreto, es decir la interacción es total y la hipótesis de continuidad de deformaciones es aún válida. En este punto las deformaciones de suponen lineales, tanto en el concreto como en la lámina de acero, y el elemento estructural trabaja de manera conjunta, como un sistema único. Asimismo, la Hipótesis de Navier cuyo enunciado menciona: “Una superficie plana correspondiente a una sección cualquiera de un cuerpo permanece plana después de la deformación del mismo” es válida en este caso.

2.3.2.2 Interacción parcial

Una vez que exista un deslizamiento relativo entre los materiales, se considera que hay una interacción parcial. Esta condición aun permite la transmisión de los esfuerzos rasantes, pero ya no se puede considerar una continuidad de las deformaciones como el caso de la interacción total. Además, se sigue cumpliendo la hipótesis de Navier y la igualdad de las curvaturas de ambos elementos.

2.3.2.3 Interacción nula

En este caso ya no existe una transmisión de esfuerzo rasante, es decir ambos elementos, concreto y placa colaborante, trabajan de manera independiente y la rigidez a flexión total de la losa sería la suma de las rigideces de ambos elementos. Dada la situación, ya no se tendría una losa compuesta, pues la interacción es nula y ambos elementos presentan su propio eje neutro. Además, dado que no existe interacción, la placa colaborante trabajará como un encofrado perdido y deberá soportar las cargas impuestas, originando así deflexiones considerables.

A continuación, se muestra en la Figura N° 2.12 el comportamiento de una misma losa, pero con distinto grado de interacción, se puede ver como varía la carga máxima alcanzada (P_u) según el nivel de interacción. La gráfica mostrada es referencial y se puede obtener a partir de un ensayo a flexión de un sistema compuesto en general.

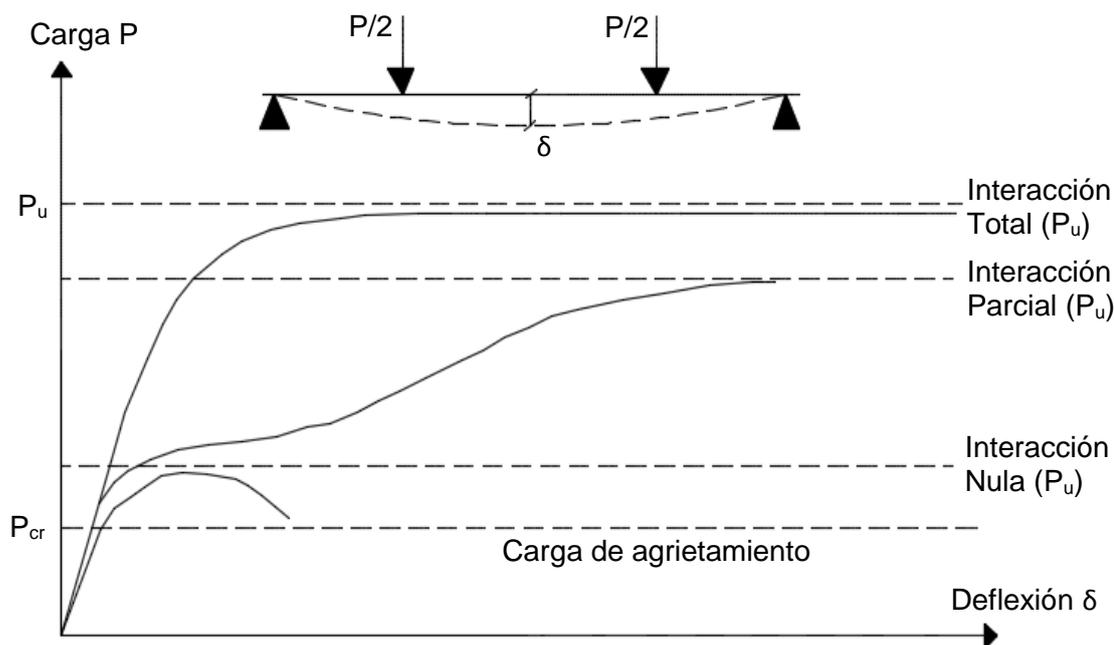


Figura N° 2.12 Comportamiento de la losa compuesta según el grado de interacción

Como se puede ver en la gráfica, la rigidez inicial de la losa compuesta es distinta para cada grado de interacción, donde la máxima rigidez corresponde a una interacción total y la mínima para una rigidez nula.

2.3.3 Tipos de comportamiento

Según el Eurocódigo 4, sección 10.3.1, a partir de la curva carga-deformación obtenida en el ensayo estático, se puede clasificar el comportamiento de la losa como dúctil o frágil, según el tipo de rotura que presenta.

El comportamiento se clasifica como dúctil si la carga de rotura supera más del 10% a la carga de desprendimiento. Si la carga máxima se alcanza con una deflexión en el centro de la luz mayor a $L/50$, se considera como carga de rotura aquella que produce la deflexión en el centro de la luz de $L/50$. En caso contrario, el comportamiento se clasifica como frágil. En la Figura N° 2.13 se muestran los tipos de comportamientos descritos.

Comportamiento dúctil: La falla se produce de manera progresiva con deformaciones significativas al llegar al colapso.

Comportamiento frágil: La falla ocurre de manera repentina y sin deformaciones importantes.

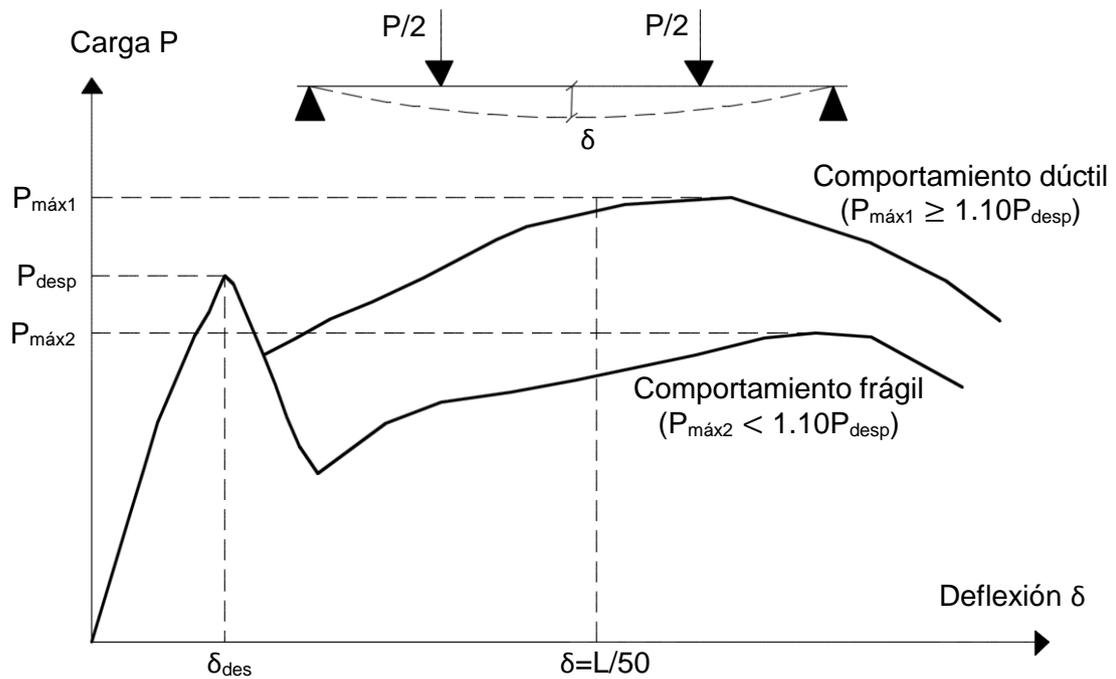


Figura N° 2.13 Comportamiento de las losas con placa colaborante.

El tipo de comportamiento depende principalmente de la geometría de la sección, esbeltez de la losa y la adherencia que existe en el interfaz concreto y placa colaborante, siendo la adherencia mecánica, proporcionada por las muescas, la más influyente.

2.3.4 Mecanismos principales de falla

Existen tres principales mecanismos de falla que se pueden presentar en las losas con placa colaborante cuando estas son ensayadas (Johnson, 1994). La falla por flexión (sección 1-1), falla por corte vertical (sección 2-2) y la falla por deslizamiento longitudinal (sección 3-3) se muestran en la Figura N° 2.14.

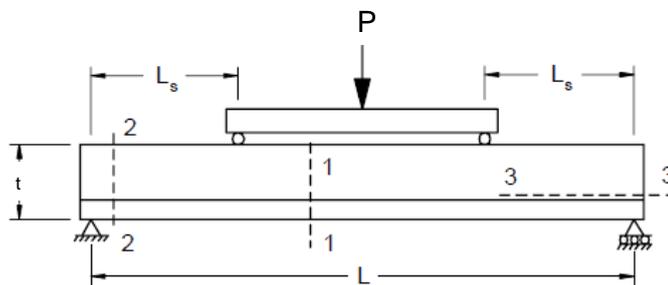


Figura N° 2.14 Mecanismos principales de falla de las losas con placa colaborante.
Fuente: Johnson 1994.

2.3.4.1 Falla por flexión

Este tipo de falla se produce cuando existe una interacción total entre el concreto y la placa colaborante, bajo esta condición la sección es capaz de llegar a su resistencia última a flexión. Esta falla predomina cuando los esfuerzos a flexión son mucho mayores a los esfuerzos de corte, y esto se presenta cuando las losas son muy esbeltas; es decir, luces largas y espesores pequeños de la losa.

2.3.4.2 Falla por deslizamiento longitudinal

Es el tipo de falla más común en estas losas y esto se debe a que los esfuerzos actuantes en la interfaz superan el esfuerzo cortante longitudinal resistente. En el caso que no se presenten anclajes en los extremos (conectores de corte) las muescas son los que condicionan la prontitud con la que se da este tipo de falla, pues serán las que mantendrán cierto grado de interacción. En los ensayos a flexión, este fenómeno se puede visualizar en la luz rasante de cada espécimen. Esta falla a su vez se puede subdividir en tres condiciones.

- *Falla por liberación longitudinal de la placa colaborante:* Está relacionado a la carga de desprendimiento, que da inicio al deslizamiento relativo en el extremo de la losa. En la Figura N° 2.15 se puede apreciar que el deslizamiento puede variar entre los 5 y 15mm, según los estudios experimentales.



Figura N° 2.15 Liberación longitudinal en el extremo de la losa.

- *Falla por separación vertical:* Este tipo de falla son más frecuentes en perfiles con valles abiertos, pues en los perfiles con valle cerrado la propia forma cerrada impide la separación vertical por la interferencia geométrica. Además, se puede analizar de manera conjunta con la falla por liberación

longitudinal. En la Figura N° 2.16 se puede ver que en el extremo de la losa se produce un deslizamiento inclinado, que es resultado del deslizamiento vertical y horizontal.



Figura N° 2.16 Separación vertical en el extremo de la losa.

- *Falla por rotura del concreto:* En caso que se presente resistencias elevadas a los dos modos de falla anteriores, se podrían llegar a producir la rotura del concreto debido a la tracción en la base de los valles cerrados, compresión local de las zonas de contacto o fractura alrededor de las muescas. En cualquiera de los casos se tendrá una falla frágil y frente a ello la placa colaborante deberá proporcionar la ductilidad suficiente para evitar el daño sucesivo en los demás sistemas de retención.

2.3.4.3 *Falla por corte vertical*

Esta falla se produce en zonas cercanas a los puntos de apoyo, donde la fuerza cortante vertical es mucho mayor. Es un tipo de falla poco común, pues solo se da en losas con luces libres pequeñas, de gran espesor o situaciones en las que los esfuerzos cortantes superen a los esfuerzos por flexión. En lo posible se debe evitar este tipo de efectos debido a que es una falla frágil.

2.3.4.4 *Representación gráfica de los modos de falla*

En la Figura N° 2.17 se muestra un resumen de los tres tipos de fallas, mediante una curva de resistencia, que se pueden presentar en las losas con placa colaborante. Para la construcción de este gráfico se requieren los parámetros geométricos de la sección transversal, la luz rasante L_s y la fuerza cortante V_t .

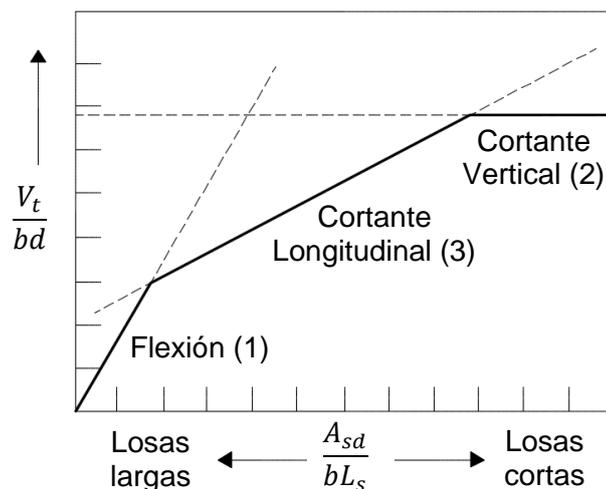


Figura N° 2.17 Curva de resistencia y modos de falla.

2.3.5 Métodos para calcular el esfuerzo cortante por adherencia mecánica

Debido a que la mayoría de losas están condicionadas a una falla por corte longitudinal, es necesario cuantificar el esfuerzo cortante por adherencia mecánica, pues es la más predominante y puede ser controlada a través de las muescas. Continuamente se han ido desarrollando métodos para poder obtener este valor de manera directa, como los ensayos de corte o de manera indirecta a través de los ensayos a flexión.

2.3.5.1 Ensayos de adherencia por corte directo

El desarrollo de pruebas elementales, como las de corte directo, han permitido evaluar los principales parámetros que afectan el comportamiento de las losas con placa colaborante. Estas evaluaciones ayudaron a redefinir los procedimientos de diseño y el desarrollo de perfiles más eficientes con distintos tipos de muescas. Sin embargo, el mayor propósito de estos ensayos es obtener los parámetros de diseño como el esfuerzo cortante por adherencia (resistencia al corte longitudinal), coeficientes de fricción, características de ductilidad, etc. A continuación, se indica los ensayos más relevantes.

Push-out

Es una de las primeras pruebas de adherencia, que fue propuesta por Schuster (1970), tal como se ve en la Figura N° 2.18, este ensayo fue realizado con el fin de establecer una relación entre la máxima fuerza cortante obtenida en el ensayo y la capacidad a momento de las losas con similar longitud rasante. Los resultados obtenidos en este ensayo no ofrecieron una buena correlación con la resistencia a corte longitudinal de la losa, y es por eso que esta prueba fue descartada y los

ensayos a escala real fueron optados como el método adecuado para evaluar las losas compuestas.

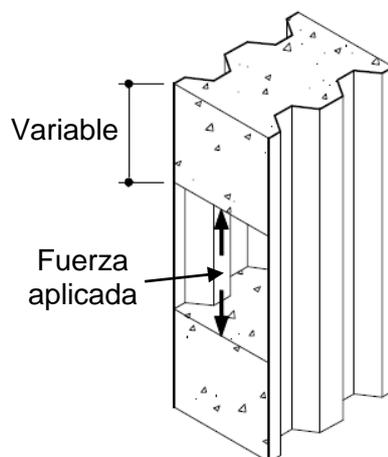


Figura N° 2.18 Ensayo push-out propuesto por Schuster (1970).

Pull-out

Es un ensayo de adherencia que fue desarrollado por Daniels (1988) y el esquema de la prueba se ve en la Figura N° 2.19, este tipo de prueba permite calcular las propiedades de interacción de cada perfil. El ensayo consiste en aplicar una carga longitudinal en la dirección de los valles a través de la placa colaborante, simultáneamente se aplica una carga lateral en los bloques de concreto. Estos bloques deben tener un tope muy rígido en la parte superior para evitar su deslizamiento y además para que se transmita el corte de manera directa (corte longitudinal).

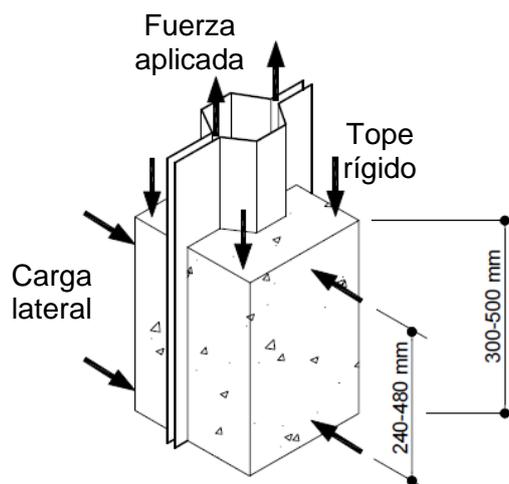


Figura N° 2.19 Ensayo pull-out propuesto por Daniels (1988).

El esfuerzo resistente al corte por adherencia se calcula a partir de la fuerza máxima alcanzada dividida entre la superficie de contacto entre la placa

colaborante y el concreto. Como era de esperarse, el aumento de la carga lateral incrementa el esfuerzo resistente y es por ello que se considera un método conservador, pues la carga lateral aumenta la fricción en la interfaz.

2.3.5.2 Métodos basados en ensayos a flexión

El ensayo a flexión a escala real permite estudiar mejor el comportamiento de las losas con placa colaborante, esto debido a que el funcionamiento global y el tipo de falla que se produce en los ensayos se puede asemejar al sistema real en su estado de servicio.

Método m y k

Es un método semi-empírico estandarizado propuesto por Porter y Ekberg (1976) y permite calcular la resistencia de la losa, que en su mayoría está condicionada al cortante longitudinal. Este método no proporciona el esfuerzo resistente por adherencia τ_m sino que a partir de la fuerza cortante vertical que produce el desprendimiento V_{desp} se puede verificar la falla por cortante longitudinal que se da a lo largo de la luz rasante L_s .

La relación directa que existe entre la cortante vertical y longitudinal es válida en un comportamiento elástico, pero si el comportamiento es elasto-plástico, se recomienda emplear el "Método m y k". A partir de los ensayos realizados se obtiene la ecuación (2.1) (ASCE, 1992), que involucra los parámetros de cada losa y de los resultados experimentales.

$$V_{desp} = \left(k \cdot \sqrt{f'_c} + m \frac{\rho \cdot d}{L_s} \right) \cdot b \cdot d \quad (2.1)$$

Donde:

V_{desp} : Fuerza corte asociada al desprendimiento (sin incluir el peso de la losa)

m y k : Parámetros del ajuste lineal reducido

b : Ancho de la losa compuesta

m : Pendiente de la línea de ajuste reducida

ρ : Cuantía de la sección compuesta $A_{sd}/b \cdot d$

d : Peralte de la losa compuesta

f'_c : Resistencia a la compresión del concreto

L_s : Luz rasante (Distancia del apoyo al punto de carga aplicada más cercana).

La ecuación (2.1) puede ser reordenada y obtener así la expresión (2.2), que permite visualizar mucho mejor los parámetros de ajuste. Según esta última expresión, k representa la intersección con el eje de las ordenadas y m representa la pendiente de la línea de ajuste.

$$\frac{V_{desp}}{b \cdot d \cdot \sqrt{f'_c}} = k + m \frac{\rho \cdot d}{L_s \cdot \sqrt{f'_c}} \quad (2.2)$$

Los valores de m y k , aquellos que caracterizan el cortante longitudinal de un perfil en particular, son determinados a partir de los ensayos a escala real y los resultados son graficados $\rho \cdot d / (L_s \cdot \sqrt{f'_c})$ en el eje x y $V_{desp} / (b \cdot d \cdot \sqrt{f'_c})$ en el eje y. Para efectos de diseño la pendiente y el punto de intercepción con el eje y pueden ser reducidas como se muestra en la Figura N° 2.20. El ASCE (1992) especifica que la reducción puede ser del 10% o 15% y dependerá del número de ensayos realizados.

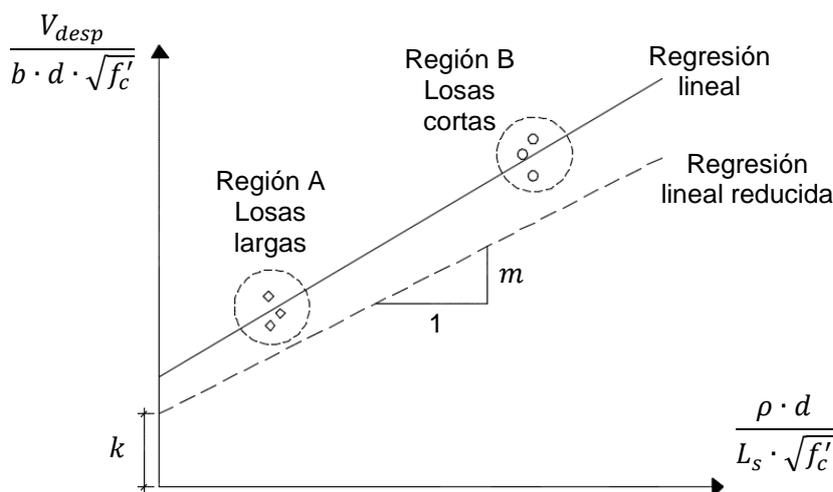


Figura N° 2.20 Esquema para determinar los parámetros m y k .

Este método es válido bajo ciertos límites de esbeltez dado que, dependiendo de la luz libre, el tipo de falla puede ser uno de los tres descritos con anterioridad.

Método del trabajo

El método del trabajo usado para el análisis de losas compuestas fue presentado por Wright and Evans (1990), y se refiere a un método de colapso plástico, el cual se ve representado por la Figura N° 2.21 y se indica la grieta diagonal producida en uno de los puntos de aplicación de la carga (zona de contacto con los rodillos), y esto es validado por los ensayos a flexión realizados.

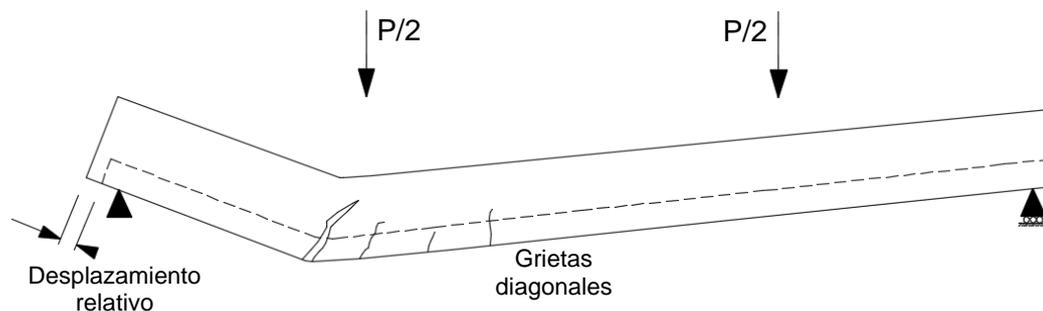


Figura N° 2.21 Grieta diagonal en la losa.

Asimismo, en la zona de agrietamiento se visualiza una Fuerza cortante longitudinal a todo lo largo de la luz rasante, que forma parte del trabajo interno y este fenómeno se puede apreciar en la Figura N° 2.22.

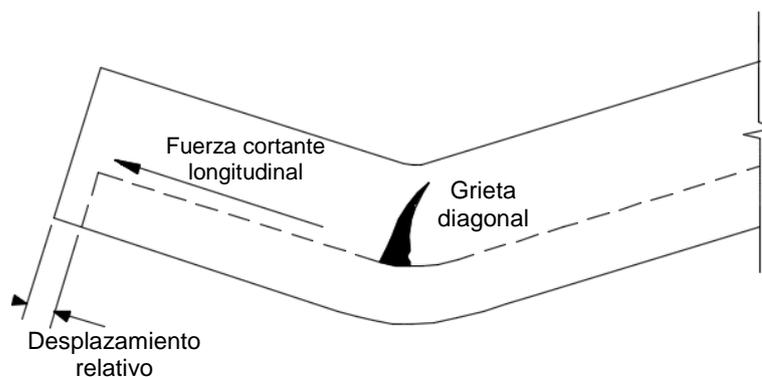


Figura N° 2.22 Fuerza longitudinal en toda la luz rasante.

En el método del trabajo, el cálculo se realiza para la condición en donde el concreto sufre agrietamiento y esta se ha propagado hasta la fibra superior de la sección crítica (punto de aplicación de las cargas). El método permite calcular la variación del esfuerzo cortante longitudinal en el tiempo y está basado en las siguientes suposiciones:

1. El deslizamiento relativo es uniforme a lo largo de la luz rasante.
2. El deslizamiento relativo es predominante en uno de los extremos de la losa, mientras que en el otro extremo el deslizamiento es pequeño y despreciable.
3. La distribución del esfuerzo cortante longitudinal es uniforme a lo largo de la luz rasante.
4. La teoría es válida para desplazamientos pequeños.
5. La curvatura del concreto y de la placa colaborante son iguales.

6. Debido al deslizamiento, existirán dos ejes neutros y por lo tanto la placa colaborante tomará una fracción de la carga debido a la flexión en su propio eje.
7. El trabajo hecho por la fuerza cortante longitudinal puede ser calculado una vez que haya ocurrido el deslizamiento. Antes de eso se asume que la fuerza aumenta linealmente desde cero hasta la fuerza que produce el primer deslizamiento en el extremo. Para dicho propósito se considerará 0.5mm como el inicio del deslizamiento s_i .
8. La placa colaborante tiene un comportamiento elástico hasta alcanzar la carga máxima.

La Figura N° 2.23 representa una gráfica típica de la carga aplicada versus el desplazamiento relativo en el extremo de la losa, y en ella se puede notar una diferencia en el comportamiento de las losas esbeltas y compactas.

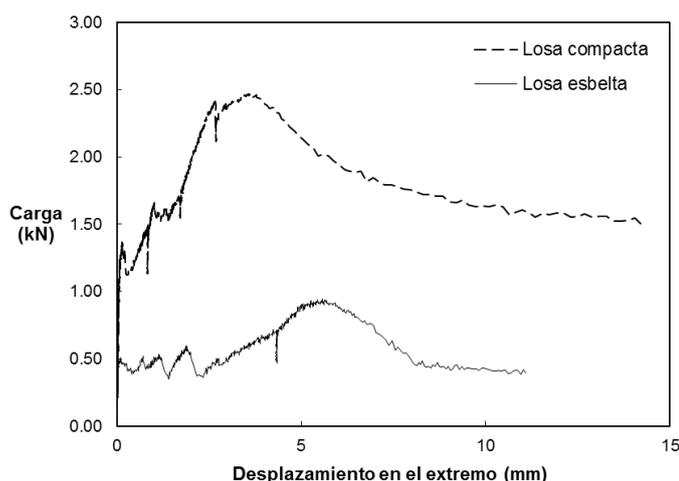


Figura N° 2.23 Gráfica típica del desplazamiento relativo vs carga aplicada para una losa compacta y esbelta.

En la Figura N° 2.24 se muestra la condición agrietada de la losa y el inicio del desplazamiento relativo, y a partir de ella se desarrollarán las formulaciones. Para cualquier instante durante el ensayo, después de que el primer deslizamiento haya ocurrido, el trabajo externo hecho por la carga aplicada y el trabajo interno desde el instante $i - 1$ hasta el instante i pueden ser escritos de acuerdo a la ecuación (2.3) y ecuación (2.4) respectivamente.

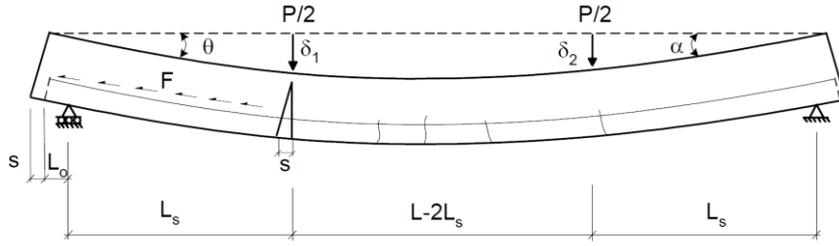


Figura N° 2.24 Condición de la losa al inicio del desplazamiento relativo.

$$W_{ext} = \left(\frac{P_{i-1}}{2} + \frac{\Delta P_i}{4} \right) (\Delta \delta_{1i} + \Delta \delta_{2i}) \quad (2.3)$$

$$W_{int} = \left(F_{i-1} + \frac{\Delta F_i}{2} \right) \Delta s_i + \left(M_{ri-1} + \frac{\Delta M_{ri}}{2} \right) \left(\frac{\Delta \delta_{1i} + \Delta \delta_{2i}}{L_s} \right) \quad (2.4)$$

Donde:

W_{ext} : Trabajo externo.

W_{int} : Trabajo interno.

P_{i-1} : Carga aplicada para el instante " i - 1".

ΔP_i : Incremento de carga para el instante " i ".

$\Delta \delta_{1i}$: Incremento de la deflexión en el punto 1 para el instante " i ".

$\Delta \delta_{2i}$: Incremento de la deflexión en el punto 2 para el instante " i ".

F_{i-1} : Fuerza cortante longitudinal resistente para el instante " i - 1".

ΔF_i : Incremento de la Fuerza cortante longitudinal para el instante " i ".

Δs_i : Incremento del deslizamiento horizontal en el extremo de la losa para el instante " i ".

M_{ri-1} : Momento actuante en la placa colaborante para el instante " i - 1".

ΔM_{ri} : Incremento del momento actuante en la placa colaborante para el instante " i ".

L_s : Luz rasante (Distancia del apoyo al punto de carga aplicada más cercana).

Igualando el trabajo externo e interno ($W_{ext} = W_{int}$), se logra obtener la variación de la fuerza cortante longitudinal de acuerdo a la ecuación (2.5).

$$F_{i-1} + \frac{\Delta F_i}{2} = \frac{\left(\frac{P_{i-1}}{2} + \frac{\Delta P_i}{4} \right) (\Delta \delta_{1i} + \Delta \delta_{2i}) - \left(M_{ri-1} + \frac{\Delta M_{ri}}{2} \right) \left(\frac{\Delta \delta_{1i} + \Delta \delta_{2i}}{L_s} \right)}{\Delta s_i} \quad (2.5)$$

La última expresión puede ser separada en dos partes,

$$F_{i-1} = \left(\frac{P_{i-1}}{2} - \frac{M_{ri-1}}{L_s} \right) \left(\frac{\Delta \delta_{1i} + \Delta \delta_{2i}}{\Delta s_i} \right) \quad (2.6)$$

$$\Delta F_i = 2 \cdot \left(\frac{\Delta P_i}{4} - \frac{\Delta M_{ri}}{2L_s} \right) \left(\frac{\Delta \delta_{1i} + \Delta \delta_{2i}}{\Delta s_i} \right) \quad (2.7)$$

Se debe tener en cuenta que, de acuerdo a la suposición 7, las ecuaciones anteriores descritas son aplicables únicamente cuando el deslizamiento ha ocurrido. Antes del deslizamiento, la losa presenta una interacción total y se considera que la fuerza cortante longitudinal aumenta de manera lineal hasta que se produce el primer deslizamiento en el extremo, el cual es considerado 0.5mm.

A partir de las ecuaciones (2.6) y (2.7), la fuerza cortante longitudinal para el instante i puede ser calculado de acuerdo a la ecuación (2.8) .

$$F_i = F_{i-1} + \Delta F_i \quad (2.8)$$

Debido a que se considera que la placa colaborante se encuentra en el rango elástico hasta alcanzar la carga máxima, el momento puede ser relacionado con la curvatura según la expresión (2.9).

$$\frac{M_r}{E_{sd} I_{sd}} = \frac{1}{R} \quad (2.9)$$

E_{sd} : Módulo de elasticidad de la lámina de acero de la placa colaborante.

I_{sd} : Momento de inercia de la placa colaborante.

R : Radio de curvatura de la losa sometida a flexión.

M_r : Momento actuante en la placa colaborante.

A partir de la geometría mostrada en la Figura N° 2.25 se puede simplificar algunas expresiones en función de los ángulos en cada extremo de la losa, teniendo así las siguientes expresiones.

$$\frac{M_{ri-1}}{E_{sd} I_{sd}} = \frac{1}{R_{i-1}} = \frac{\theta_{i-1} + \alpha_{i-1}}{L - 2L_s} \quad (2.10)$$

$$\frac{\Delta M_{ri}}{E_{sd} I_{sd}} = \left(\frac{1}{R_i} - \frac{1}{R_{i-1}} \right) = \frac{\Delta \theta_i + \Delta \alpha_i}{L - 2L_s} \quad (2.11)$$

Substituyendo $\theta_{i-1} = \delta_{1i-1}/L_s$, $\Delta \theta_i = \delta_{1i}/L_s$, $\alpha_{i-1} = \delta_{2i-1}/L_s$ y $\Delta \alpha_i = \delta_{2i}/L_s$ en las ecuaciones (2.10) y (2.11), y reemplazando los nuevos términos del momento actuante en las expresiones (2.6) y (2.7) se obtiene lo siguiente:

$$M_{ri-1} = \frac{\delta_{1i-1} + \delta_{2i-1}}{L_s(L - 2L_s)} E_{sd} I_{sd} \quad (2.12)$$

$$\Delta M_{ri} = \frac{\Delta \delta_{1i} + \Delta \delta_{2i}}{L_s(L - 2L_s)} E_{sd} I_{sd} \quad (2.13)$$

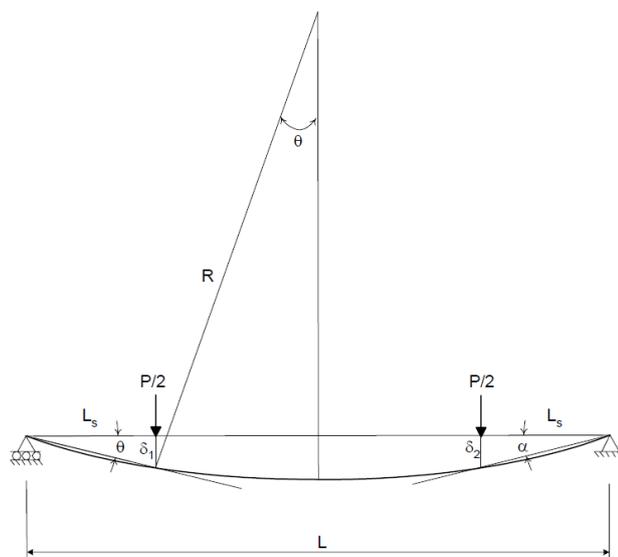


Figura N° 2.25 Deflexión y curvatura de la placa colaborante.
Fuente: Abdullah 2004.

2.3.6 Diseño de losa con placa colaborante

Para el diseño de este tipo de losas con placa colaborante se deberá realizar la verificación del comportamiento para dos condiciones del sistema, estado compuesto y no compuesto.

2.3.6.1 Estado No compuesto

En el estado no compuesto, la placa colaborante debe soportar la carga del concreto fresco y a su vez debe funcionar como una plataforma de trabajo, y esto implica tener que soportar las cargas vivas constructivas y el peso de algunos equipos.

Esfuerzos a tracción en la Placa colaborante: Para el cálculo del esfuerzo se toma en cuenta las combinaciones de carga para el estado de servicio, presentadas en la expresión (2.14) y (2.15) (SDI, 2017), y se escogerá aquella que genere mayores efectos.

$$W_1 = W_{dc} + W_{dd} + W_{lc} \quad (2.14)$$

$$W_2 = W_{dc} + W_{dd} + P_{lc} \quad (2.15)$$

W_{dc} : Peso propio del concreto.

W_{dd} : Peso propio de la placa colaborante.

W_{lc} : Carga constructiva distribuida (20psf o 100kgf/m²).

P_{lc} : Carga constructiva puntual por ancho unitario (150lb/ft o 225kgf/m).

W_D : Carga muerta uniformemente distribuida por unidad de área ($W_{dc} + W_{dd}$).

Para esta condición se considera como esfuerzo admisible de la lámina de acero el 60% del esfuerzo de fluencia, tal como se ve en la ecuación (2.16) y (2.17).

$$\frac{M_{sd}^+}{S_{sd_inf}} \leq 0.60 \cdot f_{sd} \quad (2.16)$$

$$\frac{M_{sd}^-}{S_{sd_sup}} \leq 0.60 \cdot f_{sd} \quad (2.17)$$

Donde:

M_{sd}^+ : Momento flector positivo de la placa colaborante.

M_{sd}^- : Momento flector negativo de la placa colaborante.

S_{sd_inf} : Módulo de sección elástica a tracción de la placa colaborante.

S_{sd_sup} : Módulo de sección elástica a compresión de la placa colaborante.

Deflexión: Para los cálculos no se tomará en cuenta las cargas constructivas, pues estas son consideradas cargas temporales y se asume que, al desaparecer, la placa colaborante recupera su estado inicial. La deflexión admisible, para esta condición, es el mínimo valor entre $L/180$ y 19 mm (SDI, 2017), mostrada en la ecuación (2.18) y será calculada de acuerdo a la expresión (2.19), para un tramo.

$$\delta_{calc} \leq \delta_{adm} = \min\{L/180, 19\text{mm}\} \quad (2.18)$$

$$\delta_{calc} = 0.013 \cdot wL^4 / E_{sd} \cdot I_{sd} \quad (2.19)$$

2.3.6.2 Estado compuesto

Para esta condición, la sección compuesta, está en la capacidad de resistir la carga viva para la cual fue diseñada. En dicho estado se realizará la verificación de los esfuerzos para la condición de servicio. Para el caso de la lámina de acero, el esfuerzo admisible está determinado por el 60% de su esfuerzo de fluencia, tal como se muestra en la ecuación (2.20).

$$\frac{(M_D + M_L) \cdot n}{S_{inf}} \leq 0.60 \cdot f_{sd} \quad (2.20)$$

Para el concreto, el esfuerzo admisible estará limitado por el 45% de su resistencia a compresión, como se describe en la expresión (2.21).

$$\frac{(M_D + M_L)}{S_{inf}} \leq 0.45 \cdot f'_c \quad (2.21)$$

Donde:

M_D : Momento flector producido por la carga muerta.

M_L : Momento flector producido por la carga viva.

n : Relación del módulo de elasticidad del acero y el concreto (E_{sd}/E_c).

S_{inf} : Módulo de sección elástica a tracción de la losa compuesta.

S_{sup} : Módulo de sección elástica a compresión de la losa compuesta.

Deflexión: Según el Steel Deck Institute, considerar una deflexión menor a $L/360$, debida a la carga viva superpuesta, es considerada aceptable (SDI, 2017). Asimismo para este cálculo se determinará el promedio del momento de inercia de la sección agrietada y no agrietada, obtenidas a través del método de la sección transformada, tal como se ve indicada en la ecuación (2.22).

$$\Delta_{calc} = \frac{5}{384} \cdot \frac{(W_D + W_L) \cdot b \cdot L^4}{E_c \cdot I_e} \quad (2.22)$$

Donde:

I_e : Momento de inercia efectiva de la losa compuesta.

E_c : Módulo de elasticidad del concreto.

W_L : Carga viva uniformemente distribuida por unidad de área.

2.3.6.3 Resistencia a flexión de la losa

Según la cuantía de acero de la sección, una losa con placa colaborante puede clasificarse como sobre-reforzada o sub-reforzada y esto influye directamente en la manera de calcular la resistencia a flexión de este tipo de losa.

En el caso de un diseño por factores de carga y resistencia (LRFD⁶), la resistencia a flexión, para una losa sub-reforzada, es calculada como se indica en ecuación (2.23) y ecuación (2.24). Esta expresión es obtenida a partir del método de adherencia, el cual es un caso particular, pues no hay presencia de pernos Nelson Stud en el ala de las vigas metálicas como parte de la conexión con la losa.

$$M_r = \phi_s M_y \quad (2.23)$$

$$M_y = f_{sd} I_{cr} / (h - y_{cc}) \quad (2.24)$$

Donde:

M_r : Momento flector nominal.

f_{sd} : Esfuerzo de fluencia de la lámina de acero.

I_{cr} : Momento de inercia de la sección agrietada.

h : Altura total de la losa.

y_{cc} : Distancia de la fibra más comprimida hasta el eje neutro de la sección agrietada.

⁶ Load and Resistance Factor Design (LRFD) Diseño por Factores de Carga y Resistencia.

ϕ_s : 0.85

Finalmente, el momento nominal debe ser mayor al momento flector último, M_u , tal como se muestra en la expresión (2.25).

$$M_u \leq M_r \quad (2.25)$$

2.3.6.4 Resistencia al corte vertical

La resistencia a corte vertical de la losa con placa colaborante, según el SDI, es calculado de acuerdo a la expresión (2.26), para un diseño por factores de carga y resistencia (LRFD). Asimismo, se indica el corte nominal del concreto mediante la ecuación (2.27).

$$\phi V_n = \phi_v V_c + \phi_s V_D \leq 2 \cdot \phi_v V_c \quad (2.26)$$

$$V_c = 0.53 \sqrt{f'_c} A_c \quad (2.27)$$

Donde:

V_c : Fuerza cortante nominal del concreto (kgf).

V_D : Fuerza cortante nominal de la lámina de acero, según el AISI S100.

A_c : Área efectiva de corte del concreto (cm²).

ϕ_v : 0.75

El área efectiva de corte del concreto se determina según lo mostrado en la Figura N° 2.26, en caso de haber una superposición de áreas se deberá ajustar las proyecciones, de manera que el área obtenida no exceda al máximo que se pueda obtener de la sección, tal como se indica en la Figura N° 2.27.

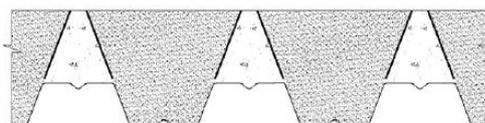


Figura N° 2.26 Área efectiva de corte del concreto.
Fuente: SDI 2017.

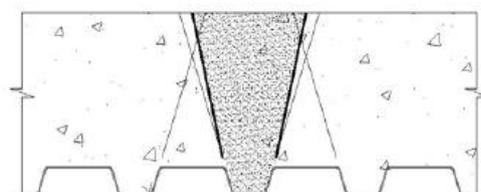


Figura N° 2.27 Superposición de las áreas efectivas de corte.
Fuente: SDI 2017.

Finalmente, la fuerza cortante nominal debe ser mayor a la fuerza cortante última, V_u , tal como se muestra en la expresión (2.28).

$$V_u \leq \phi V_n \quad (2.28)$$

CAPÍTULO III. ESTUDIO EXPERIMENTAL

En este capítulo se describe los ensayos realizados en esta investigación, así como la construcción de los especímenes, el procedimiento y metodología de los ensayos y los resultados obtenidos.

La lista de especímenes está conformada por 15 ensayos a flexión de losas apoyadas en rodillos (simplemente apoyadas), estos fueron construidos variando el tipo de perfil de placa colaborante, espesor y longitud de la losa.

Los experimentos se realizaron en el Laboratorio de Estructuras del CISMID⁷, durante los meses de octubre y noviembre del 2017 se llevaron a cabo los ensayos a flexión.

3.1 Ensayo a flexión

El ensayo a flexión permite estudiar el comportamiento de las losas con placa colaborante y analizar sus modos de falla para las distintas combinaciones de los parámetros geométricos.

Las losas fueron apoyadas sobre rodillos (simplemente apoyadas) y este resulta ser un caso conservador pues todo el corte longitudinal es tomado por la adherencia química y mecánica, y esto es debido a la ausencia de los conectores de cortes en los extremos.

3.1.1 Descripción del ensayo

Los especímenes construidos serán sometidos a ensayos de flexión estática siguiendo las recomendaciones dadas en el Capítulo 3 del ANSI/ASCE 3-91 “Estándar para el diseño estructural de losas compuestas”, en donde se indican la preparación de los especímenes, la instrumentación y la evaluación de los resultados obtenidos en el ensayo.

El tipo de carga será de manera puntual a los tercios, ver Figura N° 3.1, y se irá incrementando hasta llegar al punto de rotura, este aumento progresivo permitirá visualizar la carga de desprendimiento y las deflexiones en cada instante.

⁷ Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID).



Figura N° 3.1 Ensayo a flexión de losas con placa colaborante.

3.1.2 Descripción de los especímenes

Los especímenes fueron construidos en las instalaciones del Laboratorio de estructuras del CISMID por cuestiones de facilidad de traslado a la zona de ensayo y evitar el desprendimiento o algún tipo de daño durante su traslado. Las losas fueron construidas en 3 grupos, 2 vaciados de 6 losas cada una, y finalmente un último vaciado de 3 losas (losas más largas).

Las características de estas losas son descritas en el siguiente listado:

- Las propiedades de los agregados se determinaron según la NTP⁸ y los resultados se muestran en la Tabla N° 3.1.
- Las propiedades geométricas de las losas, como la luz libre, espesor y tipo de perfil, se indican en la Tabla N° 3.2 y Tabla N° 3.3.
- El concreto usado en las losas tiene una resistencia requerida a compresión de 210 kgf/cm², en base a esa condición el diseño de mezcla en volumen es de 1:2:3.3:3.2 (Agua:Cemento:A.Grueso:A.Fino) y con una relación agua/cemento 0.64. Para la verificación de la resistencia del concreto se armaron probetas en cada vaciado y la Tabla N° 3.6 muestra los resultados de los ensayos a compresión.
- El refuerzo de la malla de temperatura es de ¼" y separadas cada 15 cm en ambas direcciones, con un recubrimiento de 2 cm y fijadas en ciertos puntos de la losa para garantizar la horizontalidad. Las varillas con corrugadas y con un esfuerzo de fluencia de 4200 kgf/cm²

Las propiedades físicas de los agregados, granulometría, absorción, pesos unitarios y contenido de humedad (Figura N° 3.2), se obtuvieron a partir de las

⁸ Norma Técnica Peruana (NTP)

recomendaciones dadas por la NTP y se muestra los resultados en el siguiente cuadro.



a) Peso unitario del agregado fino.

a) Prueba de absorción.

Figura N° 3.2 Pruebas realizadas a los agregados.

Tabla N° 3.1 Propiedades físicas de los agregados.

Propiedades	Arena	Piedra
Peso específico (kgf/m ³)	2.21	2.44
Peso unitario suelto (kgf/m ³)	1476.9	1391.1
Peso unitario compactado (kgf/m ³)	-	1507.98
Contenido de humedad (%)	3.85	0.55
Absorción (%)	4.60	0.40
Tamaño máximo nominal	-	3/4"
Módulo de finura	3.60	-

La lista de especímenes se muestra en dos cuadros, separados según el tipo de perfil usado, tanto para el perfil AD-730 como para el perfil AD-600.

Tabla N° 3.2 Características de las losas con el Perfil AD-730.

ID	Calibre	Altura (mm)	Luz libre (m)	Fecha de construcción	Fecha de ensayo
L-001	18	146	2.75	11/07/2017	17/10/2017
L-002		147	3.87	21/07/2017	02/11/2017
L-003		145	4.50	25/07/2017	08/11/2017
L-004		172	2.75	11/07/2017	18/10/2017
L-005		174	3.87	21/07/2017	03/11/2017
L-006		170	4.50	25/07/2017	08/11/2017
L-007		204	2.75	11/07/2017	19/10/2017
L-008		203	3.87	21/07/2017	03/11/2017
L-009		203	4.50	25/07/2017	07/11/2017

Tabla N° 3.3 Características de las losas con el Perfil AD-600.

ID	Calibre	Altura (mm)	Luz libre (m)	Fecha de construcción	Fecha de ensayo
L-010	18	113	2.75	11/07/2017	10/10/2017
L-011		115	3.87	21/07/2017	23/10/2017
L-012		133	2.75	11/07/2017	16/10/2017
L-013		136	3.87	21/07/2017	24/10/2017
L-014		153	2.75	11/07/2017	17/10/2017
L-015		155	3.87	21/07/2017	31/10/2017

La construcción de las losas se realizó siguiendo los procedimientos constructivos mencionados en el Capítulo II, y la secuencia que se llevó a cabo se ven indicados en el siguiente listado:

- Almacenar y proteger la placa colaborante de manera correcta (Figura N° 3.3), hasta la habilitación de las durmientes.
- Nivelación de la superficie de apoyo de las losas, a través de unas durmientes de madera con una separación que varían de 1 a 1.5 metros, tal como se ve en la Figura N° 3.4.
- Ubicación del encofrado lateral de las losas (Figura N° 3.5), con tabloncillos unidos entre sí, mediante puntales, clavos y alambres.
- Se realizó la limpieza de la superficie de la placa colaborante antes de colocar la malla de temperatura (Figura N° 3.6), esto con la finalidad de no afectar la adherencia entre el concreto y la lámina de acero.
- El concreto fue preparado en una mezcladora eléctrica, cuya capacidad es de 5 pie³ (Figura N° 3.7) y se siguió las recomendaciones de vaciado y un correcto vibrado por cada capa (Figura N° 3.8).
- Se realizó extracción de probetas de concreto fresco en cada vaciado (Figura N° 3.9), con la finalidad de conocer la resistencia a compresión del concreto a los 7 y 28 días.
- Se realizó el curado de las losas mediante un curador químico, y se aplicó al día siguiente para mantener la humedad de la losa y poder obtener la resistencia deseada del concreto. Este procedimiento se puede notar en la Figura N° 3.10.



Figura N° 3.3 Almacenamiento de la placa colaborante.



Figura N° 3.4 Nivelación de la superficie de terreno.



Figura N° 3.5 Encofrado lateral.



Figura N° 3.6 Malla de temperatura.



Figura N° 3.7 Preparación del concreto.



Figura N° 3.8 Vaciado del concreto.



Figura N° 3.9 Probetas de concreto.



Figura N° 3.10 Aplicación de curador químico.

Después de construir las losas se debe esperar 28 días como mínimo para realizar el ensayo a flexión, pues se debe esperar que la losa llegue a su máxima resistencia para su puesta en servicio.

Las losas fueron llevadas hasta el interior del laboratorio, esto se realizó con un montacarga eléctrico y como mucho cuidado para evitar daños en la losa. Una vez que se tiene los especímenes en un lugar seguro, se trasladarán una a una hacia la zona de ensayo para realizar la prueba correspondiente. Este procedimiento se puede ver en la Figura N° 3.11.



a) Traslado de la losa.



a) Alineación de la losa.

Figura N° 3.11 Ubicación de la losa para el ensayo a flexión.

3.1.3 Sistema de carga y medición

La configuración de los mecanos, vigas y accesorios metálicos, será la misma para el ensayo de todas las losas, a excepción de las vigas metálicas que sirven de apoyos, que irán variando de acuerdo a la luz libre de cada espécimen.

3.1.3.1 Equipos

Control de presión hidráulica

Es un equipo con el que se regula la variación de carga mediante el incremento de presión, y esto se logra a través de válvulas que permiten el paso del fluido oleo hidráulico (aceite). Este control se conecta directamente al gato hidráulico para transmitir la carga por presión.

Gato hidráulico

Para la realización de este ensayo se montó un aparato de carga con un gato hidráulico de 50tf de capacidad de carga. Este gato hidráulico fue sujeto a un riel que transfiere la carga a dos puntos sobre la viga a través de rodillos de manera que se ubican en los tercios de la luz.

A través de la celda de carga se puede medir la variación de la fuerza durante el ensayo y esto puede ser recibido por el adquirente de datos.

Transductores

Para realizar las mediciones se usaron Transductores Diferenciales de Variación Lineal (LVDT), que es un equipo electromecánico usado para transformar movimientos rectilíneos en una corriente eléctrica variable o voltajes.

Para el ensayo se usaron transductores con recorridos máximos de 5cm, 10cm y de manera excepcional los de 20cm para las losas más esbeltas.

Adquisidor de datos

Cada sensor (transductor) fue conectado a un amplificador de señales que acondicionó la señal de cada sensor a los niveles requeridos para ser transformados en un convertidor análogo digital Kyowa que introdujo las señales al computador para ser registradas y almacenadas, como se muestra en la Figura N° 3.12.

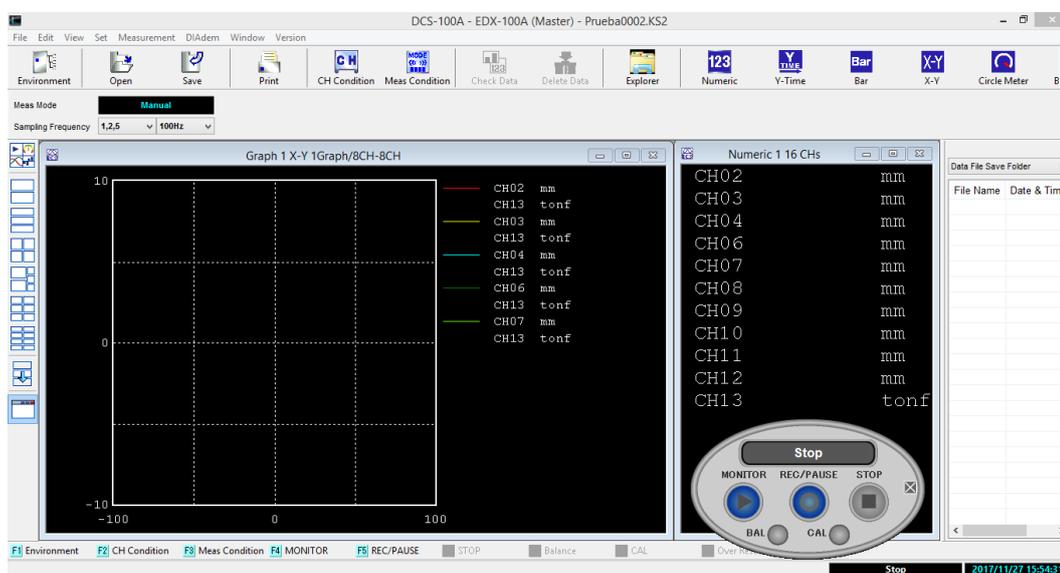


Figura N° 3.12 Programa usado para la adquisición de datos.

A manera de resumen, se muestra en la Figura N° 3.13 la disposición de los equipos mencionados.

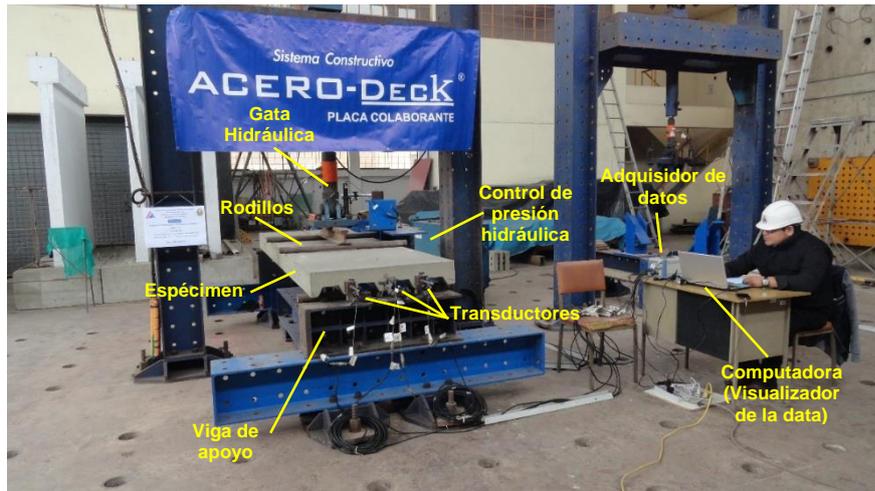


Figura N° 3.13 Distribución de los equipos en el ensayo a flexión.

3.1.3.2 Instrumentación del espécimen

Se ubicaron 12 transductores a lo largo de todo el espécimen y esto se muestra en el Figura N° 3.14 y se hace una descripción de cada uno de ellos en la Tabla N° 3.4.

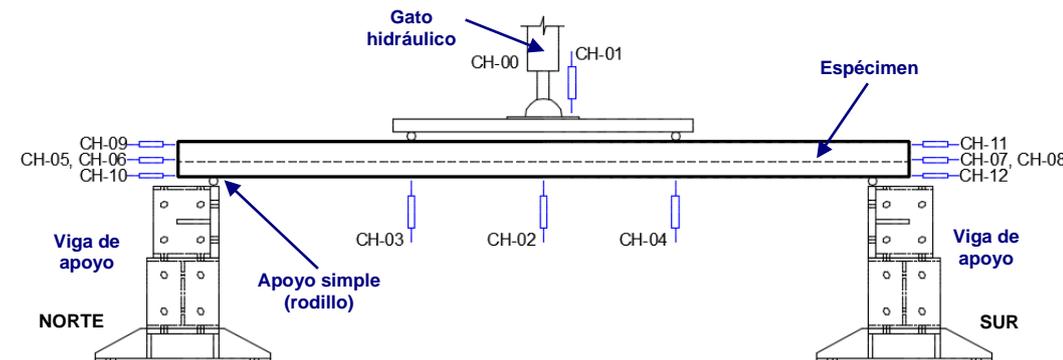


Figura N° 3.14 Ubicación de los transductores (canales).

Tabla N° 3.4 Descripción de los canales.

Canal	Descripción
CH-00	Celda de carga
CH-01	Transductor vertical superior central
CH-02	Transductor vertical inferior central
CH-03	Transductor vertical inferior en el tercio izquierdo
CH-04	Transductor vertical inferior en el tercio derecho
CH-05	Transductor adherido a la cara izquierda de la losa
CH-06	Transductor adherido a la cara izquierda de la losa
CH-07	Transductor adherido a la cara derecha de la losa
CH-08	Transductor adherido a la cara derecha de la losa

Canal	Descripción
CH-09	Transductor lateral superior izquierdo
CH-10	Transductor lateral inferior izquierdo
CH-11	Transductor lateral superior derecho
CH-12	Transductor lateral inferior derecho

3.1.4 Resultados

La secuencia de los ensayos se realizó en función a la luz libre de cada espécimen, es decir se empezó por aquellas losas que tenían una luz libre de 2.75 m, luego las losas con 3.87 m y finalmente aquellas con 4.5m.

El tipo de ensayo y la variación de la carga se hizo de acuerdo a lo mencionado anteriormente, pasando por el punto de desprendimiento de la placa colaborante y finalmente llegar hasta la falla última. En la Figura N° 3.15 se muestra el sistema de carga de la losa en su estado inicial.



Figura N° 3.15 Ensayo a flexión de las losas con placa colaborante.

A continuación, se mostrará las curvas de carga vs desplazamiento central (CH-00 y CH-02 respectivamente) para cada losa y serán agrupadas según la luz libre y el tipo de perfil (AD-730 o AD-600).

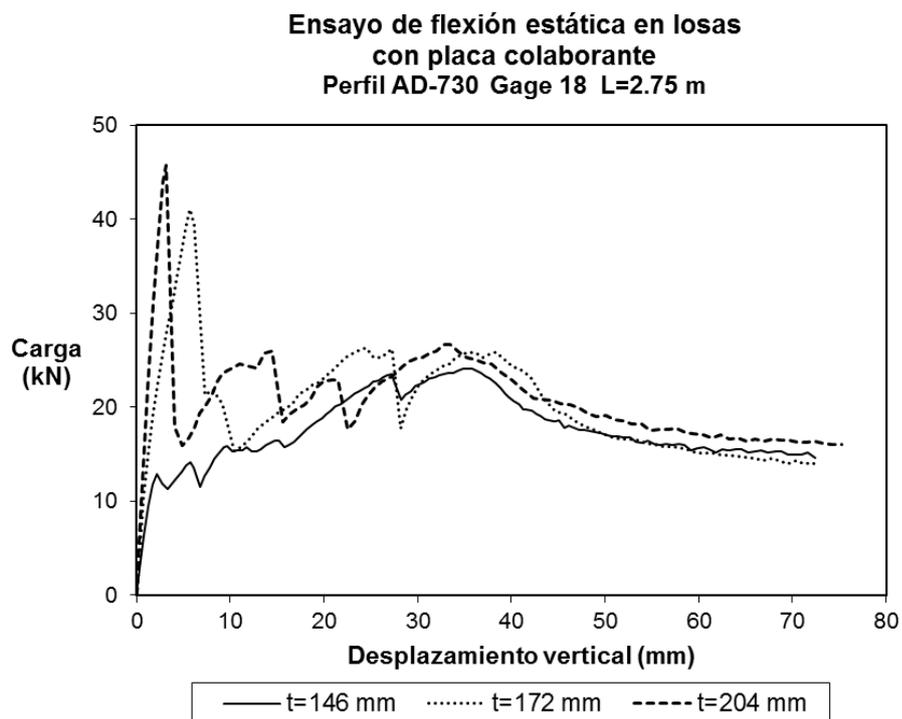


Figura N° 3.16 Ensayo de flexión de los especímenes L-001, L-004 y L-007 con altura de losa (t) 146, 172 y 204 mm respectivamente.

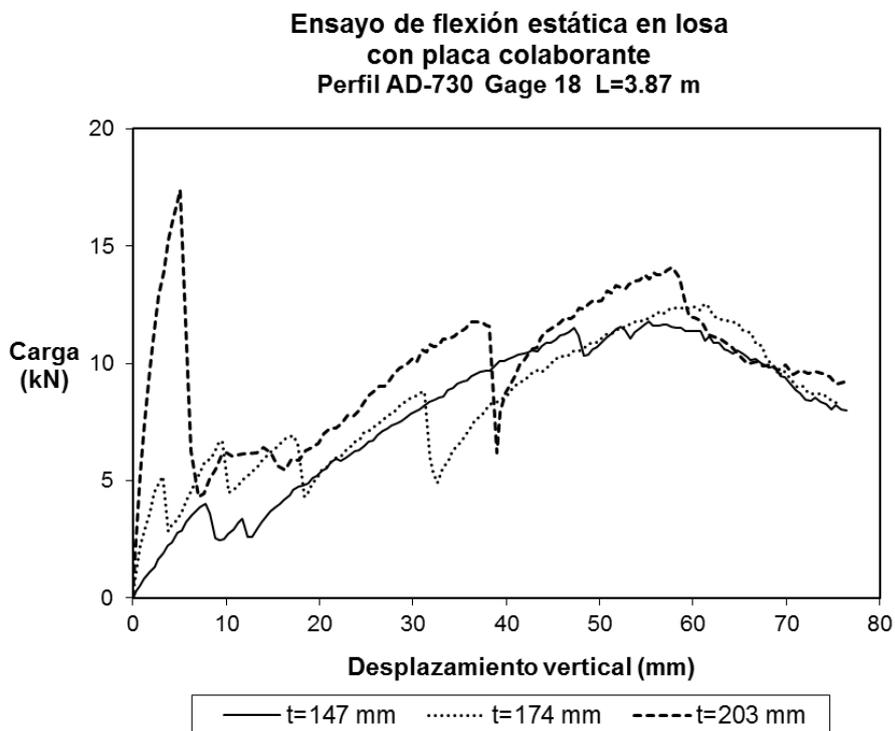


Figura N° 3.17 Ensayo de flexión de los especímenes L-002, L-005 y L-008 con altura de losa (t) 147, 174 y 203 mm respectivamente.

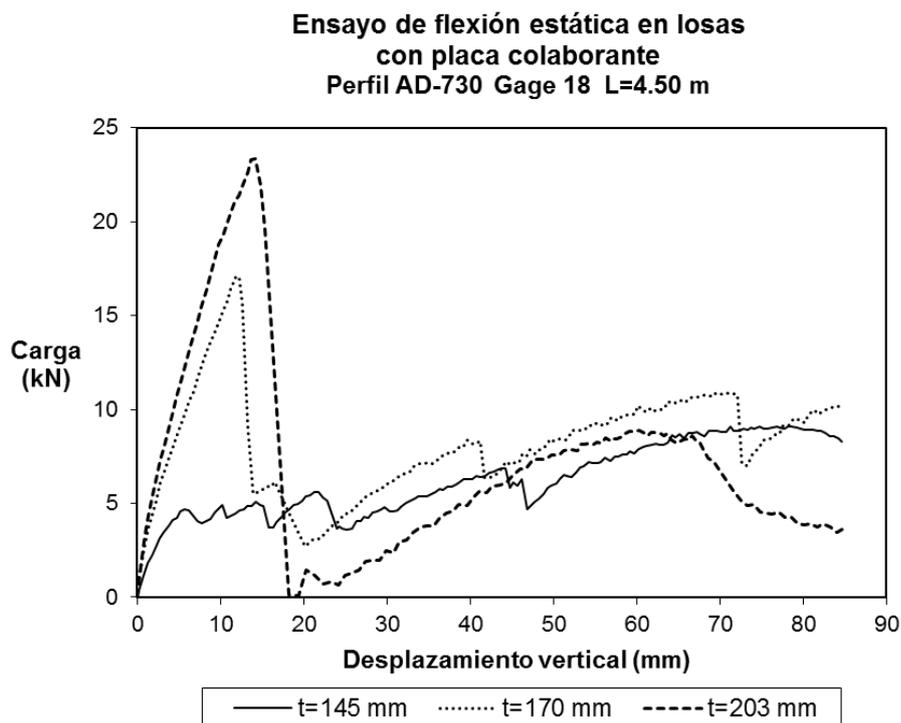


Figura N° 3.18 Ensayo de flexión de los especímenes L-003, L-006 y L-009 con altura de losa (t) 145, 170 y 203 mm respectivamente.

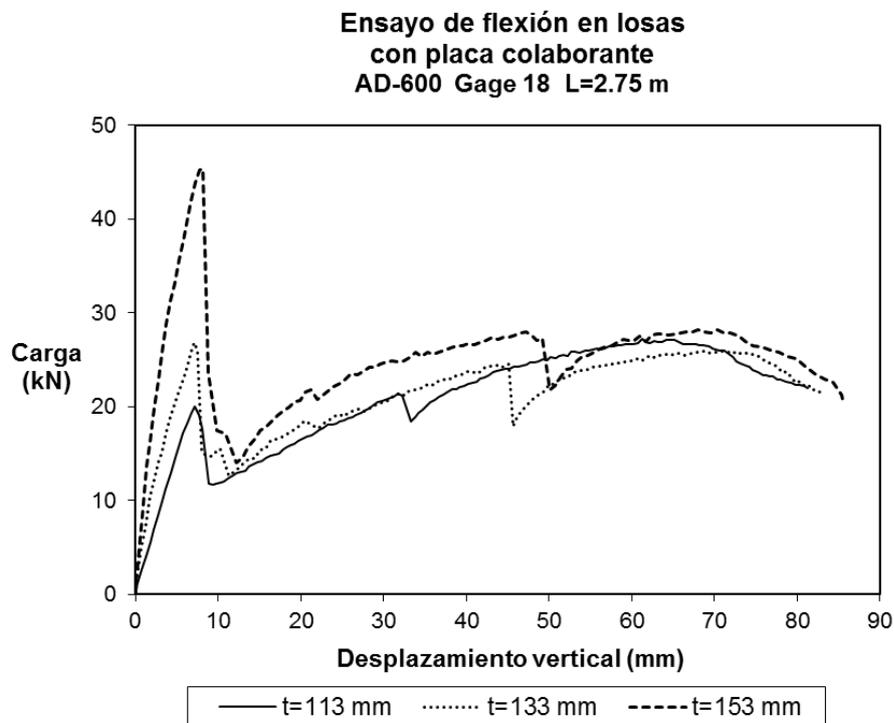


Figura N° 3.19 Ensayo de flexión de los especímenes L-010, L-012 y L-014 con altura de losa (t) 113, 133 y 153 mm respectivamente.

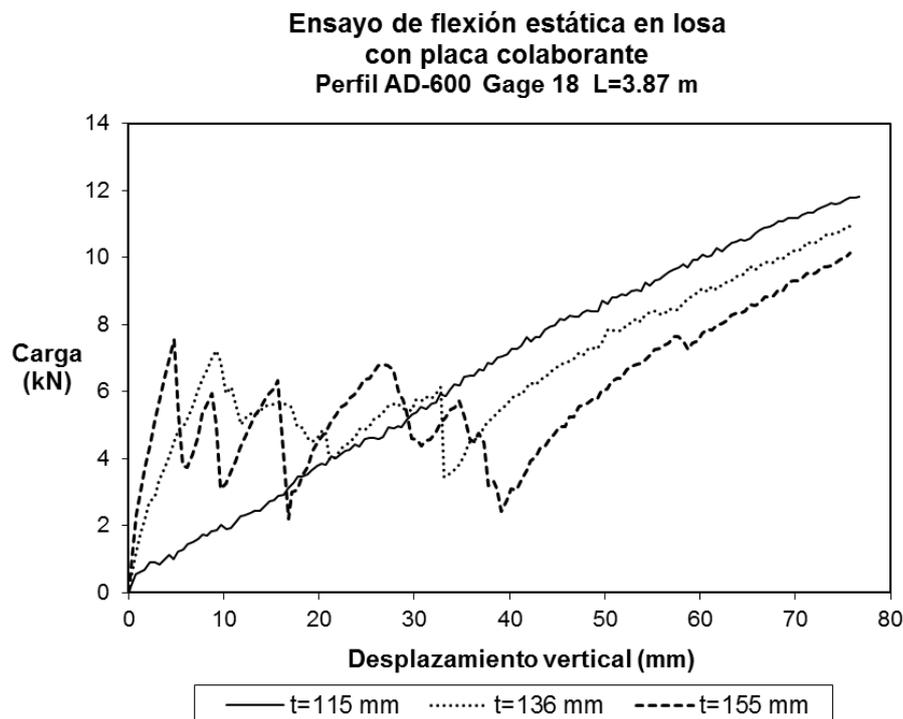


Figura N° 3.20 Ensayo de flexión de los especímenes L-011, L-013 y L-015 con altura de losa (t) 115, 136 y 155 mm respectivamente.

En el espécimen L-011 ($t=115$ mm) no se aprecia el punto de desprendimiento, como en los demás casos y esto es debido a la esbeltez de la losa ($t/L=0.03$), lo cual hace pensar que el tipo de falla que predomina en este caso particular, es la falla por flexión, a diferencia de las demás que presentan una falla por cortante longitudinal.

3.2 Medición de desplazamientos relativos

La medición de los desplazamientos relativos, entre el concreto y la placa colaborante, se realizó de manera paralela al ensayo a flexión estática, pues este efecto hace que el desplazamiento vaya en aumento desde que ocurre el primer desprendimiento.

3.2.1 Descripción de la medición

Para realizar las mediciones se usaron Transductores Diferenciales de Variación Lineal (LVDT) con recorridos máximos de 5cm, la posición inicial de este instrumento permitirá posibles lecturas de ± 2.5 cm. El proceso de instrumentación se visualiza desde la Figura N° 3.21 hasta la Figura N° 3.26, y este procedimiento se realizó antes del ensayo a flexión y se replicó para todas las losas en mención.



Figura N° 3.21 Habilitación de los ángulos de aluminio.



Figura N° 3.22 Orientar correctamente los transductores para la medición.



Figura N° 3.23 Aplicación del pegamento en la plancha metálica.



Figura N° 3.24 Fijación de la plancha metálica en la cara lateral de la losa.



Figura N° 3.25 Aplicación del pegamento en el ángulo de aluminio.



Figura N° 3.26 Fijación de los ángulos de aluminio en la placa colaborante.

El esquema de la instrumentación se observa en la Figura N° 3.27 y la posición inicial del transductor de desplazamiento, antes del ensayo a flexión, se muestra en la Figura N° 3.28.

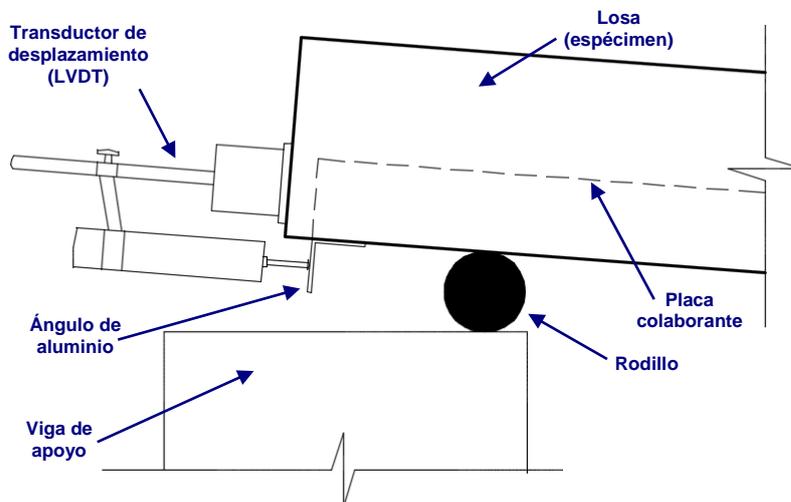


Figura N° 3.27 Instrumentación para la medición de los desplazamientos relativos.

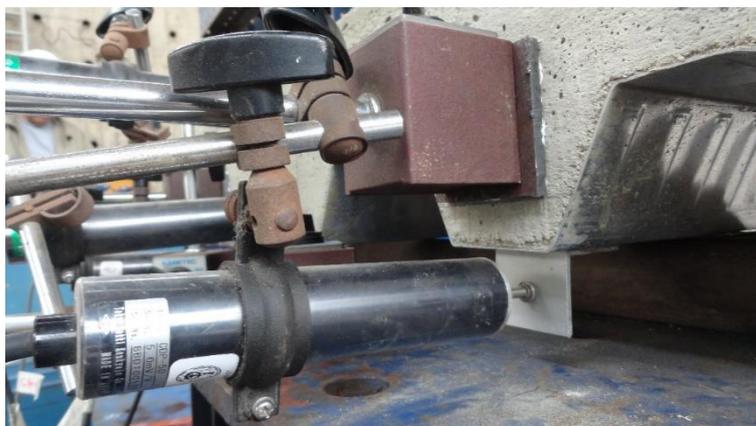


Figura N° 3.28 Posición inicial del Transductor de desplazamiento (LVDT).

3.2.2 Ubicación de los Transductores de medición

En la Tabla N° 3.4 se mostró la disposición de los transductores de desplazamientos, y se describieron los 4 canales que miden los desplazamientos relativos (CH-05, CH-06 en la cara Norte y CH-07 y CH-08 en la cara Sur). La posición de estos canales variará de acuerdo al tipo de perfil, pues la geometría y cantidad de valles es distinta. La distribución de los transductores se visualiza en la Figura N° 3.29 y Figura N° 3.30, para los perfiles AD-600 y AD-730 respectivamente.

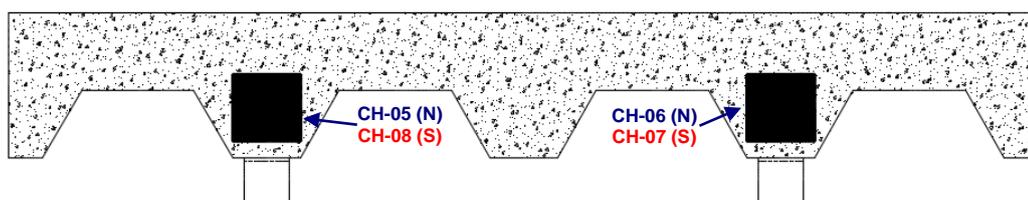


Figura N° 3.29 Distribución de transductores en losas con el Perfil AD-600.

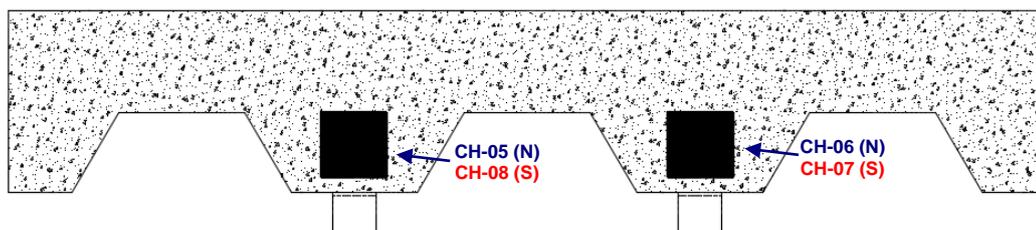


Figura N° 3.30 Distribución de transductores en losas con el Perfil AD-730.

3.2.3 Resultados

En la Figura N° 3.31 se muestra una medición manual del desplazamiento relativo en el extremo de la losa, y esta es realizada en el estado final de la losa ensayada. Para todos los especímenes ensayados se visualiza que dicho desplazamiento relativo es mayor en uno de los extremos, lo cual es correcto según el esquema de colapso de este tipo de losas con placa colaborante.



Figura N° 3.31 Desplazamiento relativo final entre el concreto y la placa colaborante.

A continuación, se presentará todas las curvas de Desplazamiento relativo vs Carga aplicada, datos que fueron medidos por los transductores y por las celdas de carga respectivamente. Además, solo se mostrarán resultados de una cara, Norte (CH-05, CH-06) o Sur (CH-07, CH-08), dependiendo en cual se produce un

mayor deslizamiento, pues a partir de ella se aplicará los procedimientos mencionados en la sección 2.3.5.2.

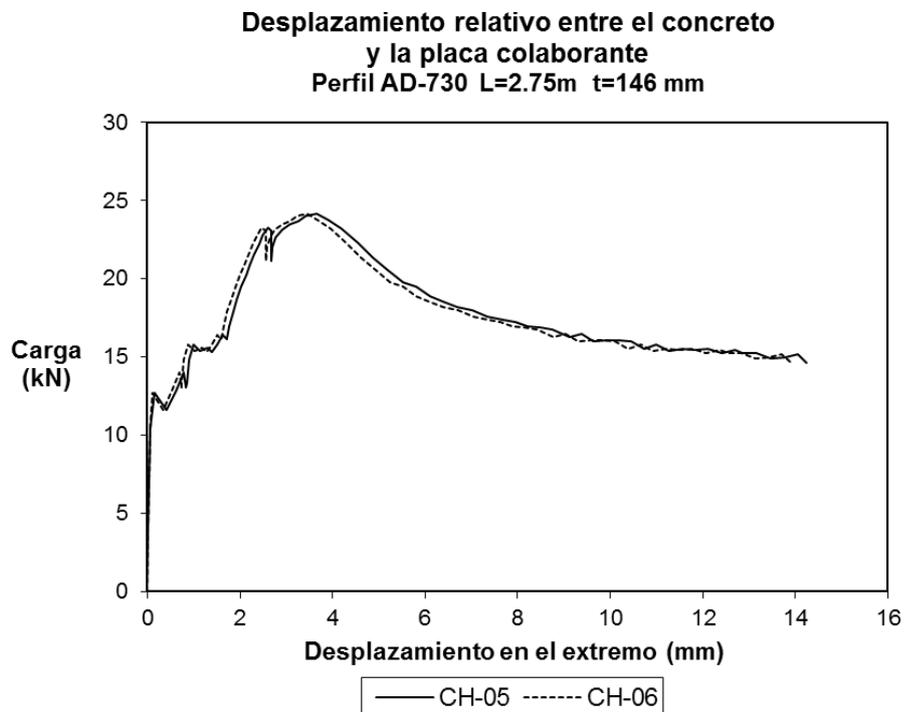


Figura N° 3.32 Desplazamiento relativo en la cara Norte del espécimen L-001.

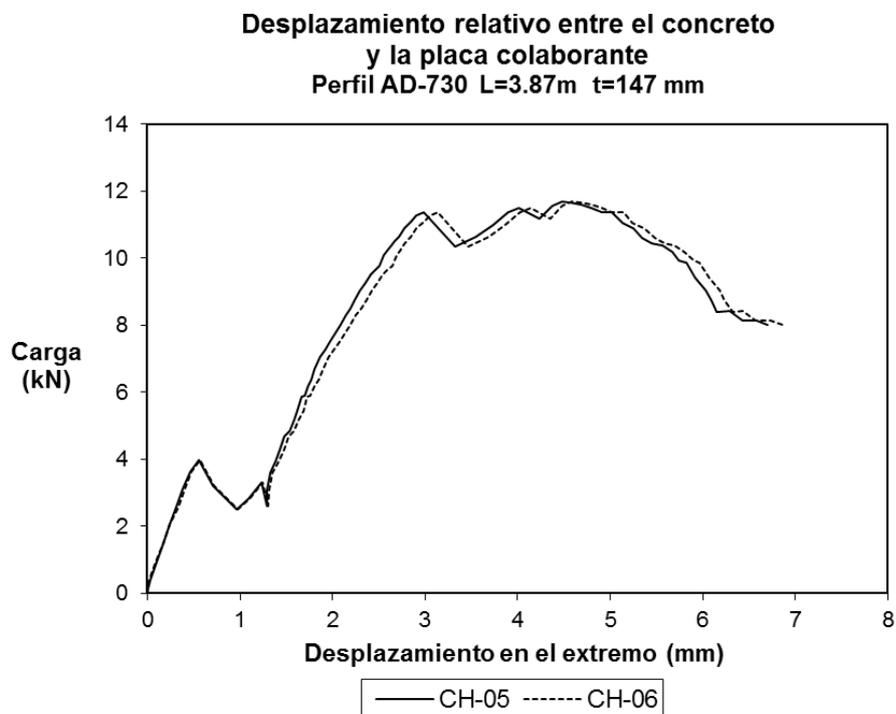


Figura N° 3.33 Desplazamiento relativo en la cara Norte del espécimen L-002.

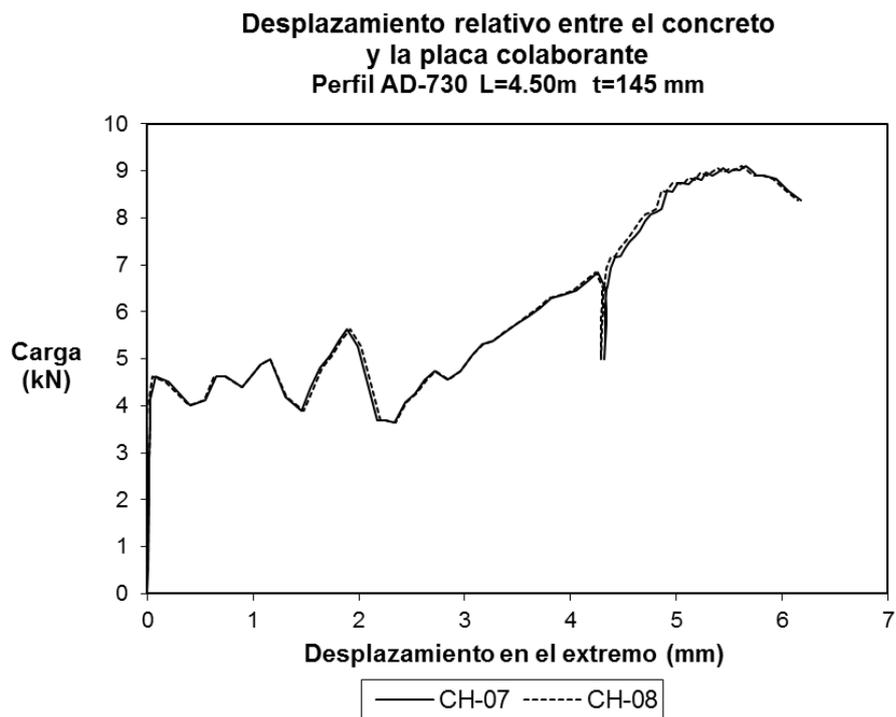


Figura Nº 3.34 Desplazamiento relativo en la cara Sur del espécimen L-003.

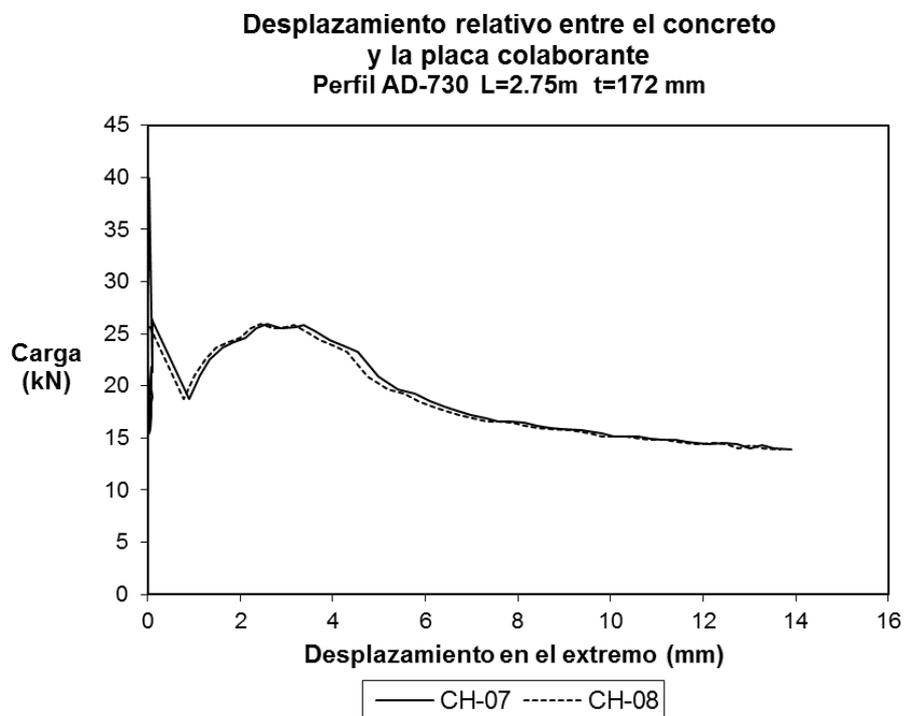


Figura Nº 3.35 Desplazamiento relativo en la cara Sur del espécimen L-004.

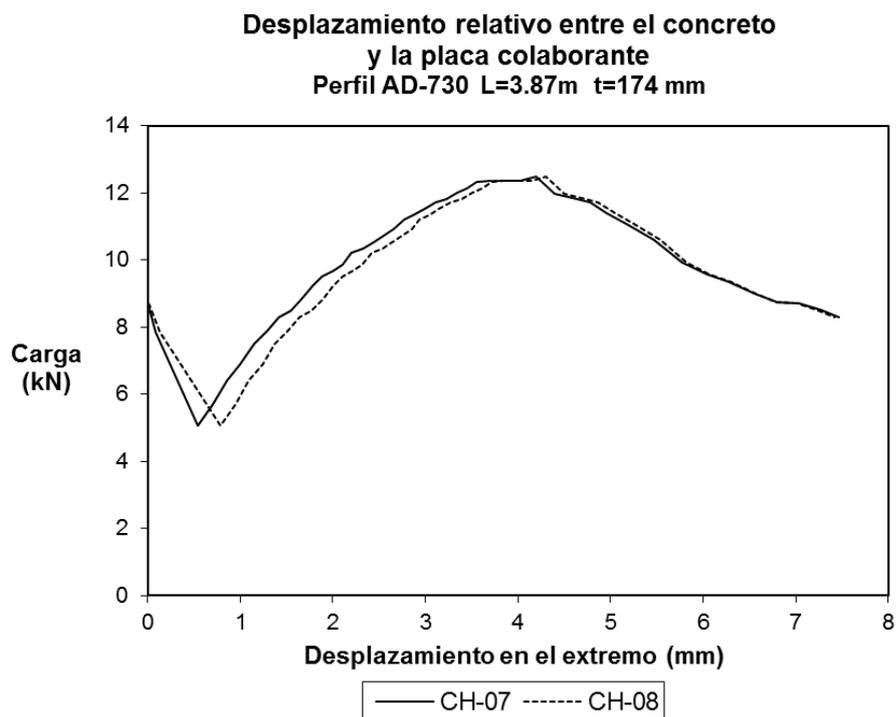


Figura Nº 3.36 Desplazamiento relativo en la cara Sur del espécimen L-005.

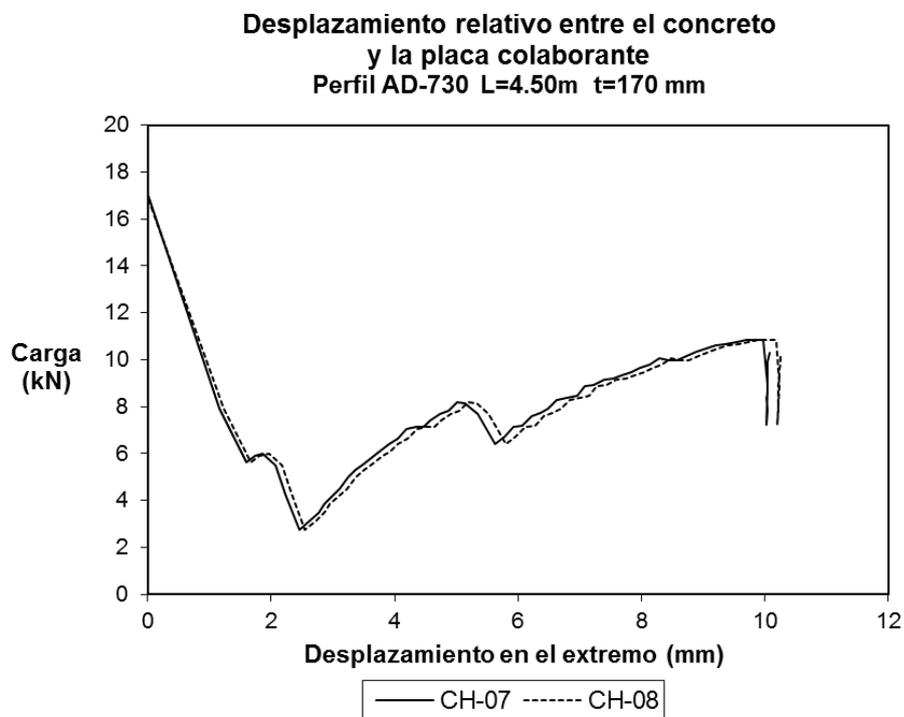


Figura Nº 3.37 Desplazamiento relativo en la cara Sur del espécimen L-006.

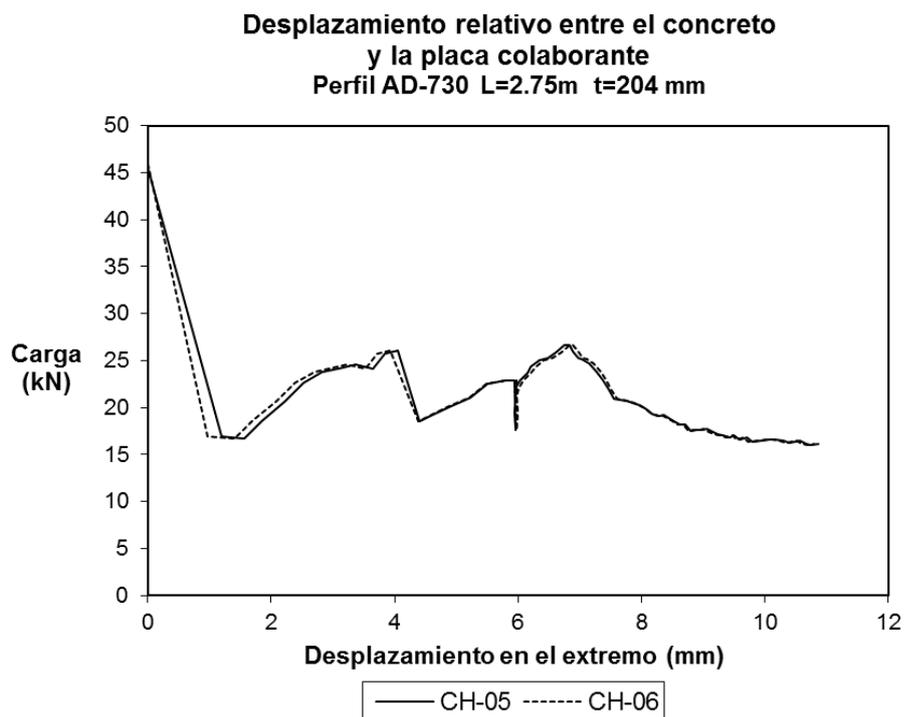


Figura N° 3.38 Desplazamiento relativo en la cara Norte del espécimen L-007.

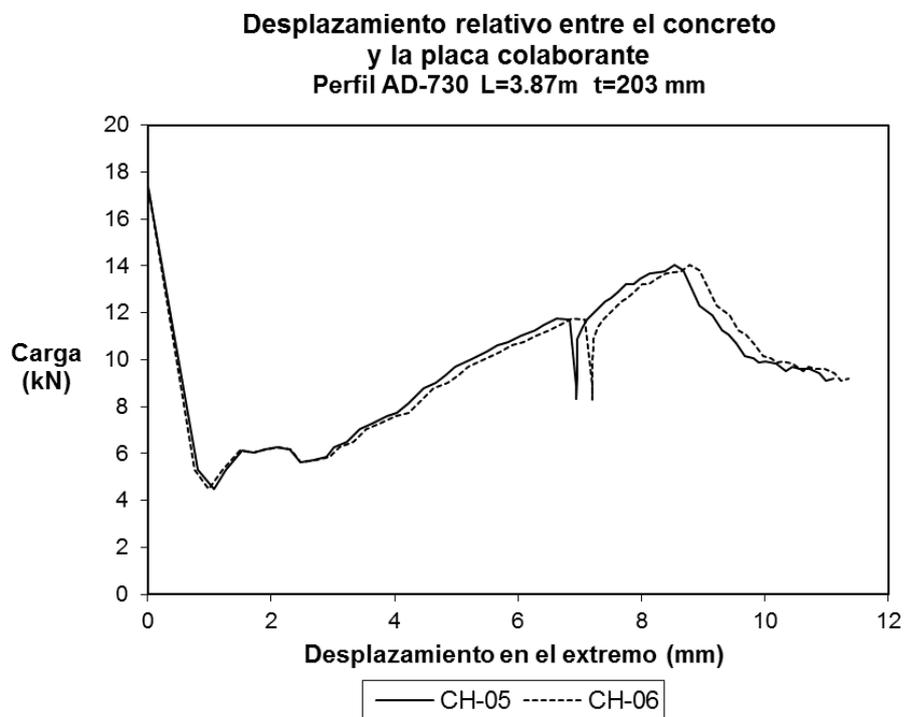


Figura N° 3.39 Desplazamiento relativo en la cara Norte del espécimen L-008.

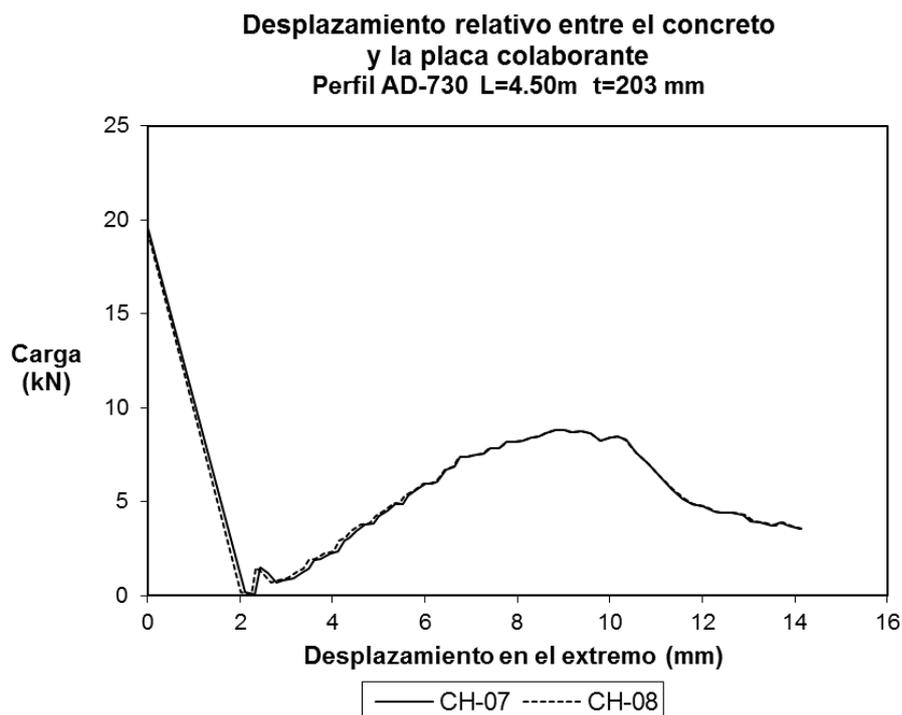


Figura N° 3.40 Desplazamiento relativo en la cara Sur del espécimen L-009.

Se puede observar que en los especímenes L-001 al L-009, losas con el perfil AD-730, los desplazamientos obtenidos por los canales CH-05, CH-06 y CH-07, CH-08 son similares y sería correcto usar el promedio para análisis posteriores.

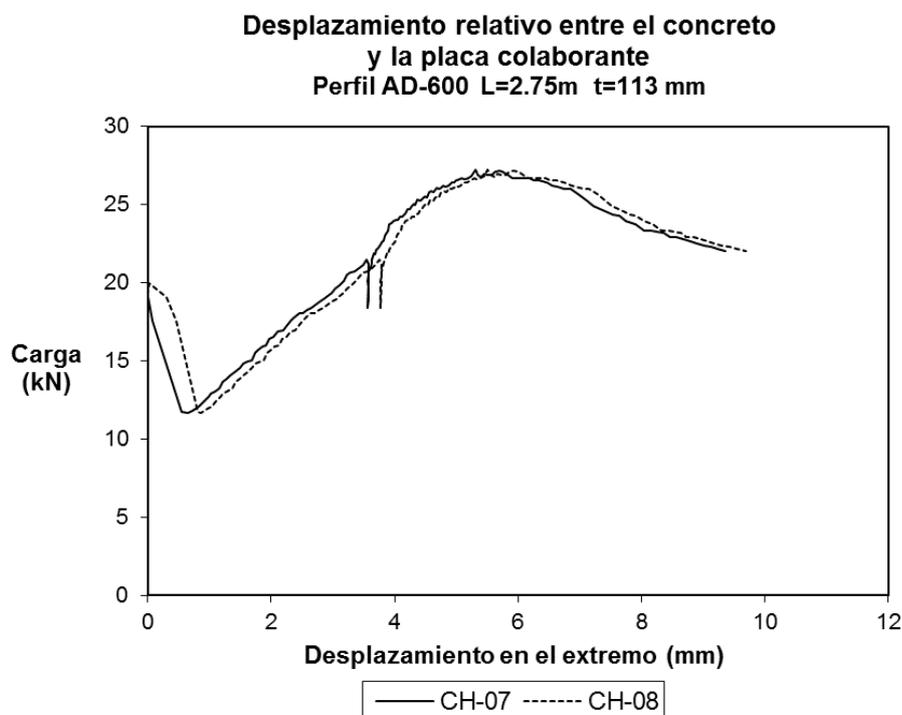


Figura N° 3.41 Desplazamiento relativo en la cara Sur del espécimen L-010.

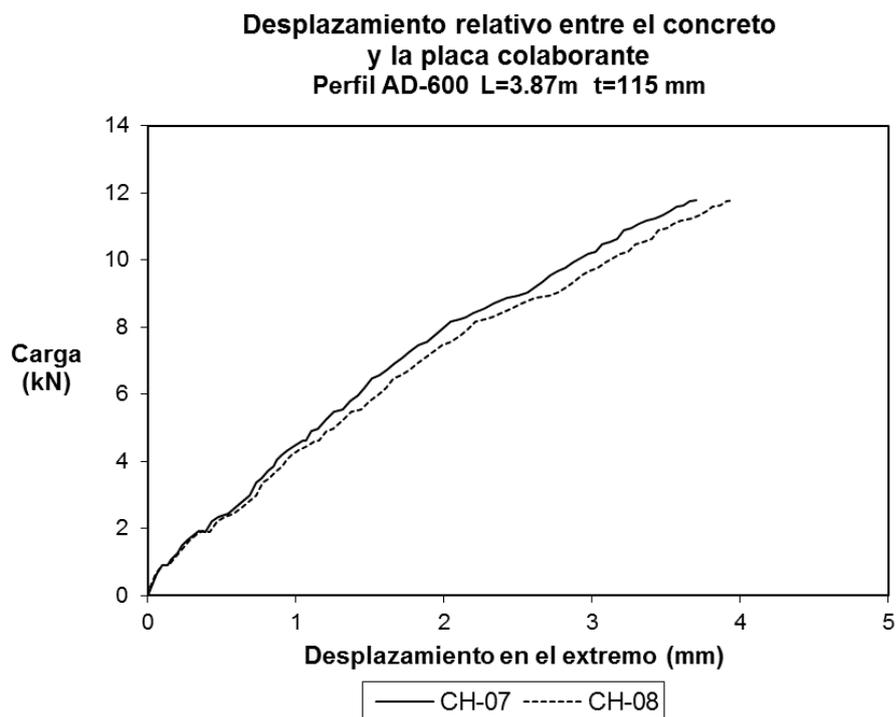


Figura N° 3.42 Desplazamiento relativo en la cara Sur del espécimen L-011.

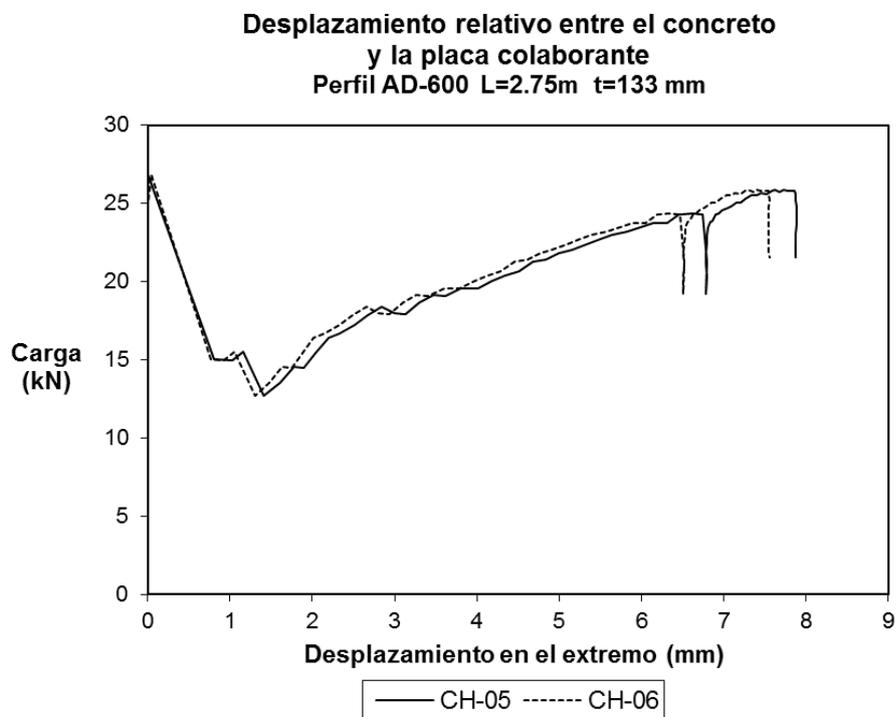


Figura N° 3.43 Desplazamiento relativo en la cara Norte del espécimen L-012.

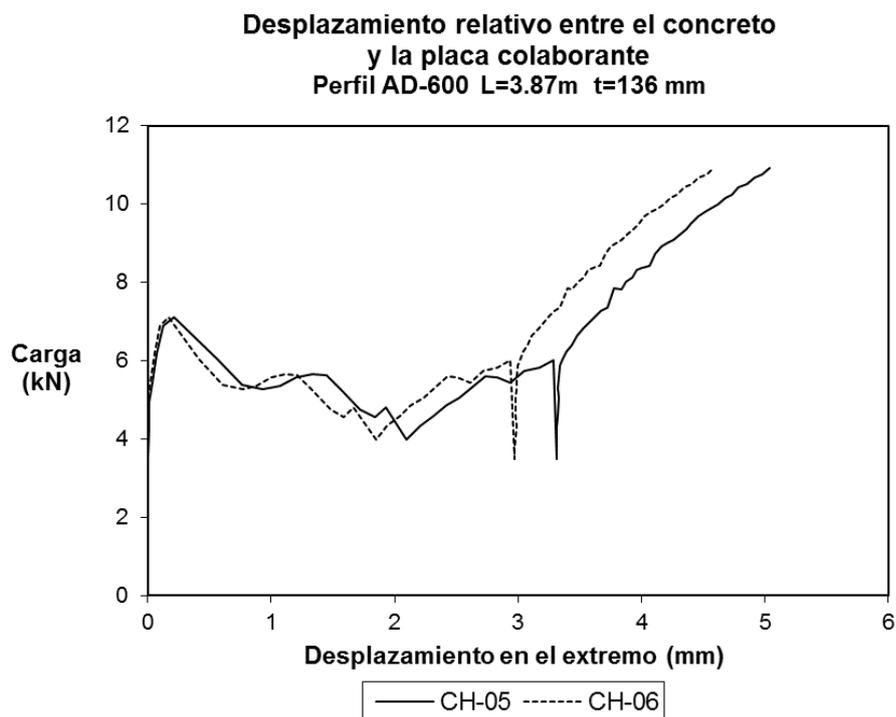


Figura N° 3.44 Desplazamiento relativo en la cara Norte del espécimen L-013.

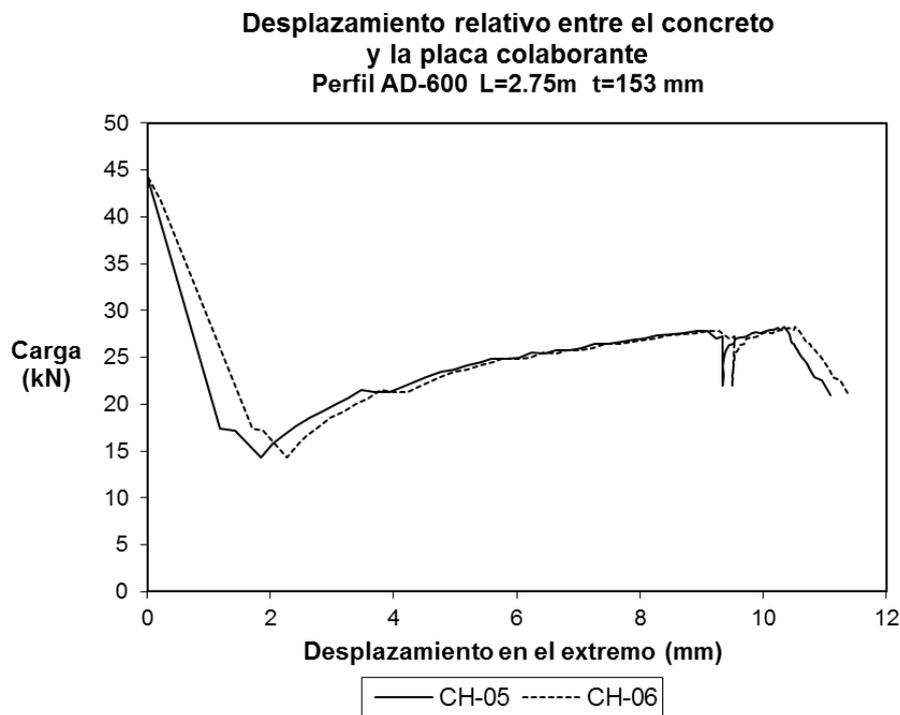


Figura N° 3.45 Desplazamiento relativo en la cara Norte del espécimen L-014.

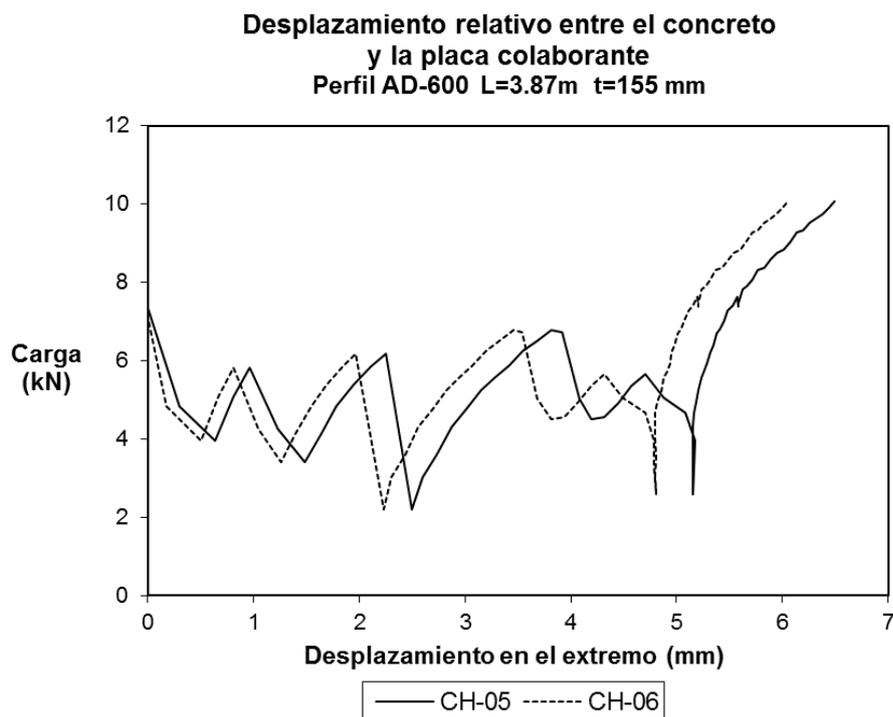


Figura N° 3.46 Desplazamiento relativo en la cara Norte del espécimen L-015.

En gran parte de los gráficos mostrados se ve una similitud en las mediciones obtenidas por los dos transductores ubicados en una misma cara, es por ello que, para aplicar el Método del Trabajo se tomará en cuenta el promedio de ambos desplazamientos relativos.

3.3 Ensayos de los materiales

3.3.1 Concreto

En cada vaciado de concreto se prepararon probetas para posteriormente, a los 7 o 28 días, realizar el ensayo a compresión axial de los especímenes y obtener la resistencia a compresión del concreto. En la Tabla N° 3.5 se muestra las losas que corresponden a cada uno de los tres vaciados y de donde se obtuvieron las muestras de concreto.

Tabla N° 3.5 Listado de los vaciados realizados

Secuencia de vaciado	Losas vaciadas	Fecha de preparación
1er Vaciado	L-001, L-004, L-007, L-010, L-012 y L-014	11/07/2017
2do vaciado	L-002, L-005, L-008, L-011, L-013 y L-015	21/07/2017
3er Vaciado	L-003, L-006 y L-009	25/07/2017

Para la construcción de las probetas se siguió las recomendaciones mencionadas en la NTP 339.033 (2015) “*Práctica normalizada para la elaboración y curado de especímenes de concreto en campo*”. Los procedimientos llevados a cabo se pueden ver en la Figura N° 3.47.



a) Vaciado de las probetas.



a) Curado de las probetas de concreto.

Figura N° 3.47 Preparación de las probetas de concreto.

La preparación y ensayo de los especímenes se ve en la Figura N° 3.48 y los resultados de las resistencias a compresión, a los 28 días, se muestran en la Tabla N° 3.6.



a) Refrentado de la probeta.



a) Ensayo de la probeta.

Figura N° 3.48 Ensayo a carga axial de probetas de concreto.

Tabla N° 3.6 Resistencia a compresión del concreto.

Especímenes	f'_c (28 días) MPa (Kgf/cm ²)
1er Vaciado	24.52 (250)
2do vaciado	25.79 (263)
3er Vaciado	23.34 (238)

3.3.2 Lámina de acero

Las muestras se obtuvieron de las bobinas de acero galvanizado, y el ensayo a tracción de las probetas se realizó en el Laboratorio N° 4 de la Facultad de Mecánica, siguiendo los procedimientos del ASTM A370 "Métodos de pruebas normalizadas y definiciones para ensayos mecánicos de productos de acero". Las dimensiones de las probetas se ven en la Figura N° 3.49 y Figura N° 3.50.

A (mm)	B (mm)	C (mm)	G (mm)	R (mm)	W (mm)
60	50	20	50 ± 0.1	13	12.5 ± 0.25

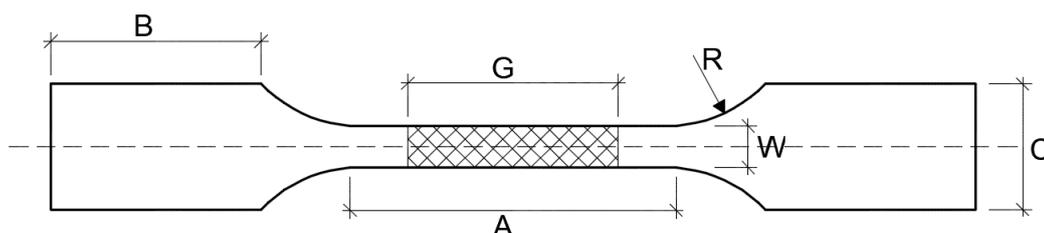


Figura N° 3.49 Dimensiones de las probetas según ASTM A370.

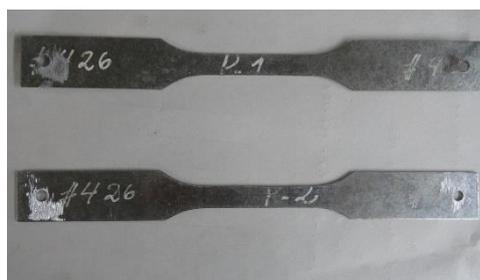


Figura N° 3.50 Probetas de lámina de acero.

Se ensayaron las 2 probetas hasta llegar a la rotura, y en la Figura N° 3.51 se aprecia el estado previo y final de cada muestra. El resultado del ensayo a tracción se ve resumido en la Tabla N° 3.7.



a) Ubicación de la probeta.



a) Resultado final del ensayo.

Figura N° 3.51 Ensayo a tracción de probetas de acero.

Tabla N° 3.7 Resultado de los ensayos a tracción.

ID	Espesor (mm)	Esfuerzo fluencia MPa (Kgf/cm ²)	Esfuerzo rotura MPa (Kgf/cm ²)	Elongación (%)
Muestra 1	0.94	360.88 (3680)	394.23 (4020)	31.1
Muestra 2	1.26	346.17 (3530)	384.42 (3920)	26.3

CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En este capítulo se mostrará a detalle los procedimientos que se han llevado a cabo para obtener los resultados más importantes, como es identificar el comportamiento de las losas con placa colaborante y determinar el esfuerzo resistente al corte por adherencia a partir del ensayo a flexión.

4.1 Ensayo a flexión

En los ensayos realizados se puede notar que hay comportamiento similar en las curvas desplazamiento vs carga aplicada, es decir en casi todos los casos existe una transición por un punto de desprendimiento, inicio de la separación entre el concreto y la placa colaborante, para posteriormente dar paso a la sobrerresistencia que variará según sus propiedades geométricas (esbeltez y cuantía), en algunos casos sobrepasará la carga de desprendimiento y en otras estará por debajo.

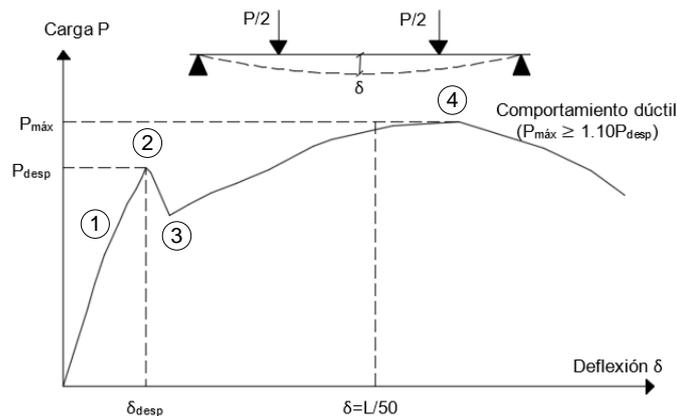


Figura N° 4.1 Comportamiento dúctil de la losa con placa colaborante.

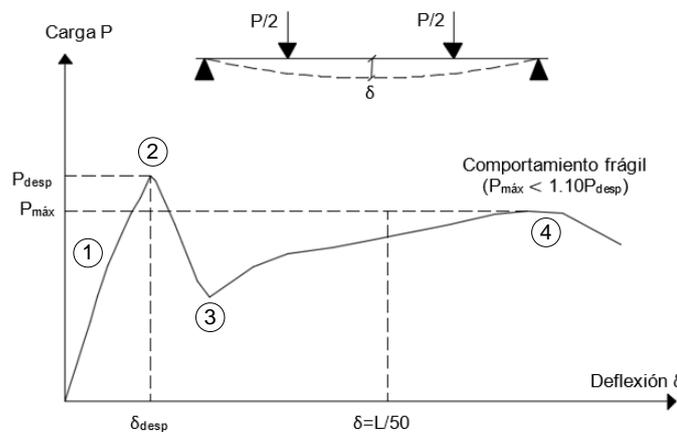


Figura N° 4.2 Comportamiento frágil de la losa con placa colaborante.

En las Figura N° 4.1 y Figura N° 4.2 se pueden identificar cuatro puntos de transición en la curva de comportamiento, las cuales representan el mismo fenómeno en ambos casos y por ello se puede dar una definición generalizada.

Punto 1: Inicia el agrietamiento del concreto en la zona de tracción del concreto. El concreto ubicado entre los valles del perfil empieza a fisurarse.

Punto 2: Inicia el desprendimiento entre la placa colaborante y el concreto. Se empieza a visualizar el desplazamiento relativo en el extremo de la losa.

Punto 3: Interacción nula entre el concreto y la placa colaborante. En este punto cada elemento trabaja de manera independiente, siendo la resistencia de la losa como la suma lineal de los dos elementos

Punto 4: Resistencia última de la losa. La placa colaborante es la que toma toda la carga aplicada a través de su propio eje.

En la sección 2.3.3 se explicó los tipos de comportamiento según el tipo de rotura, y para ello es importante determinar la carga de rotura y asimismo verificar si esta ocurre dentro de la deflexión límite $L/50$ o de lo contrario aplicar lo mencionado en el Eurocódigo 4.

Los resultados de los ensayos a flexión de las losas con el Perfil AD-730 se muestra en la Tabla N° 4.1 y se indican las características de cada espécimen, la carga de desprendimiento y la carga de rotura, para finalmente mostrar el tipo de comportamiento que tienen esta primera lista de especímenes. Las cargas de desprendimiento de las losas L-002, L-003 y L-005 son muchos menores y deberán ser tratadas de manera independiente.

Tabla N° 4.1 Resultados del tipo de comportamiento para el perfil AD-730.

ID	Perfil	Calibre	Luz libre (m)	Altura (mm)	$P_{\text{despren.}}$ (kN)	P_{rotura} (kN)	Tipo de comportamiento
L-001	AD-730	18	2.75	146	13.39	24.18	Dúctil
L-002	AD-730	18	3.87	147	4.33	11.97	Dúctil
L-003	AD-730	18	4.50	145	4.98	9.26	Dúctil
L-004	AD-730	18	2.75	172	41.76	25.70	Frágil
L-005	AD-730	18	3.87	174	5.49	12.69	Dúctil
L-006	AD-730	18	4.50	170	17.50	10.66	Frágil
L-007	AD-730	18	2.75	204	46.39	25.91	Frágil
L-008	AD-730	18	3.87	203	18.17	14.01	Frágil
L-009	AD-730	18	4.50	203	23.82	8.23	Frágil

Asimismo, en la Tabla N° 4.2 se muestran las características y resultados para las losas con el Perfil AD-600, en este caso se pueden ver cargas de desprendimiento bajas para las losas L-011, L-013 y L-015.

Tabla N° 4.2 Resultados del tipo de comportamiento para el perfil AD-600.

ID	Perfil	Calibre	Luz libre (m)	Altura (mm)	P _{despren.} (kN)	P _{rotura} (kN)	Tipo de comportamiento
L-010	AD-600	18	2.75	113	20.54	26.00	Dúctil
L-011	AD-600	18	3.87	115	5.88	11.93	Dúctil
L-012	AD-600	18	2.75	133	27.53	24.23	Frágil
L-013	AD-600	18	3.87	136	7.49	11.03	Dúctil
L-014	AD-600	18	2.75	153	46.19	25.78	Frágil
L-015	AD-600	18	3.87	155	7.86	10.31	Dúctil

A partir de las dos tablas mostradas se observa una tendencia en el comportamiento de algunos especímenes, notando que para los perfiles AD-600 y AD-730 la mayoría de casos presentan un comportamiento frágil

Con la finalidad de estudiar a mayor detalle el comportamiento de este tipo de losas se mostrará los resultados de los 36 especímenes ensayados anteriormente (M. Diaz, 2009). En aquella investigación se construyeron especímenes con los tres perfiles AD-900, AD-730 y AD-600, con luces libre de 2.76 y 3.78m, y para espesores de la lámina calibre 20 y 22 (0.91 y 0.75 mm). Las propiedades geométricas y los resultados de los ensayos de cada espécimen se muestran en la Tabla N° 4.3.

Los espesores de las losas construidas en esta investigación son similares a las que se construyeron anteriormente, esto con la finalidad de poder comparar directamente como influye en el comportamiento la variación de la cuantía de la sección, que es a través del cambio del espesor de la lámina de acero.

En la Tabla mostrada se puede ver una tendencia bastante clara en los especímenes con el perfil AD-900, pues en todos sus casos presenta un comportamiento dúctil, excepto el espécimen E-029, a diferencia de los perfiles AD-730 y AD-600 que tienen un comportamiento frágil sin excepción.

Tabla N° 4.3 Resultados del tipo de comportamiento de los 35 especímenes.
Fuente: M. Diaz 2009.

ID	Perfil	Calibre	Luz libre (m)	Altura (mm)	P _{despren.} (kN)	P _{rotura} (kN)	Tipo de comportamiento
E-001	AD-900	22	2.76	101	10.30	22.31	Dúctil
E-002	AD-900	22	2.76	123	16.18	31.14	Dúctil
E-003	AD-900	22	2.76	134	19.61	37.27	Dúctil
E-004	AD-730	22	2.76	144	20.59	14.46	Frágil
E-005	AD-730	22	2.76	169	22.31	20.10	Frágil
E-006	AD-730	22	2.76	193	32.61	29.67	Frágil
E-007	AD-600	22	2.76	112	19.61	15.20	Frágil
E-008	AD-600	22	2.76	131	23.05	17.65	Frágil
E-009	AD-600	22	2.76	145	20.84	17.65	Frágil
E-010	AD-900	22	3.78	98	8.58	13.48	Dúctil
E-011	AD-900	22	3.78	124	12.01	23.78	Dúctil
E-012	AD-900	22	3.78	138	14.96	30.65	Dúctil
E-013	AD-730	22	3.78	142	19.12	9.07	Frágil
E-014	AD-730	22	3.78	170	16.43	14.96	Frágil
E-015	AD-730	22	3.78	190	26.72	14.46	Frágil
E-016	AD-600	22	3.78	112	7.11	6.62	Frágil
E-017	AD-600	22	3.78	127	14.96	11.03	Frágil
E-018	AD-600	22	3.78	152	14.96	15.94	Frágil
E-019	AD-900	20	2.76	103	21.82	26.97	Dúctil
E-020	AD-900	20	2.76	125	27.46	33.34	Dúctil
E-021	AD-900	20	2.76	143	36.04	49.77	Dúctil
E-022	AD-730	20	2.76	149	34.08	30.89	Frágil
E-023	AD-730	20	2.76	176	33.10	31.38	Frágil
E-024	AD-730	20	2.76	204	48.30	44.38	Frágil
E-025	AD-600	20	2.76	114	27.21	20.35	Frágil
E-026	AD-600	20	2.76	128	24.52	24.52	Frágil
E-027	AD-600	20	2.76	145	25.99	25.74	Frágil
E-028	AD-900	20	3.78	93	12.50	16.18	Dúctil
E-029	AD-900	20	3.78	120	23.78	25.50	Frágil
E-030	AD-900	20	3.78	141	25.99	36.28	Dúctil
E-031	AD-730	20	3.78	136	29.91	15.94	Frágil
E-032	AD-730	20	3.78	169	22.07	16.18	Frágil
E-033	AD-730	20	3.78	202	28.93	24.03	Frágil
E-034	AD-600	20	3.78	111	14.96	7.60	Frágil
E-035	AD-600	20	3.78	128	17.16	9.56	Frágil
E-036	AD-600	20	3.78	147	20.84	14.22	Frágil

Para realizar un estudio generalizado del tipo de comportamiento de las losas con placa colaborante se juntaron los resultados obtenidos de todos los ensayos. Y para ello se agruparon según el perfil, para así visualizar la tendencia del comportamiento a medida que se van variando los parámetros geométricos.

En la Figura N° 4.3 se representan todos los resultados de los ensayos realizados con el perfil AD-900, asimismo en esta gráfica se indica el límite (110%) que divide a los especímenes con un comportamiento dúctil o frágil. Para este grupo de losas se observa que el comportamiento dúctil es permanente para todas las combinaciones de los parámetros geométricos. El rango de variación de la relación P_{rotura}/P_{desp} va desde 110% hasta 225%.

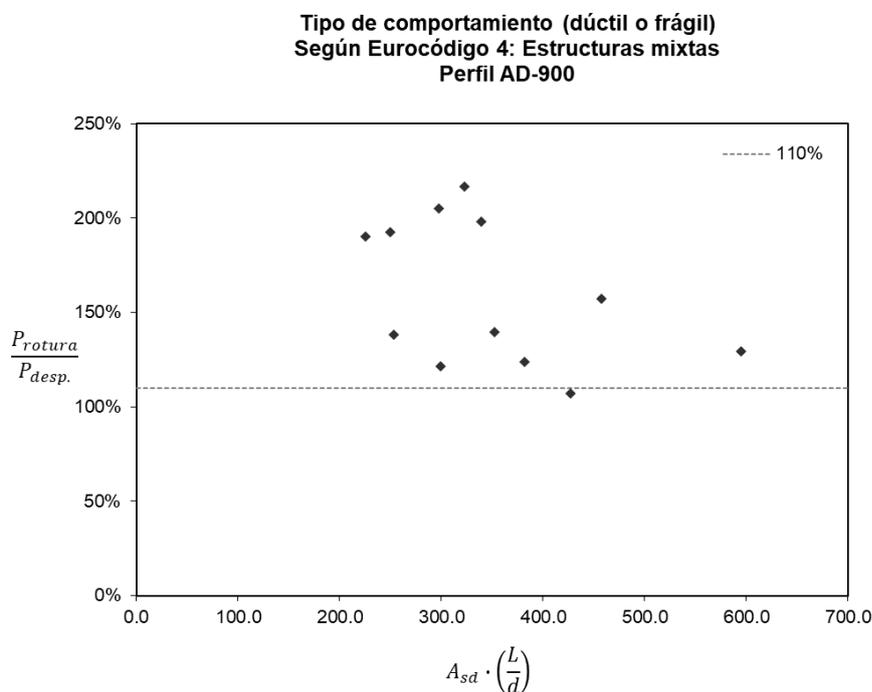


Figura N° 4.3 Tipo de comportamiento para las losas con el Perfil AD-900.

En la Figura N° 4.4 se muestra de manera similar la compilación de todos los resultados obtenidos hasta la fecha de los ensayos a flexión de las losas con el Perfil AD-730. En este caso se puede visualizar que estos especímenes tienen una falla frágil para todos los casos. El rango de variación de la relación P_{rotura}/P_{desp} va desde 30% hasta 100%.

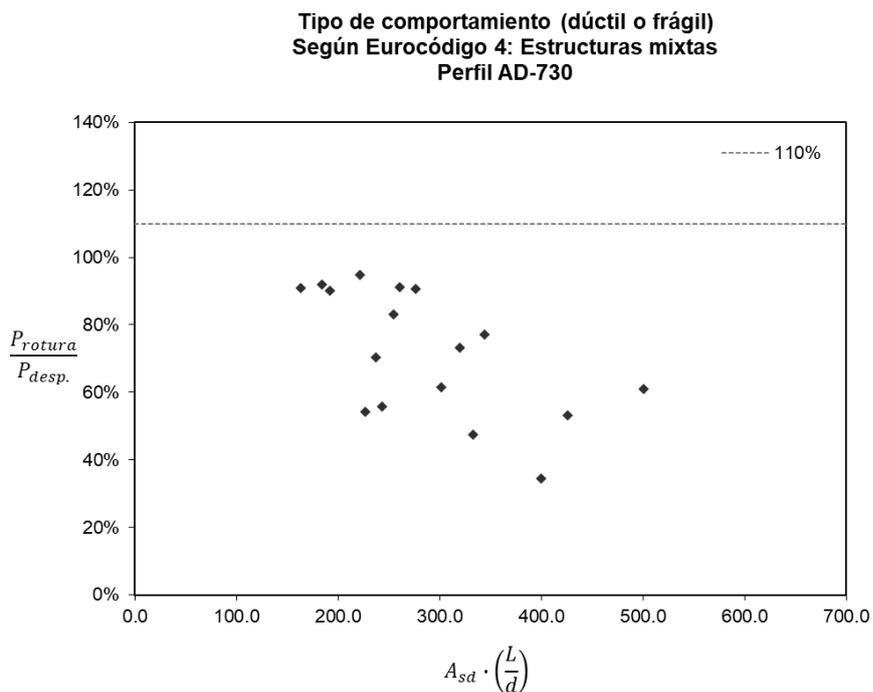


Figura N° 4.4 Tipo de comportamiento para las losas con el Perfil AD-730.

Finalmente se muestra la Figura N° 4.5, que indica un comportamiento frágil para todos los especímenes ensayados. El rango de variación de la relación P_{rotura}/P_{desp} va desde 45% hasta 110%.

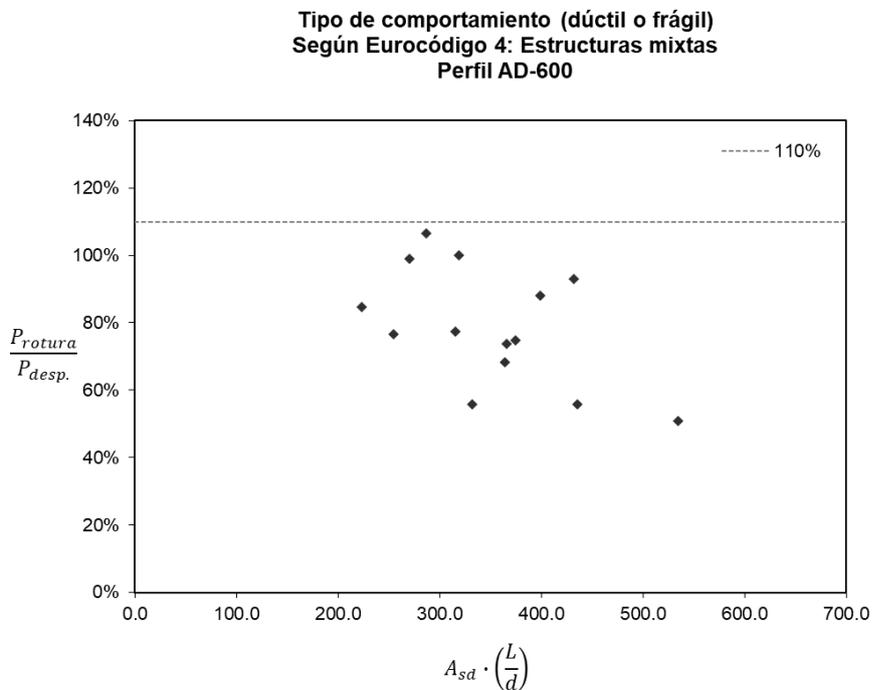


Figura N° 4.5 Tipo de comportamiento para las losas con el Perfil AD-600.

4.2 Delimitación del estado de servicio

Las curvas de comportamiento de las losas con placa colaborante muestran que el estado límite de servicio puede estar condicionado principalmente por dos factores, el primero es la carga de desprendimiento, pues a partir de dicho punto la interacción entre ambos elementos resulta ser parcial y ya no garantiza que trabaje como una sección compuesta; y como muestra de ello se ve que después de la carga de desprendimiento la resistencia decae hasta el “Punto 3” indicada en la Figura N° 4.1, y se ve influenciada por el tipo de comportamiento.

Asimismo, la deflexión permisible es el segundo factor que delimita el estado de servicio, pues debe garantizar la funcionalidad del sistema. Es por ello que se deben tener en cuenta ambos criterios para determinar el funcionamiento del sistema, pues en algunas de las curvas obtenidas se visualiza que la carga de desprendimiento ocurre después de haber superado el límite de deflexión, situación en la que se deberá determinar la carga que corresponde a la deflexión límite para establecer su carga máxima de servicio. El caso explicado se muestra en la Figura N° 4.6.

En otros especímenes se puede ver que la carga de desprendimiento ocurre antes de llegar a la deflexión límite, en este caso la funcionalidad está condicionada a la resistencia al corte longitudinal, mientras que el primer explicado caso está relacionada a la máxima deflexión permisible.

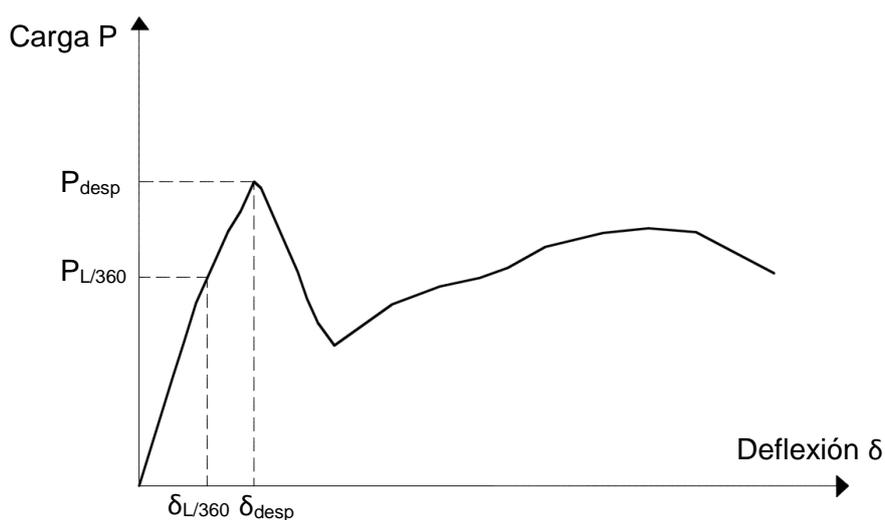


Figura N° 4.6 Delimitación del estado de servicio.

A continuación, se graficarán todas las cargas de desprendimiento (incluyendo todos los ensayos), separadas por perfil y luz libre, para poder visualizar bajo que deflexión ocurre el desprendimiento en comparación a la deflexión límite.

En la Figura N° 4.7 se muestra los resultados para el perfil AD-900, calibre 20 y 22, y una luz libre de 2.76, en los puntos graficados se puede apreciar que en la mitad de los especímenes la carga de desprendimiento se produce antes de la deflexión límite. Eso quiere decir que habrá especímenes que, por temas de funcionalidad, estarán condicionados a la resistencia al corte longitudinal, mientras que para los restantes casos se deberá calcular la carga asociada a la deflexión límite ($L/360$).

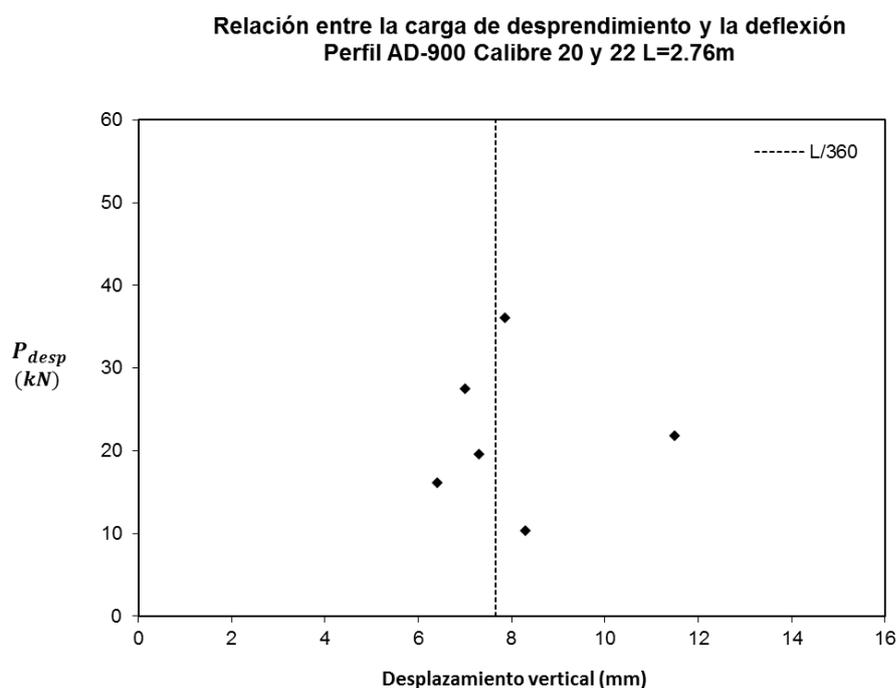


Figura N° 4.7 Deflexión medida en el desprendimiento para el perfil AD-900 y $L=2.76$ m.

De igual modo, se muestra los resultados para el perfil AD-900, calibre 20 y 22, y una luz libre de 3.78 en la Figura N° 4.8. Para esta serie de resultados se observa que en todos los casos la deflexión asociada al desprendimiento supera a la deflexión límite y la carga que limita la funcionalidad de estos especímenes será aquella correspondiente a la deflexión $L/360$.

**Relación entre la carga de desprendimiento y la deflexión
 Perfil AD-900 Calibre 20 y 22 L=3.78m**

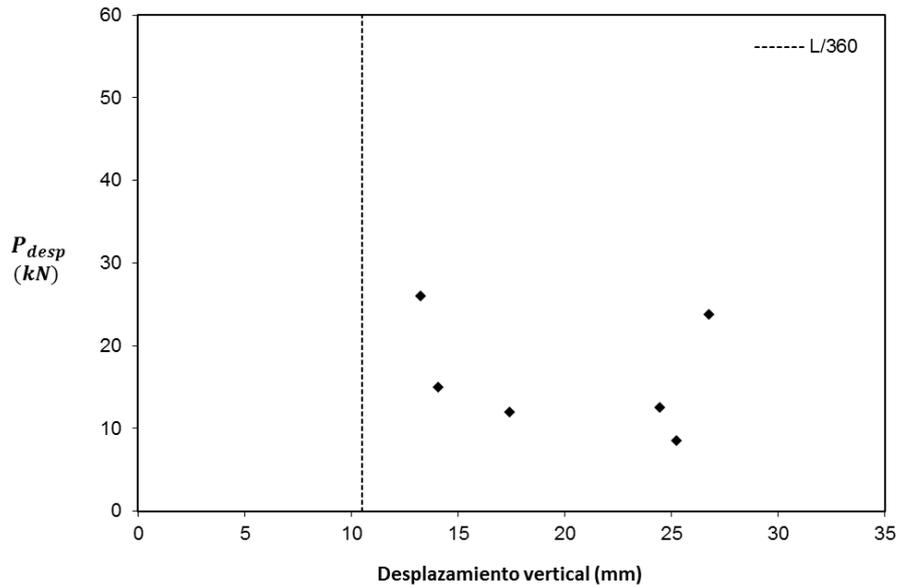


Figura N° 4.8 Deflexión medida en el desprendimiento para el perfil AD-900 y L=3.78 m.

El mismo análisis se puede hacer para el perfil AD-730, pero incluyendo el calibre 18, que corresponden a los últimos especímenes construidos. La Figura N° 4.9 y Figura N° 4.10 muestran los resultados para las luces de 2.76m y 3.78m respectivamente. Para la luz 2.76m se observa que casi todas las losas logran alcanzar su carga de desprendimiento antes de llegar a la deflexión límite.

**Relación entre la carga de desprendimiento y la deflexión
 Perfil AD-730 Calibre 20, 22 y 18 L=2.76m**

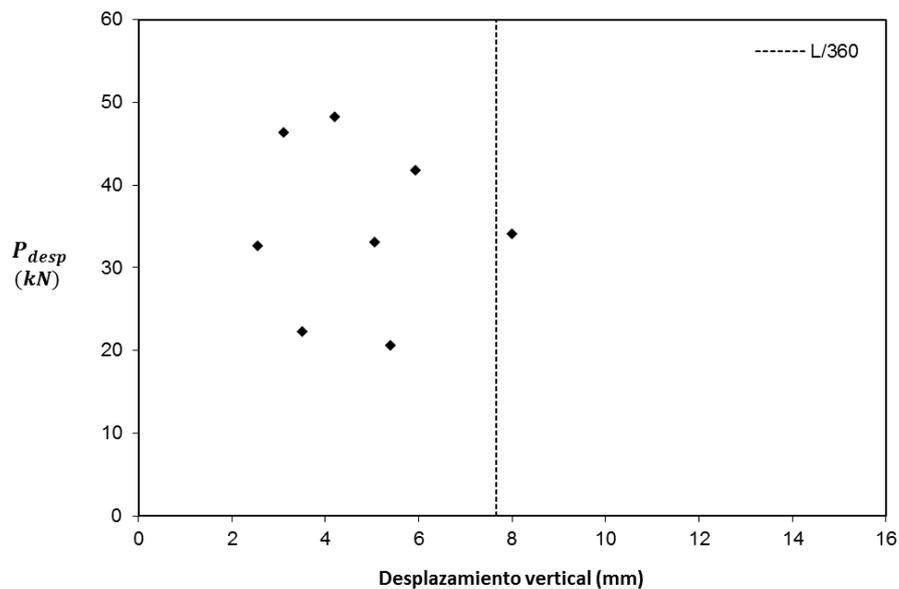


Figura N° 4.9 Deflexión medida en el desprendimiento para el perfil AD-730 y L=2.76 m.

Para la luz de 3.78m se observa que algunas losas alcanzan la carga de desprendimiento después de exceder la deflexión límite.

**Relación entre la carga de desprendimiento y la deflexión
Perfil AD-730 Calibre 20, 22 y 18 L=3.78m**

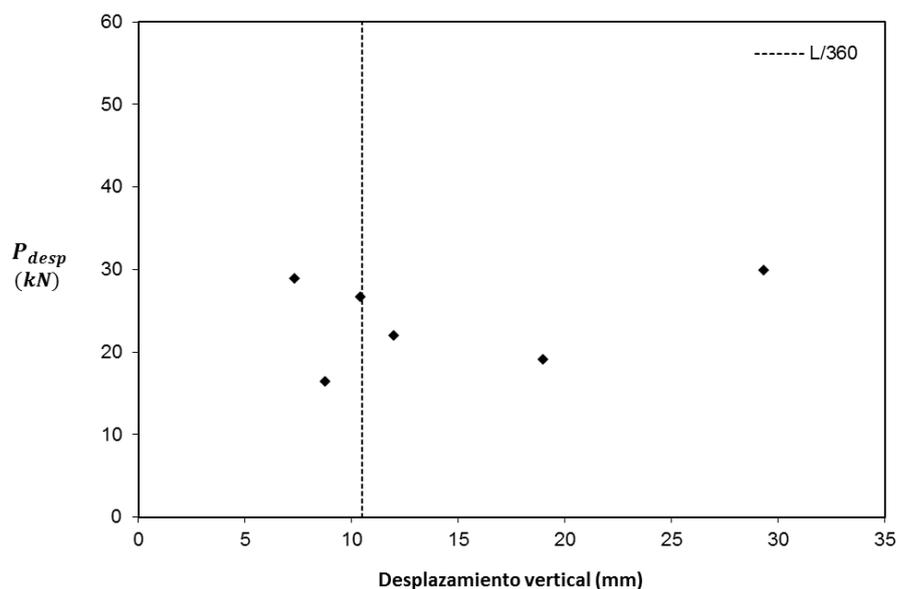


Figura N° 4.10 Deflexión medida en el desprendimiento para el perfil AD-730 y L=3.78 m.

Además, se hizo la misma interpretación para el Perfil AD-600, para los calibre 22, 20 y 18, y los resultados se muestran en la Figura N° 4.11 y Figura N° 4.12 para las luces de 2.76m y 3.78 m respectivamente.

**Relación entre la carga de desprendimiento y la deflexión
Perfil AD-600 Calibre 20, 22 y 18 L=2.76m**

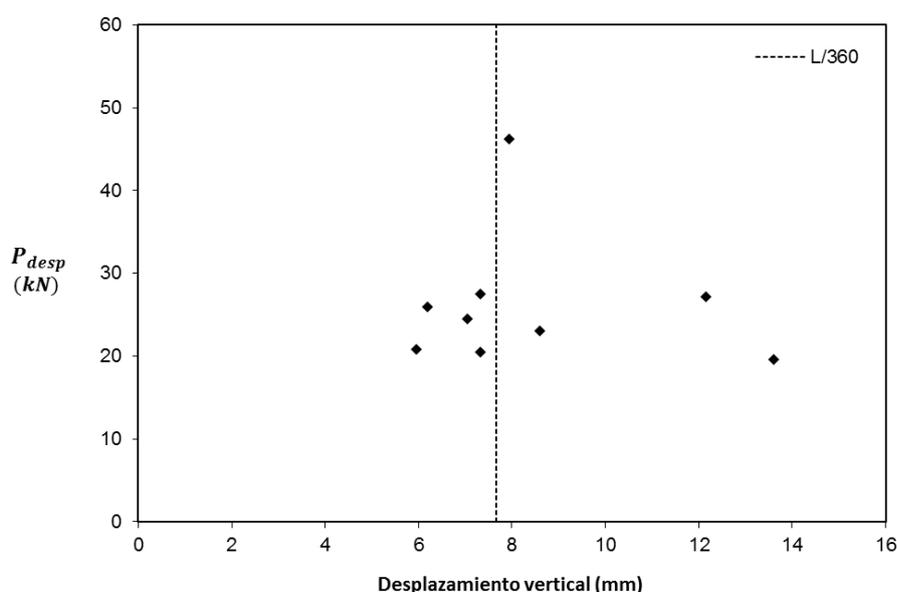


Figura N° 4.11 Deflexión medida en el desprendimiento para el perfil AD-600 y L=2.76 m.

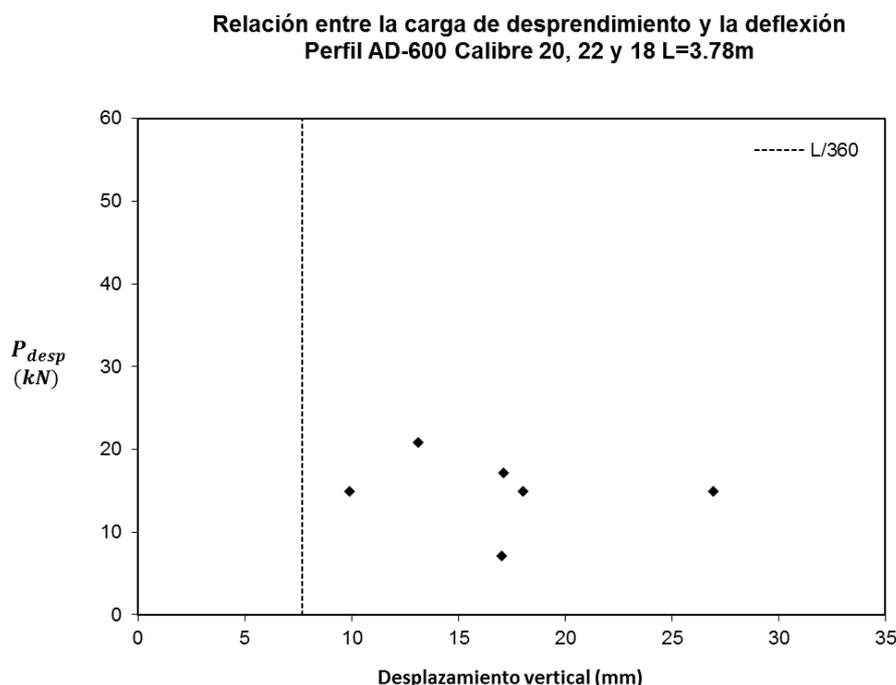


Figura N° 4.12 Deflexión medida en el desprendimiento para el perfil AD-600 y L=3.78 m.

En todos los perfiles en estudio se puede observar que el factor de esbeltez influye directamente en como la losa llega a su límite de funcionalidad, es decir según los resultados presentados se observa que, para las losas más cortas $L=2.76\text{m}$, la falla por cortante longitudinal es la que condiciona el estado de servicio, a través de la carga de desprendimiento. Sin embargo, para las losas largas $L=3.78\text{m}$, la funcionalidad está condicionada por la deflexión máxima permisible ($L/360$) y para lo cual se debe reducir de manera casi proporcional la carga de desprendimiento para obtener así la carga máxima por servicio.

El porcentaje de reducción mencionado será un detalle muy importante que se tendrá en cuenta más adelante cuando se plantee la nueva correlación entre la carga de desprendimiento y los parámetros geométricos y mecánicos; pues dicho porcentaje de reducción es influenciado por la luz libre.

4.3 Método de diseño propuesto

Actualmente el “Método m y k” es usado para el diseño de las losas con placa colaborante, pues de acuerdo con el ASCE, el máximo cortante vertical está limitado debido a la resistencia al corte longitudinal. En los ensayos realizados anteriormente (M. Diaz, 2009) se determinaron los parámetros “m” y “k” para cada perfil y para cada calibre (20 y 22), dando así los primeros resultados experimentales para el diseño de estos elementos estructurales.

Los parámetros “m” y “k” obtenidos en dicho estudio se muestran en la Tabla N° 4.4, ordenado según el tipo de perfil y el calibre. Estos valores fueron calculados según lo indicado en la sección 2.3.5.2 a partir de los ensayos a flexión realizados.

Tabla N° 4.4 Parámetros “m” y “k” para cada tipo de perfil.
Fuente: M. Díaz 2009.

Perfil	Calibre	m (kgf ^{0.5} /cm)	k (kgf/cm ²)
AD-900	22	698.366	0.008
AD-900	20	1127.000	0.010
AD-730	22	477.686	0.034
AD-730	20	1098.000	0.014
AD-600	22	1089.833	0.000
AD-600	20	1260.000	0.000

Para el cálculo de estos valores se tomó en cuenta la resistencia del concreto, pues es una propiedad considerada en la metodología planteada por la ASCE, situación contraria a la del Eurocódigo 4.

Para la nueva propuesta de diseño se realizará una nueva regresión lineal entre la fuerza cortante asociada al desprendimiento y los parámetros geométricos y mecánicos de cada espécimen. A diferencia del método “m” y “k”, esta nueva correlación reúne todos los resultados obtenidos para un perfil en específico (AD-900, AD-730 o AD-600), es decir agrupa todas las cargas de desprendimiento sin importar el tipo de calibre, pues dentro de los parámetros geométricos se incluye el área de la sección del perfil. Esta manera de estudiar los resultados permitirá que la carga de desprendimiento esté directamente relacionada a la cuantía de la sección y así dejar de lado el agrupamiento según el tipo de calibre (18, 20 y 22).

Es por ello que los resultados obtenidos a partir de los nuevos especímenes construidos (con calibre 18) se pueden complementar con los resultados anteriores, pues se relacionarán a partir del área de acero proporcionada por la placa colaborante.

Asimismo, este nuevo planteamiento permite relacionar las cargas de desprendimiento con la resistencia de los materiales, pues la resistencia a compresión del concreto y la fluencia de la lámina de acero resultaron ligeramente distintas en las dos etapas de estudio, esto debido al tipo de agregado y a las

láminas de acero usadas. Es por ello que se realizó el ensayo de los materiales indicados en la sección 3.3.

A continuación, se mostrarán la correlación mencionada para los perfiles en estudio, asimismo indicando la ecuación de la regresión lineal aplicada.

Los resultados del Perfil AD-900 se muestran en la Figura N° 4.13, y en ella se puede observar una tendencia entre la fuerza cortante asociada al desprendimiento ($V_{desp} = P_{desp}/2$) y los parámetros geométricos y mecánicos descritos anteriormente ($A_{sd} \cdot d/L_s \cdot f_{sd}/f'_c$). Este primer conjunto de datos muestra que los resultados, con distinto calibre, pueden ser agrupados con el fin de realizar un estudio más generalizado sobre el comportamiento de las losas con placa colaborante con el Perfil AD-900. Cabe recordar que los especímenes construidos con este perfil solo fueron con el calibre 20 y 22.

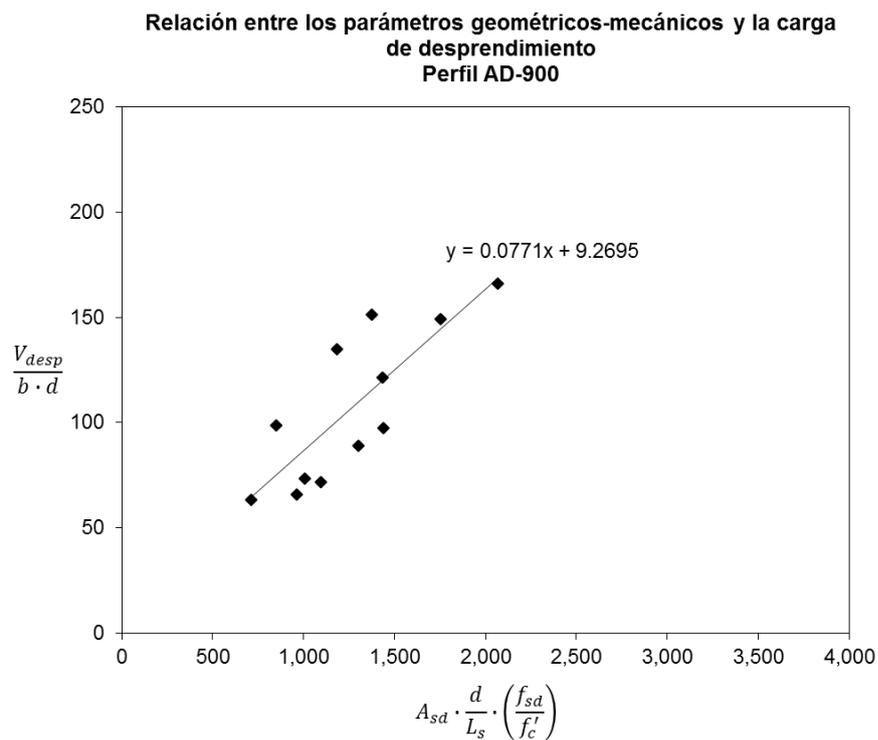


Figura N° 4.13 Regresión lineal para los resultados obtenidos con el Perfil AD-900.

De igual modo se realizó el agrupamiento de todos resultados obtenidos para el Perfil AD-730, mostradas en la Figura N° 4.14, y en el que se incluyen los últimos especímenes construidos con el calibre 18. Para el ajuste se tuvo que excluir algunos datos anómalos que no seguían la tendencia lineal y que podrían alterar el resultado final, ello basado en el estudio previo (Perfil AD-900).

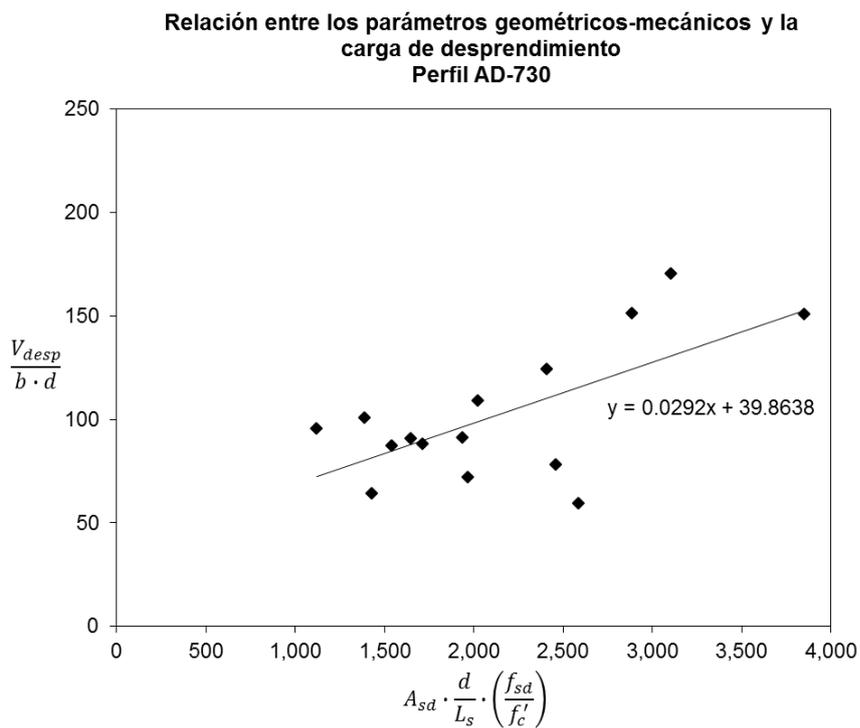


Figura Nº 4.14 Regresión lineal para los resultados obtenidos con el Perfil AD-730.

Asimismo, en la Figura Nº 4.15 se muestra lo propio para el Perfil AD-600, incluyendo los especímenes con el calibre 18.

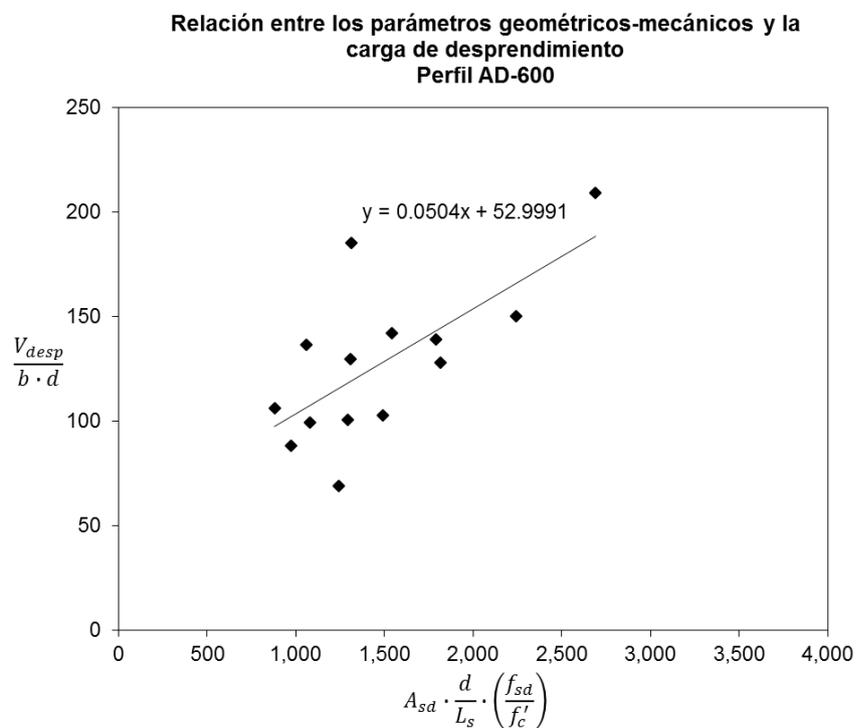


Figura Nº 4.15 Regresión lineal para los resultados obtenidos con el Perfil AD-600.

A continuación, se muestra una comparación entre las cargas de desprendimiento obtenidas a partir del ensayo a flexión (experimentales) y las que se obtienen mediante el nuevo método propuesto y el Método m y k (teóricos). La Figura N° 4.16 muestra la aproximación de los resultados teóricos en el perfil AD-900.

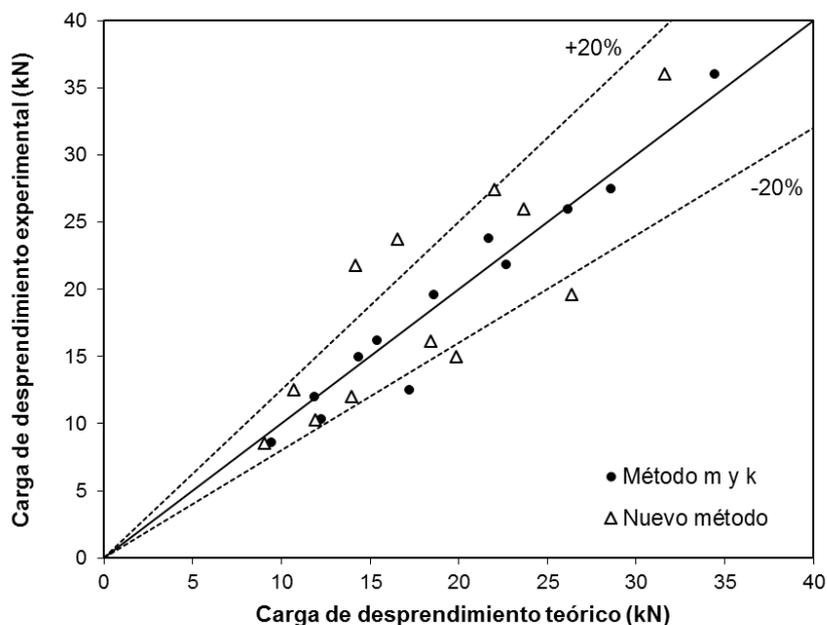


Figura N° 4.16 Comparación de las cargas de desprendimiento teóricas y experimentales para el perfil AD-900.

Asimismo, la Figura N° 4.17, muestra la comparación para el perfil AD-730.

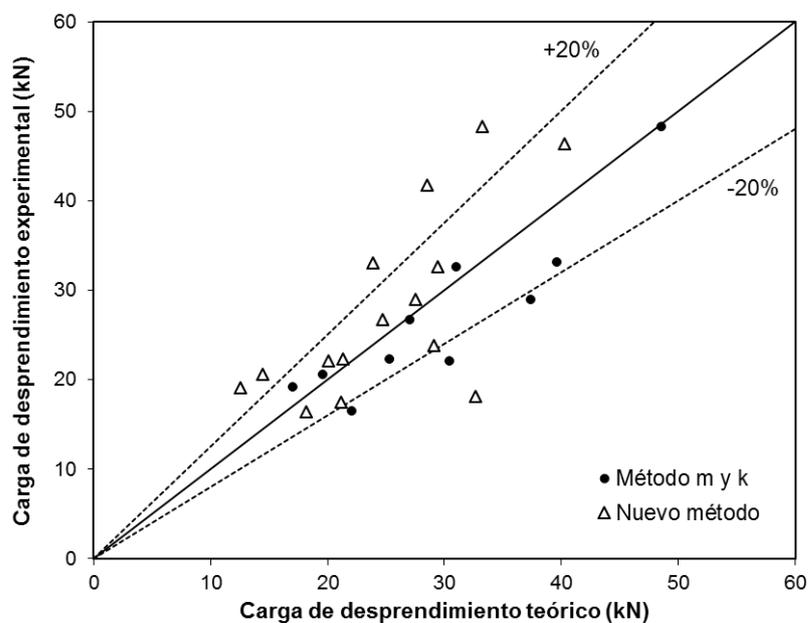


Figura N° 4.17 Comparación de las cargas de desprendimiento teóricas y experimentales para el perfil AD-730.

Finalmente se presenta la Figura N° 4.18, que muestra la variación de los resultados en el perfil AD-600.

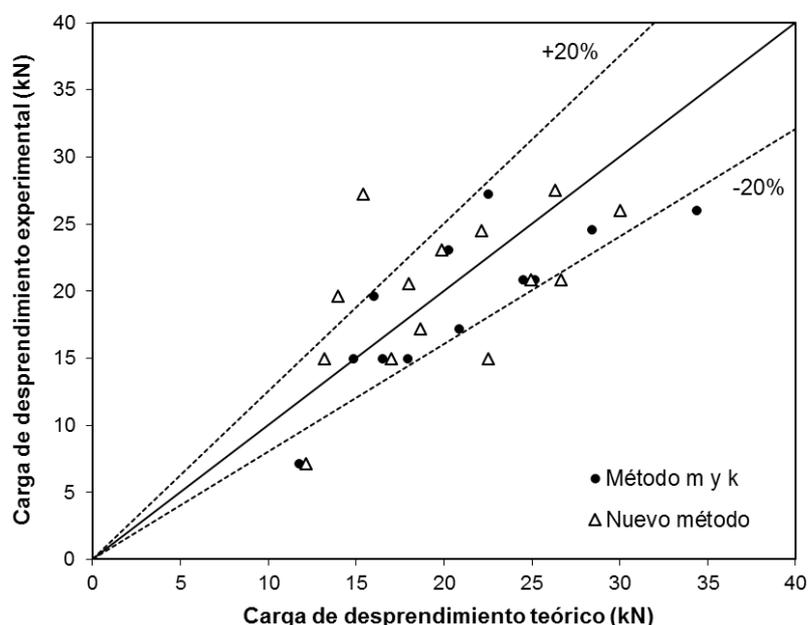


Figura N° 4.18 Comparación de las cargas de desprendimiento teóricas y experimentales para el perfil AD-600.

En los tres perfiles en estudio se aprecia una aproximación de los resultados teóricos a los experimentales, ello teniendo en cuenta un margen de aproximación del $\pm 20\%$, que permite probar la validez de este nuevo método de diseño. Además, en esta nueva propuesta, se incorporará la verificación de la funcionalidad del sistema, que como se indicó en la sección anterior, podría estar limitada por la deflexión o por el desprendimiento entre el concreto y la lámina de acero de la placa colaborante.

Esto resulta ser una diferencia bastante importante en comparación al Método “m” y “k”, pues este solo proporciona la carga de desprendimiento a través del ajuste que realiza para cada perfil y calibre, dejando la verificación por deflexión como un cálculo adicional que resulta ser teórico, y que en muchos casos suele ser el que condiciona el funcionamiento del sistema.

Para la incorporación de este criterio en el nuevo método se analizó las figuras que mostraban la deflexión medida en el desprendimiento, y se cuantificó el porcentaje de reducción para los casos en las que el desprendimiento ocurría después de superar la deflexión límite, este procedimiento se ve en la Figura N° 4.19. Este porcentaje fue analizado para cada perfil y se notó que la reducción es mayor en las losas esbeltas (t/L) en comparación a las losas compactas.

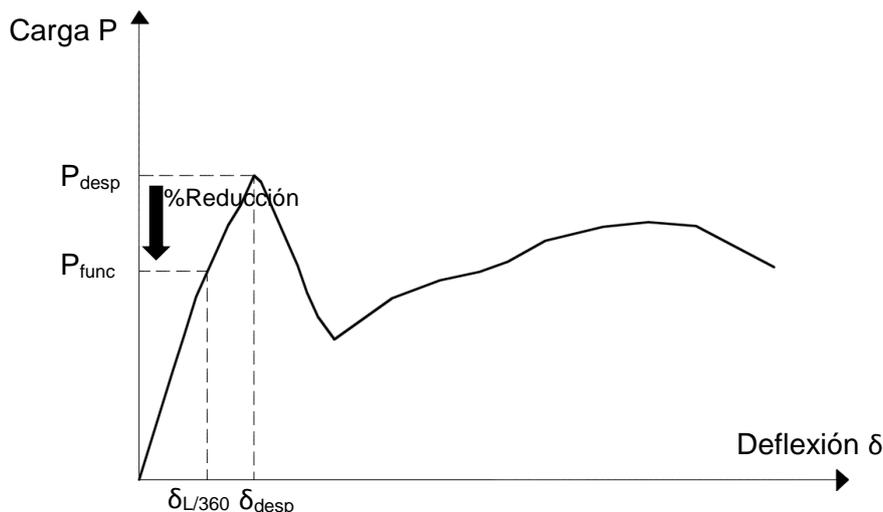


Figura N° 4.19 Porcentaje de reducción para condicionar la funcionalidad del sistema.

Los porcentajes de reducción se ven indicados en la Tabla N° 4.5, y en ella se puede notar que esta reducción varía de acuerdo al tipo de perfil, siendo el perfil AD-900 la que presenta una mayor reducción, caso contrario al perfil AD-730. Como dato puntual se puede observar que en el perfil AD-730 hay una reducción del 0%, el cual indica que para dicha región de esbeltez la funcionalidad está condicionada por la carga de desprendimiento, la cual ocurre antes de la deflexión límite (L/360).

Tabla N° 4.5 Porcentaje de reducción según el tipo de perfil.

Perfil	Región de losas esbeltas	Región de losas compactas
AD-900	45%	10%
AD-730	30%	0%
AD-600	35%	10%

Asimismo, en la Tabla N° 4.6 se indica las relaciones t/L (espesor de losa/Luz libre) en las que se aplicó los porcentajes de reducción.

Tabla N° 4.6 Límites de las losas esbeltas y compactas para cada perfil.

Perfil	Losas esbeltas (t/L)	Losas compactas (t/L)
AD-900	0.025	0.050
AD-730	0.038	0.073
AD-600	0.030	0.053

Entonces las gráficas mostradas en la Figura N° 4.13, Figura N° 4.14 y Figura N° 4.15 correspondientes a los perfiles AD-900, AD-730 y AD-600 respectivamente, se verán afectadas por los factores de reducción presentados.

En la Figura N° 4.20 se muestra la regresión lineal reducida para el perfil AD-900 y se observa que todos los datos experimentales se encuentran por encima de dicha recta.

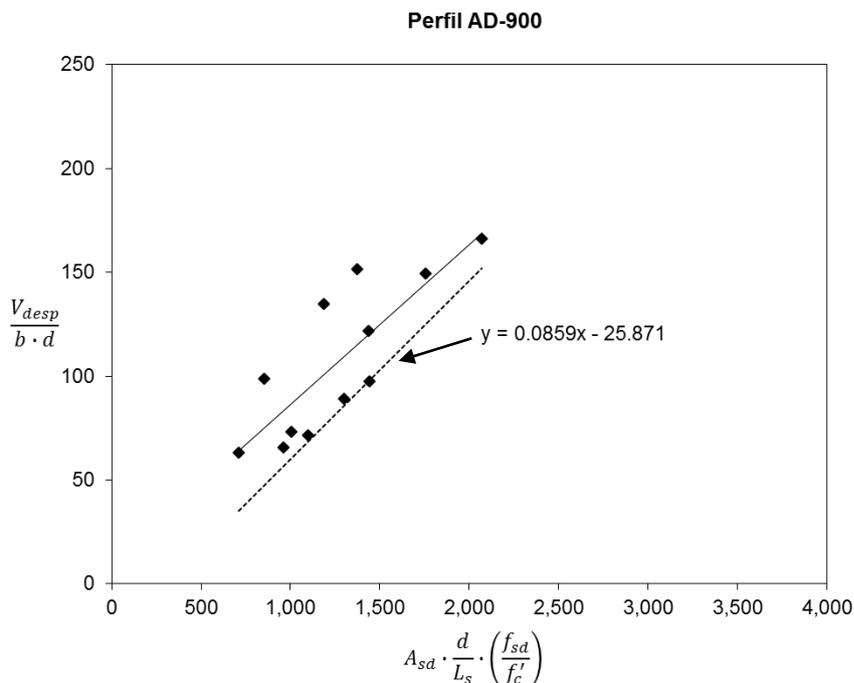


Figura N° 4.20 Regresión lineal que limita la funcionalidad de las losas con el Perfil AD-900.

Asimismo, se observar en la Figura N° 4.21 la nueva regresión lineal para el perfil AD-730, pero en este caso hay algunos puntos que están por debajo de esta.

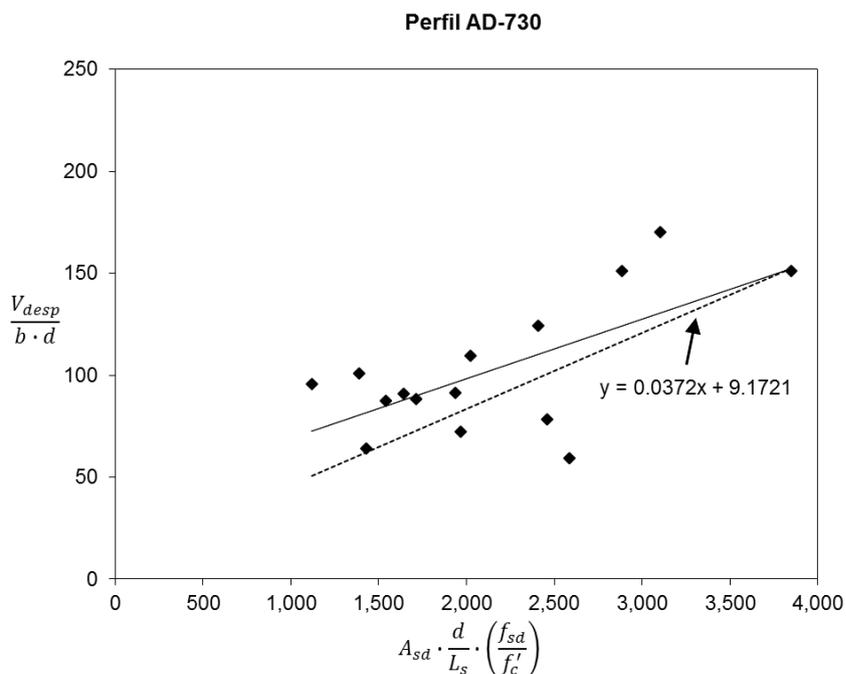


Figura N° 4.21 Regresión lineal que limita la funcionalidad de las losas con el Perfil AD-730.

Finalmente, en la Figura N° 4.22 se muestra la regresión reducida para el perfil AD-600 y se observa como esta resulta ser el límite inferior de todos los resultados experimentales obtenidos.

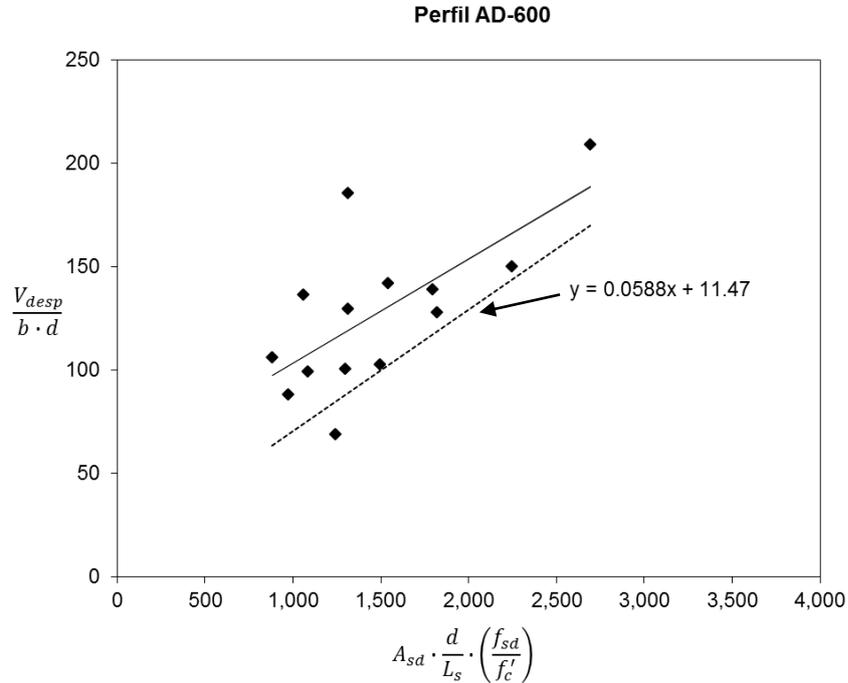


Figura N° 4.22 Regresión lineal que limita la funcionalidad de las losas con el Perfil AD-600.

A partir de los gráficos mostrados se plantea la expresión (4.1), que muestra los parámetros del ajuste lineal reducido, y que serían usadas como una nueva alternativa de diseño adicional al Método “m” y “k”.

$$\frac{V_{func}}{b \cdot d} = \mu \cdot \left(A_{sd} \cdot \frac{d}{L_s} \cdot \frac{f_{sd}}{f'_c} \right) + \varphi \quad (4.1)$$

Donde V_{func} es la fuerza cortante asociada al límite de funcionalidad de la losa con placa colaborante. Los parámetros para cada perfil se ven indicados en la Tabla N° 4.7.

Tabla N° 4.7 Parámetros del nuevo método propuesto.

Perfil	μ (kPa/mm ²)	φ (kPa)
AD-900	0.0736	0
AD-730	0.0372	9.172
AD-600	0.0588	11.470

A continuación, se muestra una comparación entre las cargas que limitan la funcionalidad del sistema (experimentales), la carga de desprendimiento o aquella

que fue reducida ($L/360$), y las que se obtienen mediante el nuevo método propuesto y el Método m y k (teóricos). La Figura N° 4.23 muestra la aproximación de los resultados teóricos en el perfil AD-900.

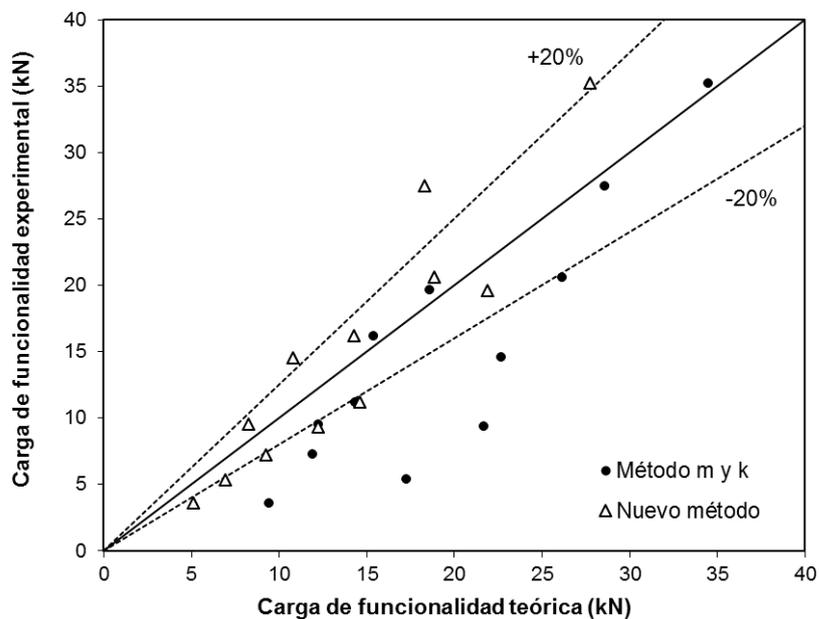


Figura N° 4.23 Comparación de las cargas teóricas asociadas a la funcionalidad y experimentales para el perfil AD-900.

Asimismo, la Figura N° 4.24, muestra la comparación para el perfil AD-730.

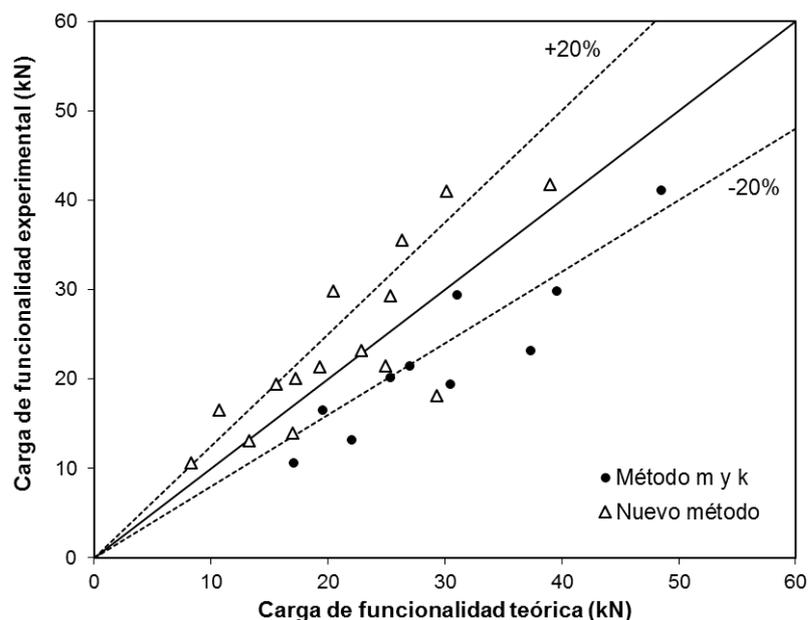


Figura N° 4.24 Comparación de las cargas teóricas asociadas a la funcionalidad y experimentales para el perfil AD-730.

Finalmente se presenta la Figura N° 4.25, que muestra la variación de los resultados en el perfil AD-600.

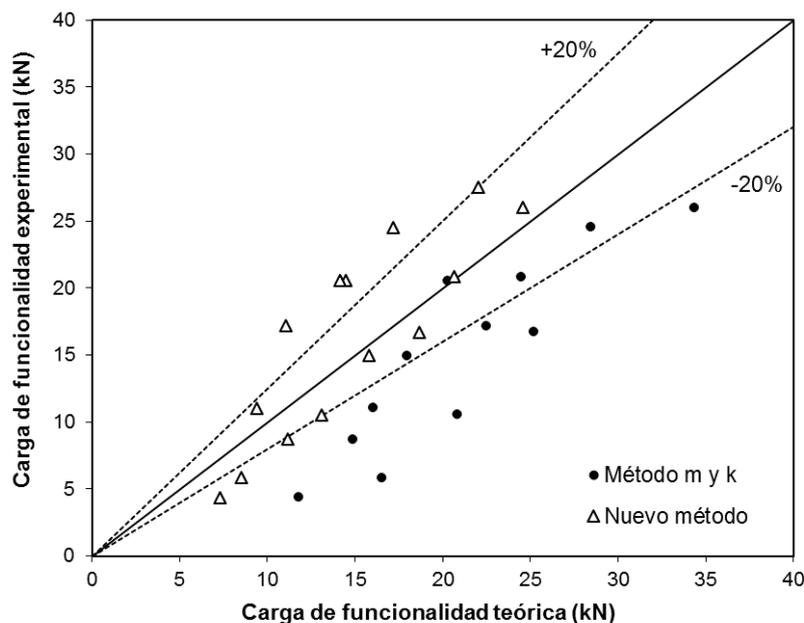


Figura N° 4.25 Comparación de las cargas teóricas asociadas a la funcionalidad y experimentales para el perfil AD-600.

En las comparaciones mostradas, para cada perfil, se observa que el nuevo método propuesto presenta un mejor ajuste hacia los datos experimentales asociados a la funcionalidad y que fueron obtenidos en el ensayo a flexión. Además, la ubicación en la gráfica de los puntos para el Método “m” y “k” indican que la carga teórica obtenida por este método es mucho mayor a la carga que limita la funcionalidad del sistema.

En el “Método m y k”, según el ASCE, se puede aplicar una reducción a la regresión lineal que varía entre el 10 y 15% con fines de diseño, dicho criterio también se podría aplicar a este nuevo método propuesto.

En caso que la resistencia a compresión del concreto, en el diseño, sea distinta a la resistencia obtenida en los ensayos realizados, se seguirá la recomendación indicada por el ASCE, que presenta la expresión (4.2) como una manera de determinar la fuerza cortante teórica asociada al límite de funcionalidad.

$$\frac{V^1}{V^2} = \left(\frac{f_c^{r1}}{f_c^{r2}} \right)^{1/4} \quad (4.2)$$

Cabe indicar que se considera al concreto como un material sujeto a mayor variabilidad, pues los criterios de diseño y dosificación de mezclas, según la zona, pueden afectar a la resistencia a compresión del concreto. Situación distinta ocurre con la lámina de acero, pues existe un mayor control en la calidad de este

producto, y esto se puede observar en la similitud que existe entre los esfuerzos de fluencia en las distintas etapas de ensayo, 3557 kgf/cm^2 (2009) y 3605 kgf/cm^2 (2017).

Como se mencionó inicialmente, la mayoría de las losas en estudio tienen una falla por cortante longitudinal y en base a ello es que se ha desarrollado la nueva metodología de diseño de losas con placa colaborante; es decir, será válido aplicar este nuevo método si es que la losa en análisis se encuentra entre los límites de esbelteces mostrados en la Tabla N° 4.6, las cuales hasta el momento limitan la falla por cortante longitudinal y que podrían variar a medida que se vayan ensayando especímenes con esbelteces distintas a las que han abordado en este estudio.

Sin embargo, el espécimen L-011 ($t=115 \text{ mm}$) resulta ser un caso particular, pues no se aprecia el punto de desprendimiento, y tiene un comportamiento casi lineal, por lo que parece indicar que la esbeltez de este espécimen ($t/L=0.03$) es un punto de transición entre la falla por cortante longitudinal a una falla por flexión.

Finalmente, mencionar que los parámetros obtenidos corresponden solo para los perfiles en estudio, pues estos valores dependen directamente de los parámetros geométricos del perfil y la disposición de las muescas a todo lo largo de la placa colaborante. Sin embargo, se puede aplicar esta misma metodología para algún otro perfil, pero previamente se deberá realizar los ensayos a flexión correspondiente para estudiar su comportamiento.

4.4 Esfuerzo resistente al corte por adherencia mecánica

En los ensayos a flexión se logra visualizar que la grieta diagonal ocurre justo por debajo del punto de aplicación de la carga, Figura N° 4.26, lo cual también indica que dicho punto tiene un desplazamiento vertical mayor en comparación al otro punto de aplicación, pero menor al medido en el centro de la luz (CH-02).



a) Especímen después del ensayo.

a) Medición del ancho de la grieta.

Figura N° 4.26 Grieta diagonal principal que llega hasta la parte superior de la losa.

El término $\left(\frac{\Delta\delta_{1i} + \Delta\delta_{2i}}{\Delta s_i}\right)$ de la expresión (2.6) y (2.7) será reemplazada por la pendiente obtenida en la regresión lineal de los datos experimentales, y esto resulta ser una correcta simplificación, pues los datos experimentales de todos los especímenes presentan un buen ajuste, tal como se ve en la Figura N° 4.27, que muestra el tratamiento de los datos para uno de los especímenes.

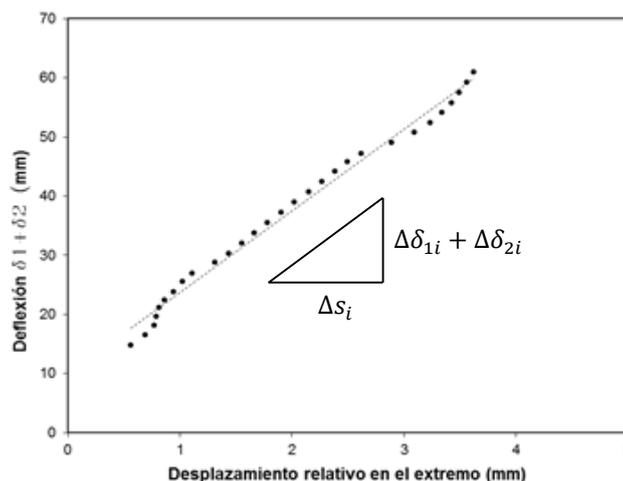


Figura N° 4.27 Deflexión total en los puntos 1 y 2 versus el desplazamiento relativo en el extremo.

Este ajuste lineal se realizará para el extremo en donde se produce un mayor desplazamiento relativo, pues el trabajo interno realizado por la Fuerza cortante longitudinal será analizado en ese extremo.

El esfuerzo resistente al corte por adherencia será calculado al dividir la Fuerza cortante longitudinal obtenida por la ecuación (2.8) entre el área de contacto de la placa colaborante a lo largo de la luz rasante (L_s).

La Figura N° 4.28 muestra que el esfuerzo máximo es alcanzado en un desplazamiento relativo menor a 1mm.

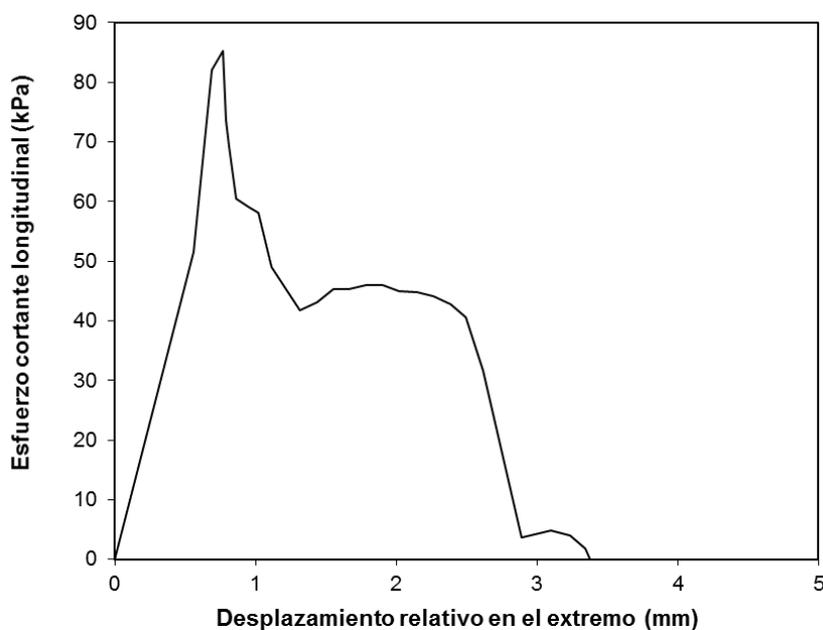


Figura N° 4.28 Esfuerzo cortante longitudinal en el espécimen L-001.

En la Figura N° 4.29, se puede notar, de manera similar al caso anterior, que el esfuerzo máximo se alcanzó en un desplazamiento relativo menor a 1mm.

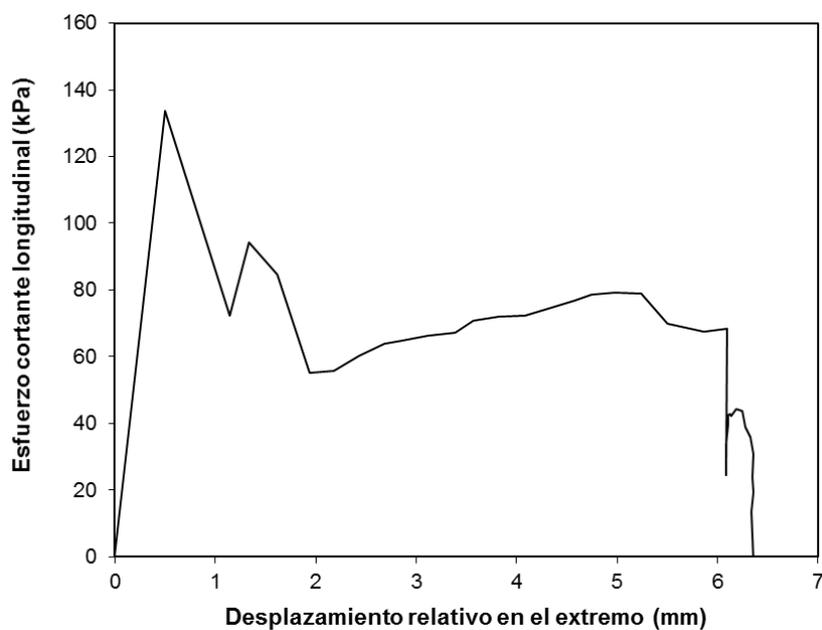


Figura N° 4.29 Esfuerzo cortante longitudinal en el espécimen L-004.

Asimismo en la Figura N° 4.30 se aprecia que después de alcanzar el esfuerzo máximo, la curva desciende hasta llegar a su punto más bajo para luego recuperarse ligeramente.

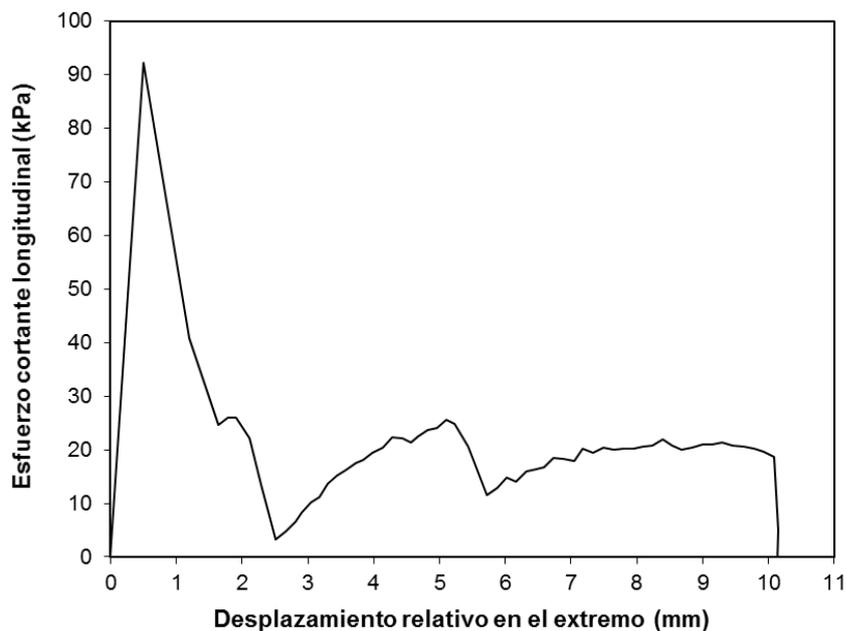


Figura N° 4.30 Esfuerzo cortante longitudinal en el espécimen L-006.

La Figura N° 4.31 presenta un esfuerzo máximo antes de llegar a 1mm de desplazamiento relativo, asimismo muestra un esfuerzo casi constante entre 1 y 4mm.

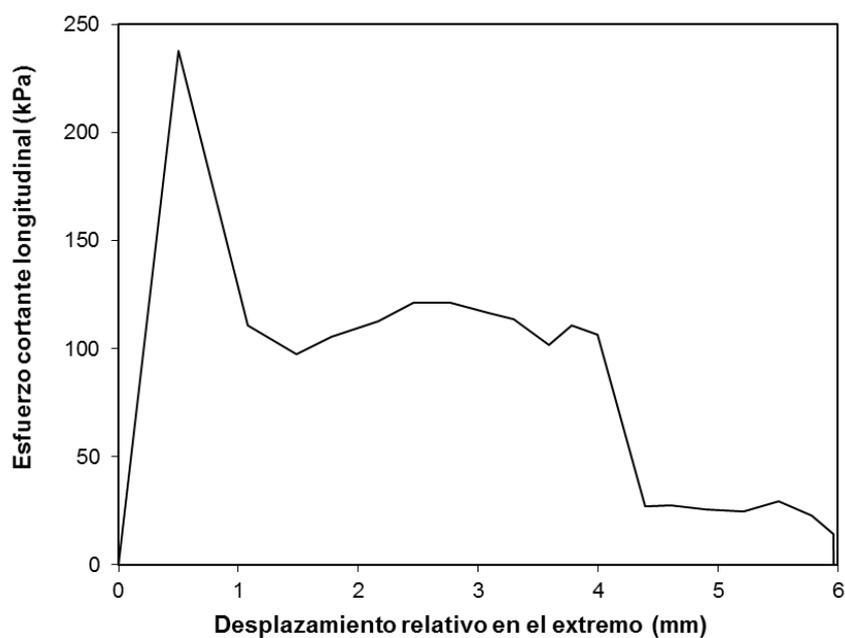


Figura N° 4.31 Esfuerzo cortante longitudinal en el espécimen L-007.

Para el espécimen L-008 se tiene la Figura N° 4.32, que mantiene la tendencia de todos los resultados con el perfil AD-730 que se han mostrados hasta ahora, el cual es alcanzar su máximo esfuerzo antes de llegar a 1mm de desplazamiento relativo.

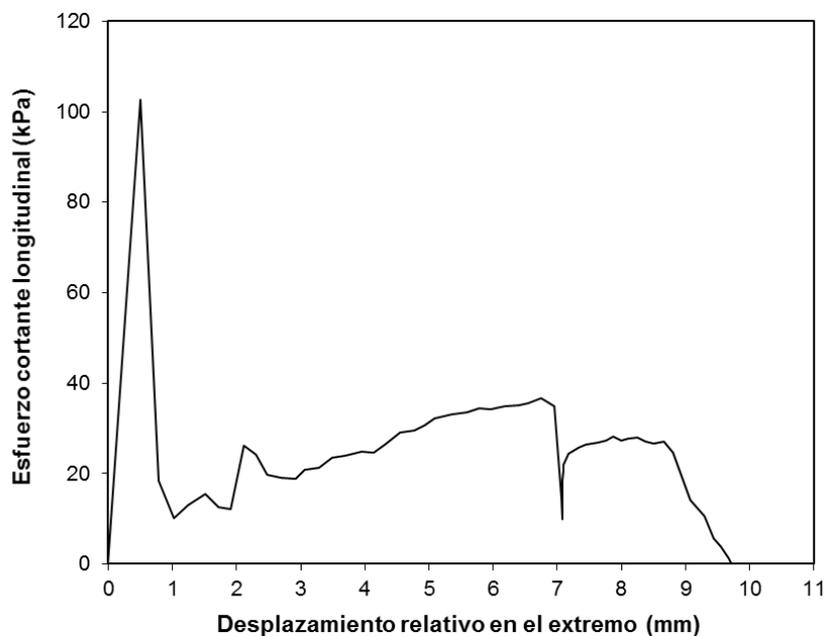


Figura N° 4.32 Esfuerzo cortante longitudinal en el espécimen L-008.

De igual modo se obtuvo las gráficas del esfuerzo cortante longitudinal para el perfil AD-600, y la Figura N° 4.33 muestra que el esfuerzo máximo ocurre entre los 2 y 3 mm de desplazamiento relativo.

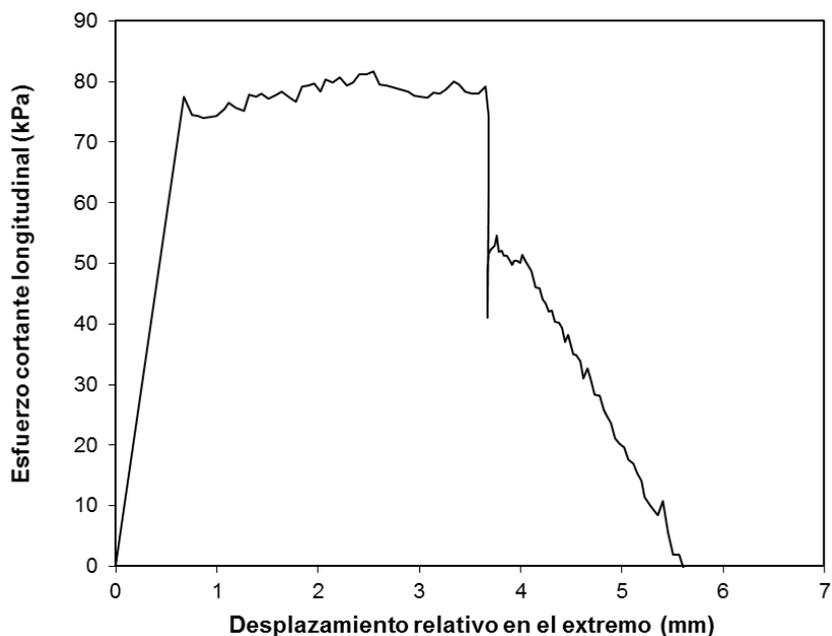


Figura N° 4.33 Esfuerzo cortante longitudinal en el espécimen L-010.

Sin embargo, en la Figura N° 4.34 se visualiza que el esfuerzo máximo es alcanzado en un desplazamiento menor a 1mm.

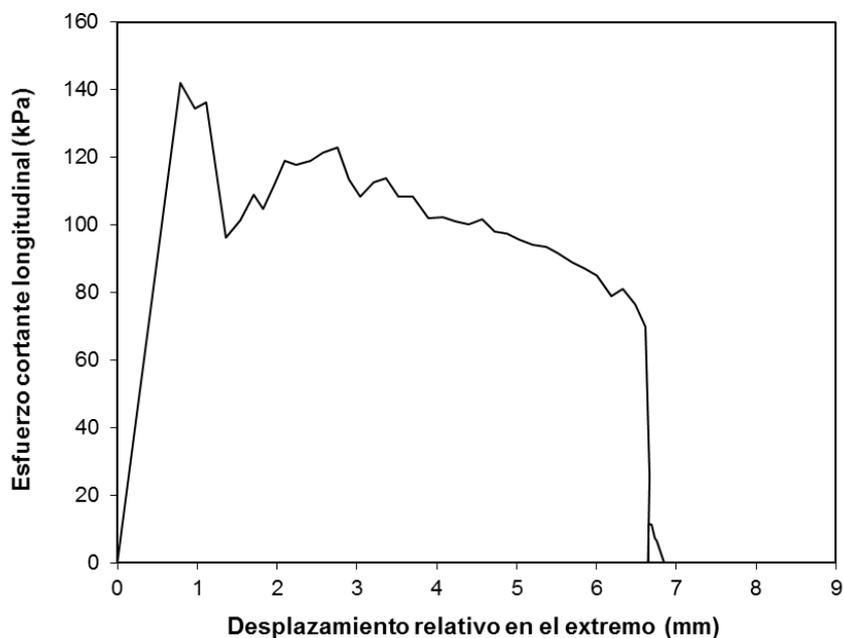


Figura N° 4.34 Esfuerzo cortante longitudinal en el espécimen L-012.

Finalmente se presenta la Figura N° 4.35, situación en la que el esfuerzo máximo es alcanzado entre los 3 y 4mm, lo cual llega a ser algo característico del perfil AD-600, pues el esfuerzo cortante longitudinal no decae de manera súbita, por lo contrario, decrece gradualmente mientras va aumentando el desplazamiento relativo.

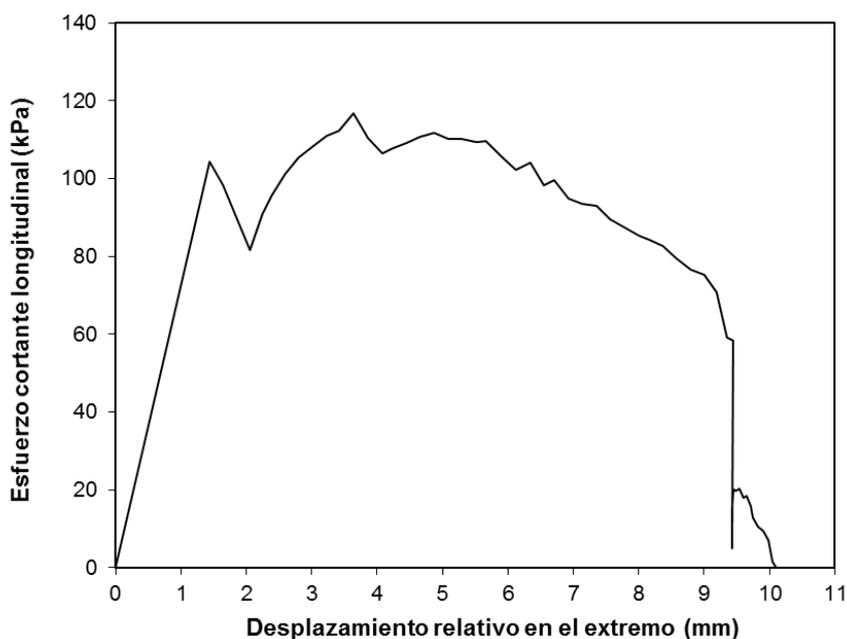


Figura N° 4.35 Esfuerzo cortante longitudinal en el espécimen L-014.

El resumen de los esfuerzos resistentes al corte por adherencia, esfuerzos máximos de cada gráfica, se ve indicados en la Tabla N° 4.8.

Tabla N° 4.8. Resultados del esfuerzo resistente al corte por adherencia a partir del ensayo a flexión.

Perfil	Calibre	Espesor de losa (mm)	Esfuerzo admisible (kPa)
AD-730	18	146	85.22
AD-730	18	172	133.76
AD-730	18	170	92.28
AD-730	18	204	237.71
AD-730	18	203	102.68
AD-600	18	113	81.59
AD-600	18	133	141.90
AD-600	18	153	116.80

Asimismo, en los ensayos *Pull-out* realizados anteriormente (M. Diaz, 2009), se obtuvieron esfuerzos admisibles rasantes a partir de pruebas de corte directo, estos se realizaron para los tres perfiles (AD-900, AD-600 y AD-730) y los resultados se muestran en la Tabla N° 4.9.

Tabla N° 4.9. Resultados del ensayo de adherencia.
Fuente: M. Diaz 2009.

Perfil	Calibre	Espesor de losa (mm)	Esfuerzo admisible (kPa)
AD-900	22	150	227.52
AD-900	22	150	191.23
AD-900	22	150	234.38
AD-600	22	227	201.04
AD-600	22	227	223.59
AD-600	22	227	268.70
AD-730	22	317	145.14
AD-730	22	317	141.22
AD-730	22	317	171.62

En las dos últimas tablas de resultados, se observa que los esfuerzos resistentes obtenidos por el método del trabajo, desarrollado en esta investigación, son menores a los que se obtuvieron de los ensayos *Pull-out*, y la explicación para ello es que al ser un ensayo a escala natural se presentan otros factores que afectan al desarrollo de la adherencia, uno de estos es el desprendimiento vertical, efecto que no se reproduce en los ensayos *Pull-out*.

Otro de los factores es el pandeo local de las caras laterales de los valles de la placa colaborante (*web crippling*), que genera un desprendimiento inicial entre el concreto y la lámina de acero, el cual se va expandiendo a medida que se va incrementando la carga puntual a los tercios. Este efecto mencionado se ve en la Figura N° 4.36.



Figura N° 4.36 Pandeo local de las caras laterales de los valles de la placa colaborante.

Sin embargo, con los resultados obtenidos se puede encontrar una relación entre los esfuerzos resistentes en el ensayo *Pull-out* y el ensayo a flexión a través del Método del Trabajo, esta relación es mostrada a continuación mediante porcentajes y puede seguir ajustándose a medida que se realicen más ensayos.

$$\text{Perfil AD-600: } \tau_{mt} = 49\% \cdot \tau_{po}$$

$$\text{Perfil AD-730: } \tau_{mt} = 85\% \cdot \tau_{po}$$

Donde:

τ_{po} : Esfuerzo resistente al corte por adherencia obtenido del ensayo *Pull-out*.

τ_{mt} : Esfuerzo resistente al corte por adherencia obtenido por el Método del Trabajo.

Es importante indicar que las curvas de esfuerzo resistente al corte por adherencia versus el desplazamiento relativo en el extremo pueden ser usados para un modelamiento numérico, a través de modelos constitutivos de adherencia, y para su uso, los esfuerzos deben convertirse en fuerzas y asignarlas a los conectores que idealizan la interacción entre el concreto y la lámina de acero, esta historia del corrimiento en el extremo permitirá calibrar correctamente el modelo y ajustar adecuadamente las propiedades de interacción. Asimismo, también se puede usar los máximos esfuerzo en métodos analíticos para determinar la resistencia de las losas.

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- De acuerdo a las consideraciones del Eurocódigo 4, las losas con el perfil AD-900 presentan un comportamiento dúctil para todas las combinaciones de los parámetros geométricos (espesor y luz libre). Caso contrario ocurre con las losas con los perfiles AD-730 y AD-600, que tienen un comportamiento frágil. Estos resultados muestran el efecto de la sobrerresistencia en el comportamiento global del entrepiso.
- El comportamiento casi lineal del espécimen L-011 ($t=115$ mm), es un caso particular que, debido a su esbeltez ($t/L=0.03$), puede ser un punto de transición entre la falla por cortante longitudinal a una falla por flexión, y para corroborar esta hipótesis se deberán ensayar especímenes más esbeltos con el fin de observar si el comportamiento es similar a lo obtenido.
- En algunas de las losas en estudio se observa que la carga de desprendimiento ocurre bajo una deflexión que supera el límite de servicio ($L/360$), por ello se debe determinar un porcentaje de reducción, tanto para las losas esbeltas y compactas, para luego obtener la carga que condiciona la funcionalidad del sistema de entrepiso. El porcentaje de reducción es mucho mayor para el perfil AD-900, que presenta hasta un 45%, en comparación al Perfil AD-730 que tiene un 30% de reducción, ambos valores para la región de losas esbeltas.
- La regresión lineal realizada a los datos experimentales, según el método propuesto, presenta un mejor ajuste para el perfil AD-900 y AD-600, mientras que para el perfil AD-730 se obtuvieron algunos resultados dispersos que no mantenían la tendencia lineal y afectaron directamente a los parámetros de ajuste.
- Existe una buena aproximación entre la carga de desprendimiento experimental, obtenida en los ensayos a flexión, y la carga de desprendimiento teórica, proporcionada por los dos métodos en estudio, esta comparación muestra una buena confiabilidad del nuevo método propuesto y su posible uso para determinar la carga de desprendimiento para distintas combinaciones de los parámetros geométricos y mecánicos.

- En la comparación de cargas de funcionalidad para ambos métodos, método propuesto y el “Método m y k”, se aprecia que las cargas obtenidas por el primero de ellos generan cargas teóricas menores, y esto se debe a que en este nuevo método se está incluyendo criterios de deflexión admisible en el estado de servicio, condición que no toma en cuenta el “Método m y k”.
- El nuevo método propuesto puede ser usado como una nueva alternativa de diseño, pues es una herramienta que permite determinar la carga que limita la funcionalidad del sistema a partir del estudio de la carga de desprendimiento y la deflexión máxima permitida en su estado de servicio. Además, a partir de la carga obtenida por este nuevo método, se puede calcular la sobrecarga admisible para cada combinación de espesor de losa, calibre y luz libre; así como para una resistencia de concreto en específica.
- La aplicación de la nueva metodología de diseño será válida si la losa en estudio se encuentra entre los límites de esbelteces (t/L) que se han definido en este estudio, Perfil AD-900 (0.025 a 0.050), Perfil AD-730 (0.038 a 0.073) y Perfil AD-600 (0.030 a 0.053). Estos valores limitan la falla por cortante longitudinal, predominante en todos los especímenes, y que podrían variar, mediante nuevos ensayos, hasta definir las esbelteces que muestren la transición a la falla por cortante vertical y a la falla por flexión.
- El esfuerzo resistente al corte por adherencia obtenido por el método de trabajo para el Perfil AD-600 varía desde 81.59 a 141.90 kPa y para el Perfil AD-730 de 85.22 a 237.71 kPa. Estos resultados son menores a los que se obtuvieron en los ensayos *Pull-out* (M. Diaz, 2009), y esto se debe a que los esfuerzos obtenidos provienen de un ensayo a flexión a escala natural, en donde el desprendimiento longitudinal puede ser afectado por el desprendimiento vertical en los puntos de aplicación de las cargas y por el pandeo local de las caras laterales de los valles de la placa colaborante.
- En la historia de la evolución de los esfuerzos cortantes longitudinales, obtenidos a partir del método del trabajo, se observa que el pico máximo del esfuerzo se obtiene cerca al punto de desprendimiento y en desplazamiento relativos pequeños; sin embargo, pasado ese punto el esfuerzo cortante sigue en continuo desarrollo, permitiendo mayores

desplazamientos relativos en los extremos, que varían de 3 a 10 mm para el perfil AD-730 y de 5 a 10 mm para el perfil AD-600.

- Las curvas del esfuerzo resistente al corte por adherencia versus el desplazamiento relativo en el extremo, son datos experimentales que permiten caracterizar las propiedades de interacción del concreto y la lámina de acero, esto con la finalidad de desarrollar modelos numéricos y calibrarlos hasta definir los parámetros que caracterizan la conexión entre ambos materiales, mediante modelos constitutivos de adherencia.
- Los porcentajes de reducción que relacionan a los esfuerzos resistentes obtenidos en los ensayos *Pull-out* y por el método del trabajo, muestran que existe la posibilidad de desarrollar sólo ensayos de adherencia por corte directo para caracterizar un nuevo perfil y cuantificar el aporte de las muescas, para posteriormente trasladar esos resultados a una escala natural a través de los porcentajes de reducción. Sin embargo, para ello es necesario ajustar esta relación a través de más ensayos y verificar la influencia de la esbeltez en el desarrollo del esfuerzo resistente al corte por adherencia.

5.2 Recomendaciones

- La profundidad de las muescas es una propiedad fundamental en este tipo de losas con placa colaborante, pues es la que garantiza una correcta interacción entre el concreto y la lámina de acero, por ello es importante verificar esto antes de realizar las pruebas, pues podría afectar el comportamiento de cada espécimen y obtener cargas que estén muy por debajo de lo esperado teóricamente.
- Se debe evitar realizar ciertas maniobras que puedan influir en la resistencia final de las losas, como son el manipuleo y su traslado desde la zona de construcción hasta la zona de ensayo, pues ello podría generar pequeños desprendimientos en algunas zonas de la losa. Además, cargar la losa desde puntos que están próximos al centro de la luz, pueden generar volados de gran longitud que produzcan desprendimientos en los extremos.
- Uno de los objetivos de esta investigación fue determinar el esfuerzo resistente al corte por adherencia a través del método del trabajo, a partir del cual se obtuvieron conclusiones válidas que explican el porqué de la variación con los ensayos *Pull-out*. Sin embargo, con la finalidad de validar aún más estos resultados teóricos, se puede determinar el esfuerzo resistente a partir de otros métodos analíticos, como es el método de equilibrio de fuerzas.
- El esfuerzo resistente al corte por adherencia y su evolución en el tiempo pueden ser aplicado en modelos numéricos, de manera que se caracterice la interacción entre el concreto y la lámina de acero. Este nuevo estudio tendría como objetivo calibrar el modelo numérico con los ensayos a flexión que se han llevado a cabo.
- Aplicar la metodología descrita en esta investigación en losas con restricciones en los extremos, apoyada en vigas metálicas o de concreto, puede permitir un análisis más real de las losas con placa colaborante, pues es lo que más se asemejaría constructivamente. Asimismo, a través de los ensayos a flexión, se puede cuantificar la influencia de las restricciones en los extremos en la obtención de las cargas que garanticen la funcionalidad del sistema.
- Se recomienda ensayar losas en las que no predomine la falla por cortante longitudinal, es decir construir losas cortas (compactas) para visualizar la

falla por corte y losas largas (esbeltas) para identificar la falla por flexión, esto con el fin de identificar claramente la transición entre los distintos tipos de falla, que sería propio de cada perfil.

- En los futuros ensayos a flexión de las losas, sería recomendable instalar dispositivos que midan la deformación unitaria de la lámina de acero de la placa colaborante, con la finalidad de tener registro de como varía el esfuerzo en el acero y tener datos experimentales de que, para los límites de esbelteces definidos en este estudio, el acero no llega al esfuerzo de fluencia.
- El desarrollo de ensayos cíclicos podría ser un estudio complementario para entender mejor el comportamiento de las losas con placa colaborante, pues para cada deflexión objetivo se podría visualizar una deflexión residual, que estaría directamente relacionada al grado de recuperación de la placa colaborante en su estado elástico y al nivel de agrietamiento del concreto. Asimismo, estas pruebas ayudarían a determinar el límite de reparabilidad, asociada a la carga de desprendimiento, de las losas compuesta con placa colaborante, para los distintos tipos de perfiles y calibres que fueron estudiados previamente en esta investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. American Iron and Steel Institute (2016), "AISI S100-16 North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members", Canada.
2. American Society for Testing and Materials, "ASTM A653/A653M - 09: Standard Specification for Steel Sheet, Zinc-Coated (Galvanized) or Zinc-Iron Alloy-Coated (Galvannealed) by the Hot-Dip Process". ASTM standard, West Conshohocken, Pennsylvania.
3. American Society for Testing and Materials, "ASTM C78 - 09: Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)". ASTM standard, West Conshohocken, Pennsylvania.
4. American Society of Civil Engineers (1992), "ANSI/ASCE 3-91 Standard for the Structural Design of Composite Slabs". New York.
5. American Society of Civil Engineers (1992), "ANSI/ASCE 9-91 Standard Practice for Construction and Inspection of Composite Slabs". New York.
6. Comité Europeo de Normalización (2004), "Eurocódigo 4: Diseño de Estructuras Compuestas de acero y hormigón, Reglas Generales y Reglas para Edificación" (EN 1994-1-1:2004).
7. Acero Procesados S.A (2009). "Manual Técnico". Departamento de Ingeniería e Investigación. Lima.
8. Diaz, M. (2009). "Estudio Experimental de la Resistencia de Adherencia al Corte en Losas con Placa Colaborante" (tesis de pregrado). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
9. Echevarría, L. & Gutiérrez, J. P. (2012). "Análisis crítico sobre el ensayo m-k de forjados de chapa colaborante". Revista ALCONPANT, Volumen 2, Número 3.
10. Pineda, M. (2005). "Diseño de Elementos Estructurales de Sección Compuesta con LRFD" (tesis de pregrado). Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, México.
11. Abdullah, R. (2004). "Experimental Evaluation and Analytical Modeling of Shear Bond in Composite Slabs" (PhD Thesis). Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia, United States.
12. Steel Deck Institute (2017). "ANSI/SDI C-2017 Standard for Composite Steel Floor Deck-Slabs". Pennsylvania.

13. Vicente, R. (2004). "Redistribución de esfuerzos en forjados de chapa nervada y hormigón continuos" (tesis doctoral). Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.
14. Wright, H. D. & Evans, H. R. (1990). "A Review of Composite Slab Design". Proceedings of the 10th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures, St. Louis Missouri, 27-47.
15. Schuster, R. M. (1970). "Strength and behavior of Cold-Rolled Steel-Deck-Reinforced Concrete Floor Slabs", PhD Dissertation, Iowa State University, Ames, Iowa.
16. Porter, M. L. & Ekberg, C. E. (1976). "Design Recommendation for Steel Deck Floor Slab". Journal of the Structural Division, 102(ST11), 2121-2136.
17. Daniels, B. J. (1988). "Shear Bond Pull-out Tests for Cold-Formed-Steel Composite Slabs". ICOM – Construction Metallique, Department de Genie Civil, Ecole Polytechnique Federal de Lausanne.
18. Johnson, R. P. (1994). "Composite Structures of Steel and Concrete, Vol. 1: Beams, Slabs, Columns, and Frames for Buildings". Blackwell Scientific Publication, Oxford.
19. Burnet, M. (1998). "Analysis of Composite Steel and Concrete Flexural Members that Exhibit Partial Shear Connection" (PhD Thesis). University of Adelaide, Australia.

ANEXO A. PANEL FOTOGRÁFICO



Figura A.1 Ubicación de transductores para medir la rotación de las caras externas de la losa.



Figura A.2 Estado inicial de la losa L-012.



Figura A.3 Estado final de la losa L-012



Figura A.4 Medición de la deflexión residual después del ensayo.



Figura A.5 Disposición de los transductores para medir el desplazamiento relativo en el extremo para el perfil AD-600.



Figura A.6 Estado final de la placa colaborante (AD-600) después del ensayo a flexión.



Figura A.7 Estado inicial de la losa L-014.



Figura A.8 Ubicación de los transductores para medir las deflexiones de la losa.



Figura A.9 Disposición de los transductores para medir el desplazamiento relativo en el extremo para el perfil AD-730.



Figura A.10 Estado final de la placa colaborante (AD-730) después del ensayo a flexión.



Figura A.11 Grieta diagonal producida en el punto de aplicación de la carga.

ANEXO B. ENSAYOS DE FLEXIÓN ESTÁTICA (M. DIAZ, 2009)

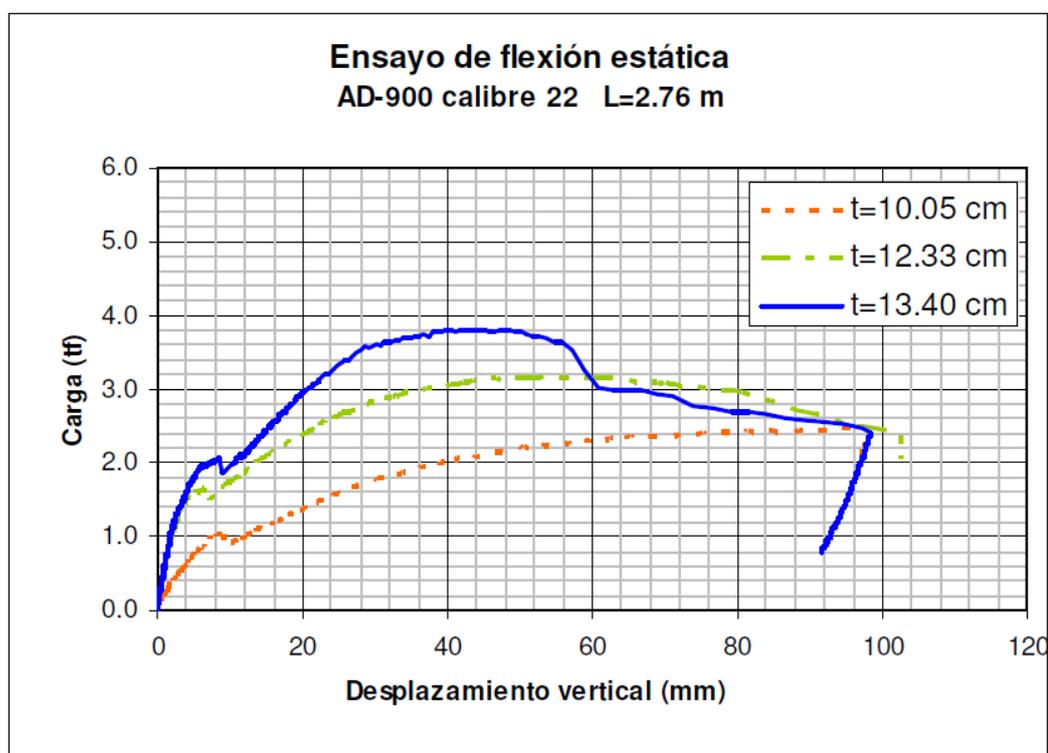


Figura B.1 Ensayo de flexión estática en especímenes E-001, E-002 y E-003 de alturas 10.05, 12.33 y 13.40cm; respectivamente.

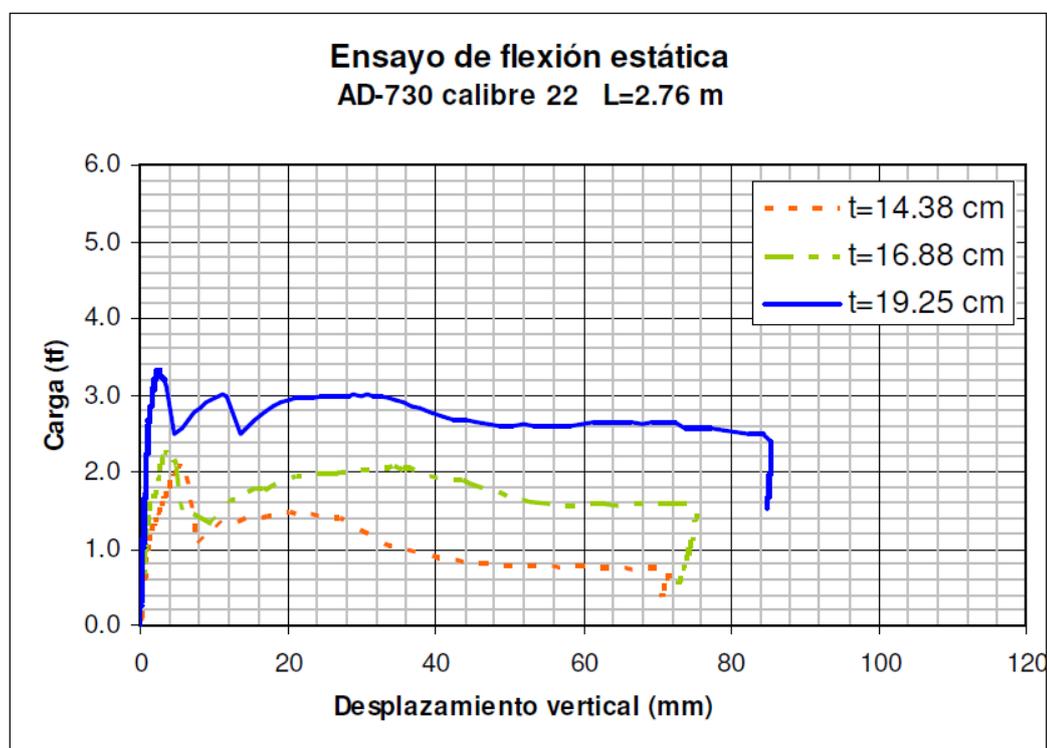


Figura B.2 Ensayo de flexión estática en especímenes E-004, E-005 y E-006 de alturas 14.38, 16.88 y 19.25cm; respectivamente.

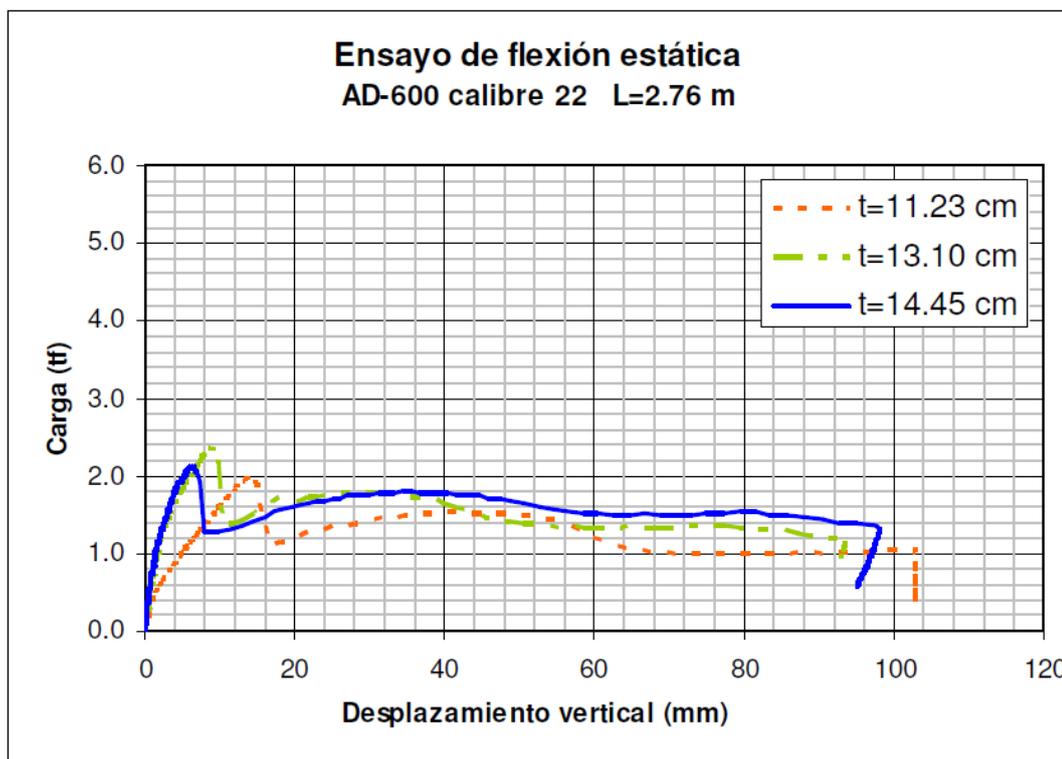


Figura B.3 Ensayo de flexión en especímenes E-007, E-008 y E-009 de alturas 11.23, 13.10 y 14.45cm; respectivamente.

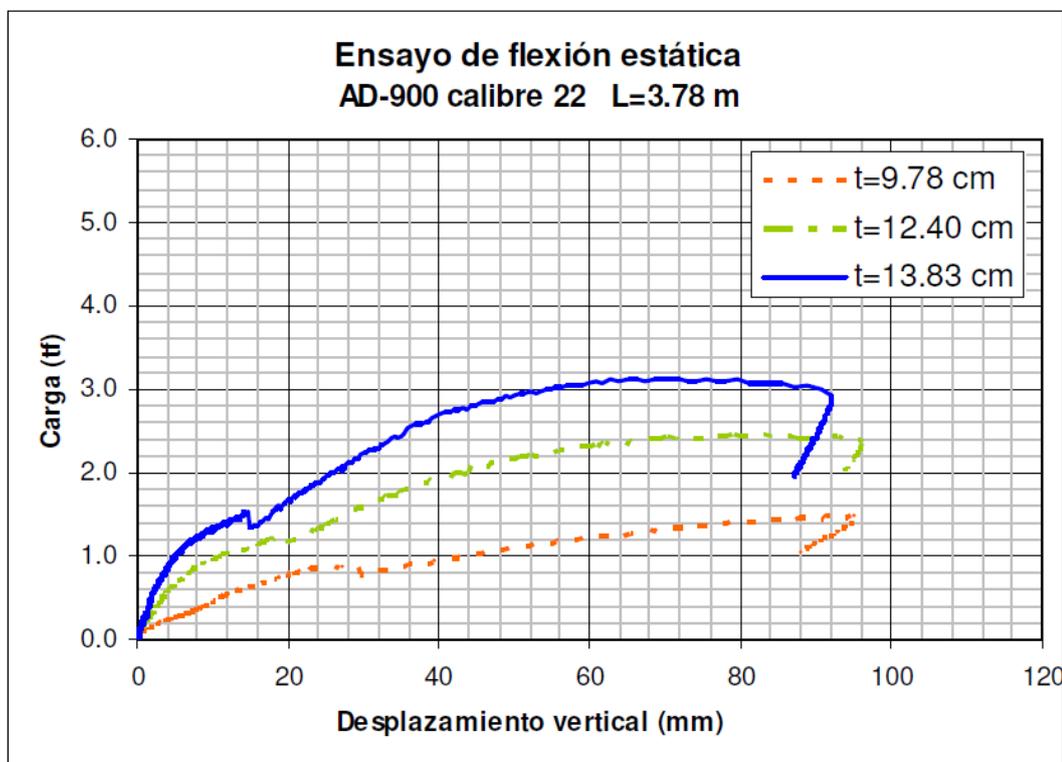


Figura B.4 Ensayo de flexión en especímenes E-010, E-011 y E-012 de alturas 9.78, 12.40 y 13.83cm; respectivamente.

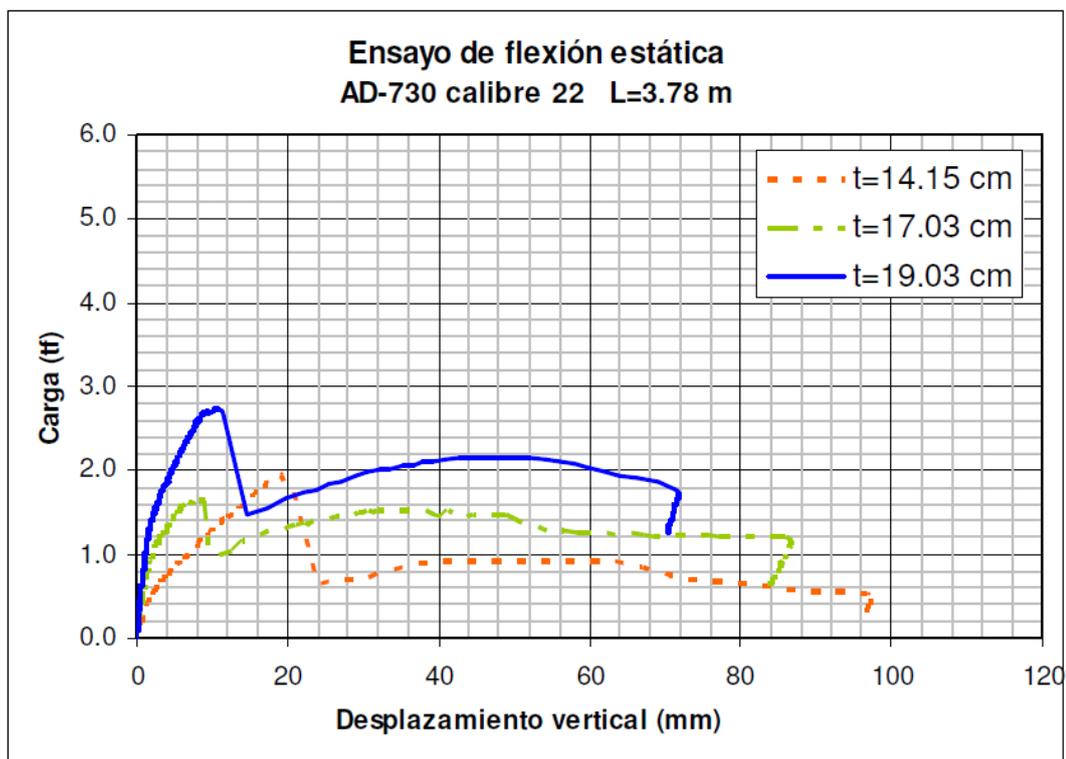


Figura B.5 Ensayo de flexión en especímenes E-013, E-014 y E-015 de alturas 14.15, 17.03 y 19.03cm; respectivamente.

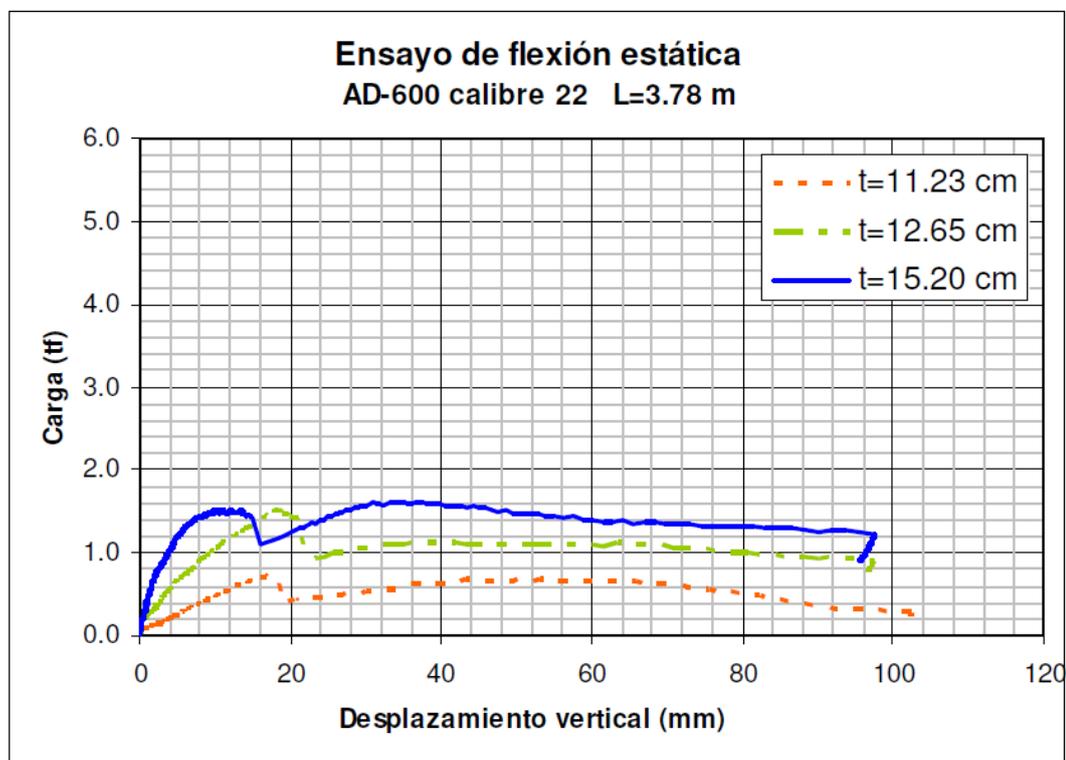


Figura B.6 Ensayo de flexión en especímenes E-016, E-017 y E-018 de alturas 11.23, 12.65 y 15.20cm; respectivamente.

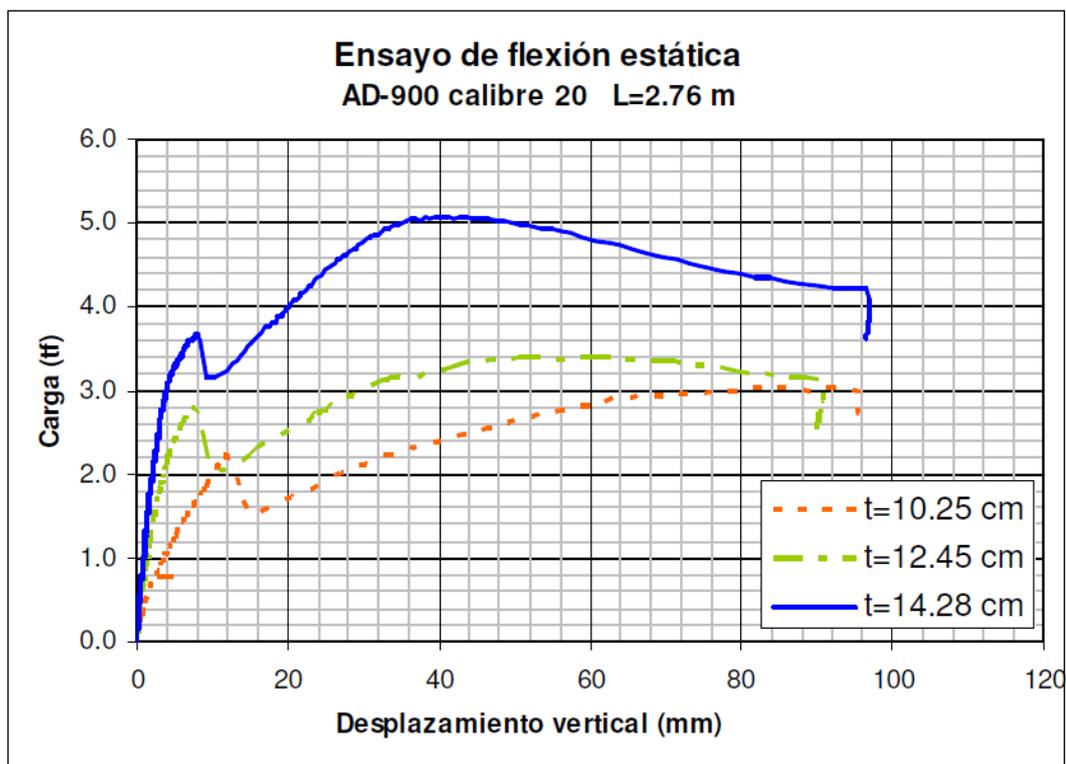


Figura B.7 Ensayo de flexión en especímenes E-019, E-020 y E-021 de alturas 10.25,12.45 y 14.28cm; respectivamente.

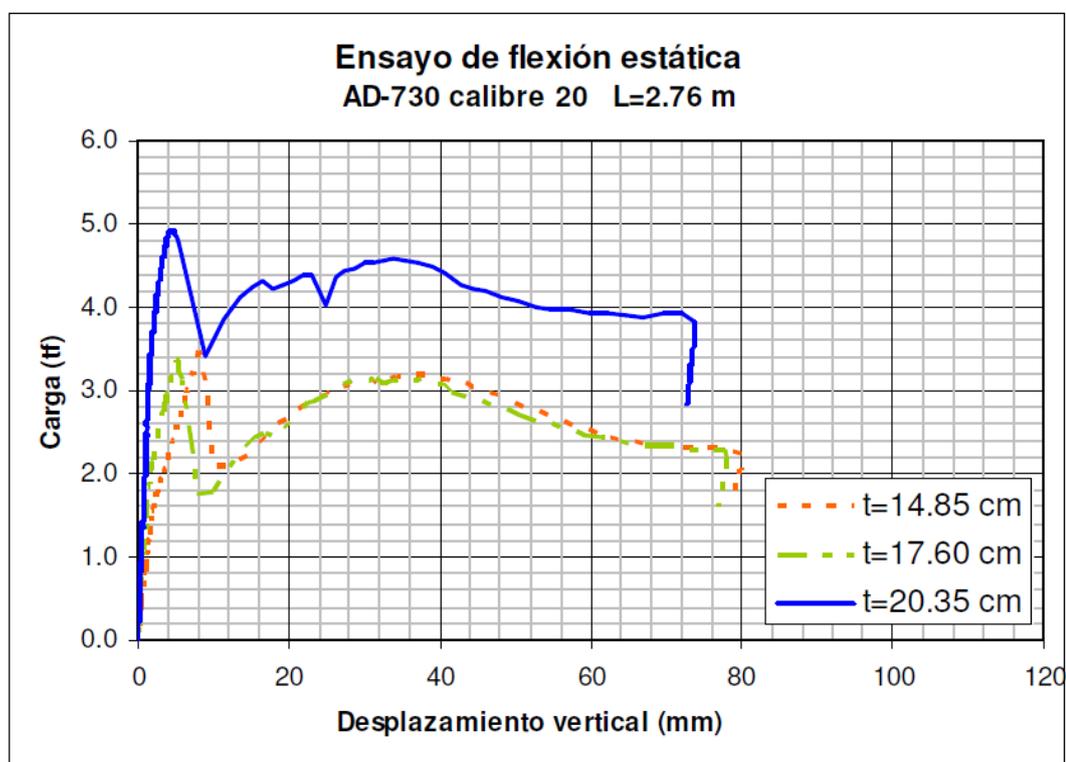


Figura B.8 Ensayo de flexión en especímenes E-022, E-023 y E-024 de alturas 14.85, 17.60 y 20.35cm; respectivamente.

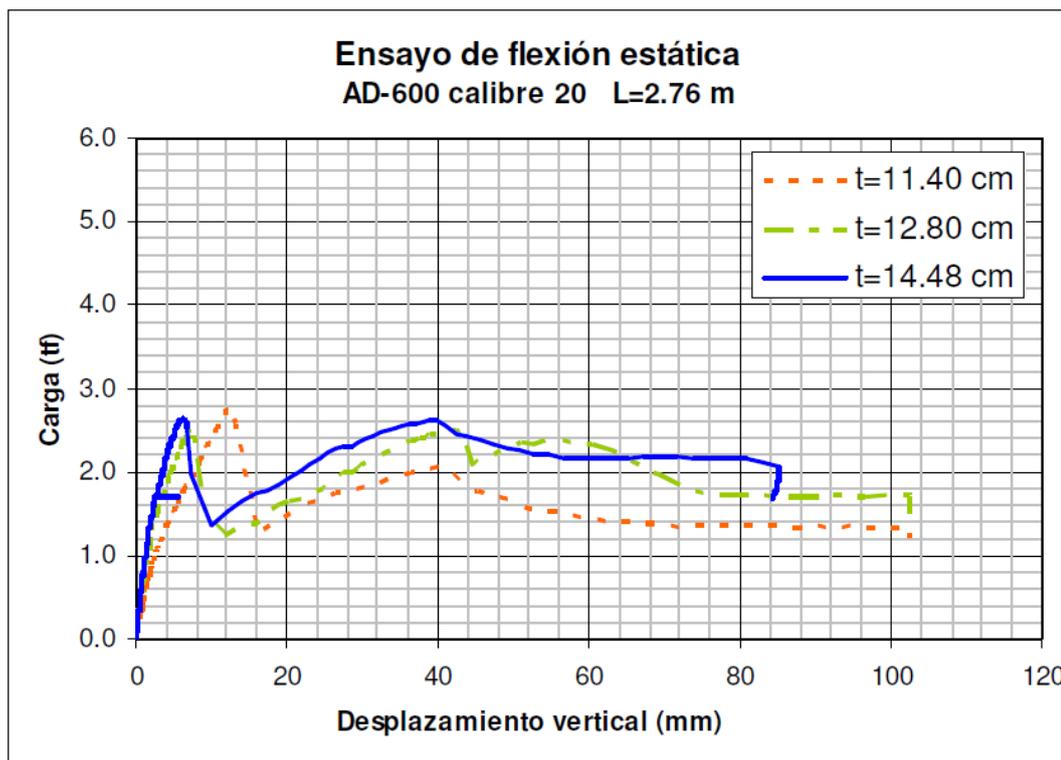


Figura B.9 Ensayo de flexión en especímenes E-025, E-026 y E-027 de alturas 11.40, 12.80 y 14.48cm; respectivamente.

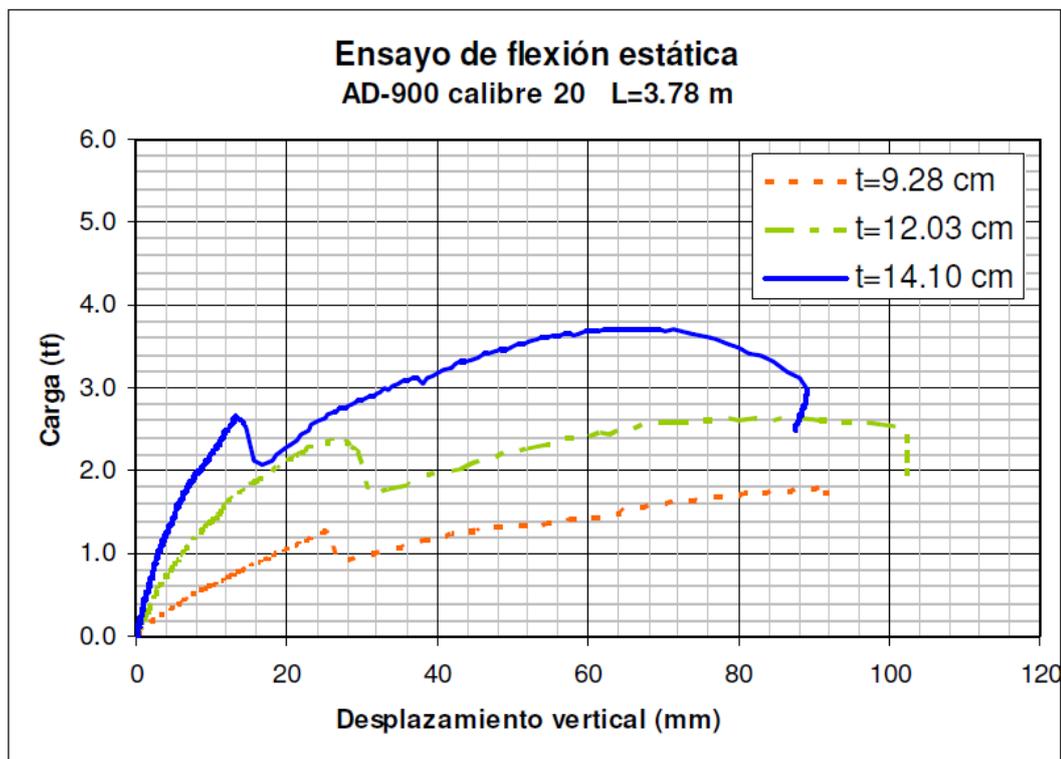


Figura B.10 Ensayo de flexión en especímenes E-028, E-029 y E-030 de alturas 9.28, 12.03 y 14.10cm; respectivamente.

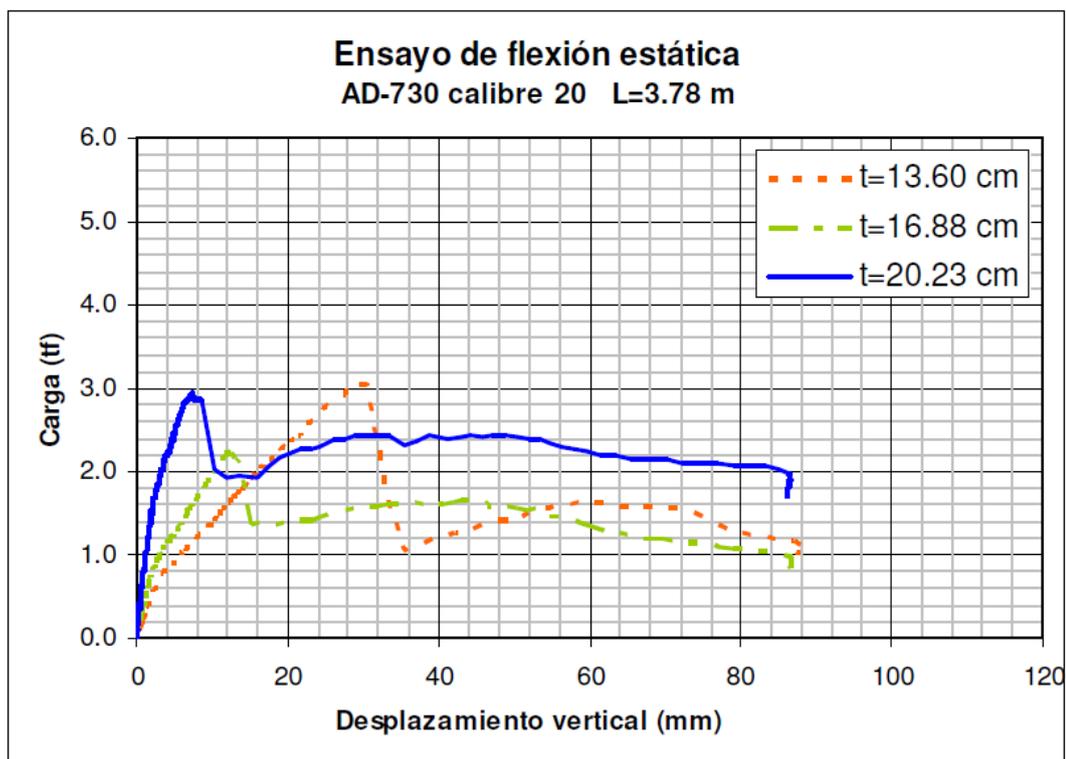


Figura B.11 Ensayo de flexión en especímenes L-031, L-032 y L-033 de alturas 13.60, 16.88 y 20.23cm; respectivamente.

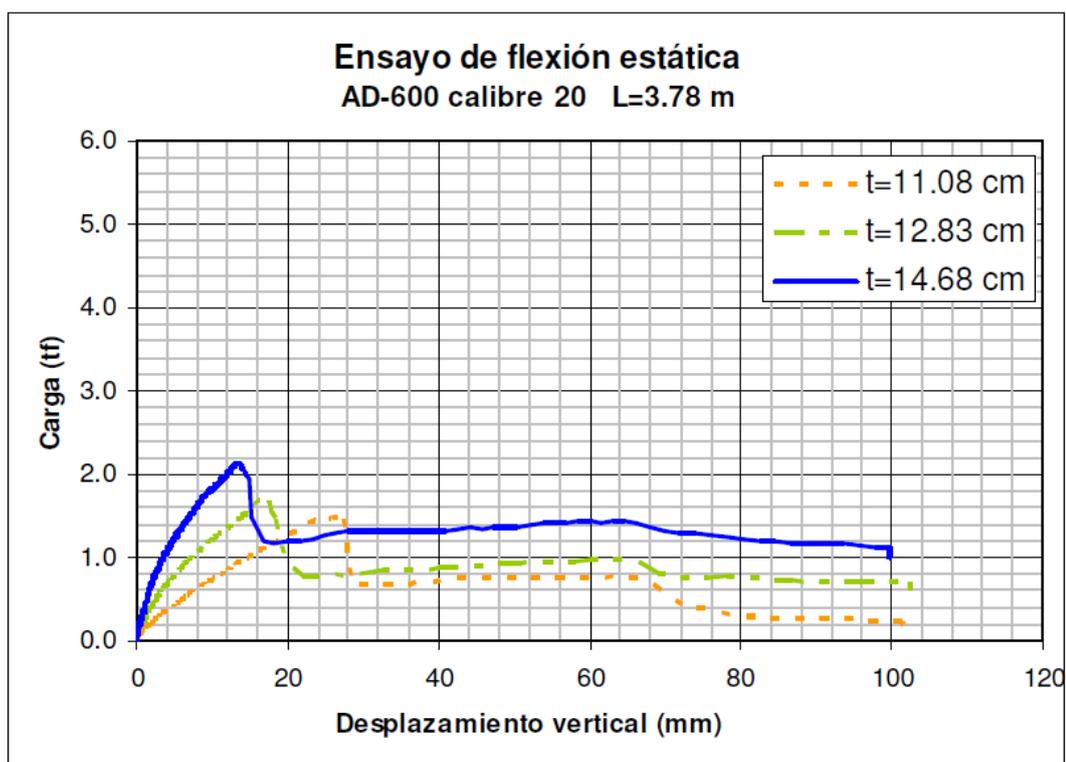


Figura B.12 Ensayo de flexión en especímenes L-034, L-035 y L-036 de alturas 11.08, 12.83 y 14.68cm; respectivamente.

ANEXO C. DESPLAZAMIENTO EN EL EXTREMO DE LA LOSA

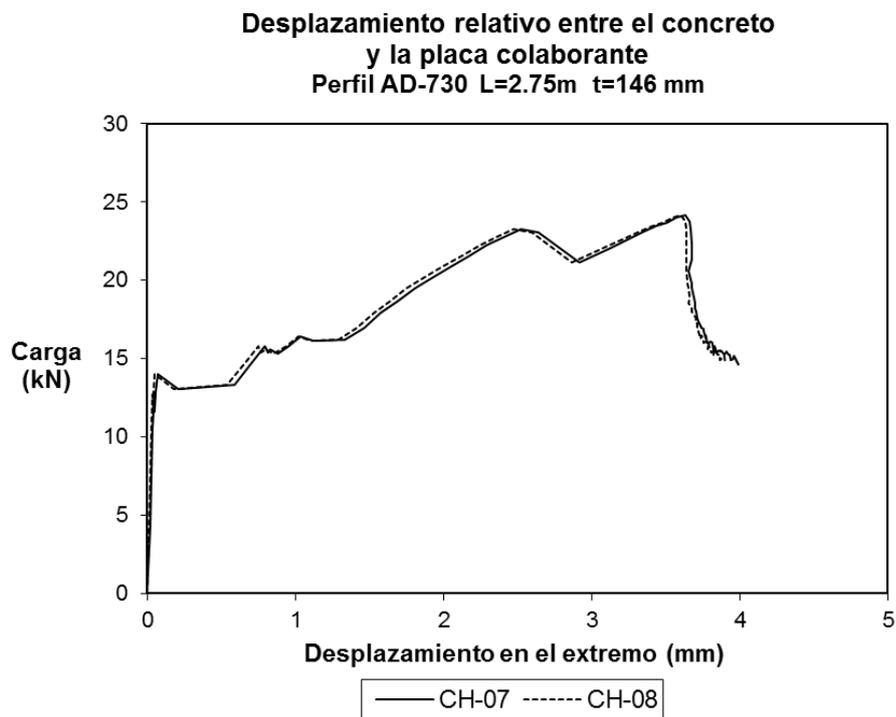


Figura C.1 Desplazamiento relativo en la cara Sur del espécimen L-001.

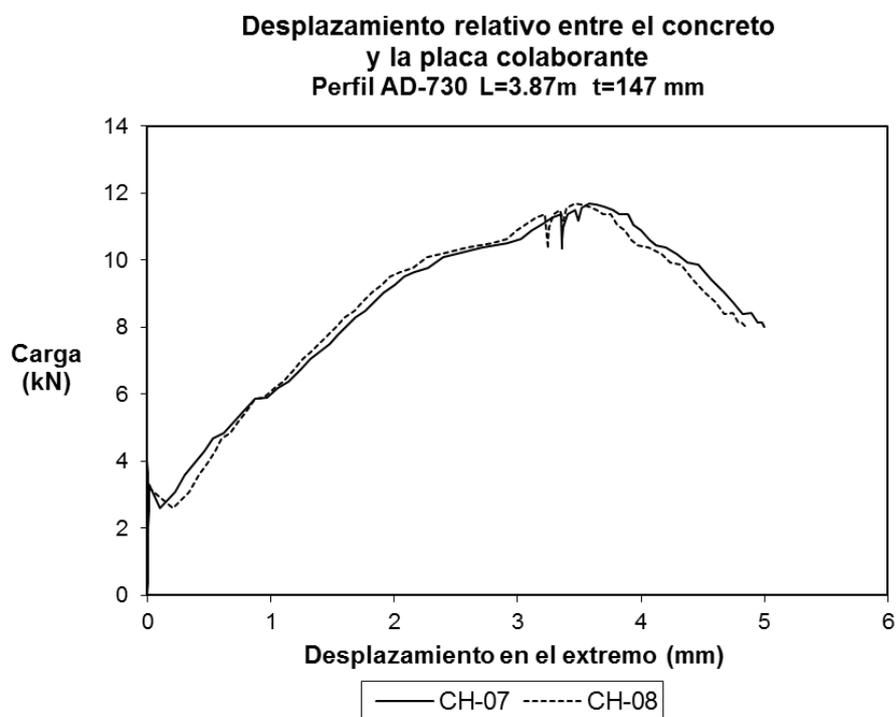


Figura C.2 Desplazamiento relativo en la cara Sur del espécimen L-002.

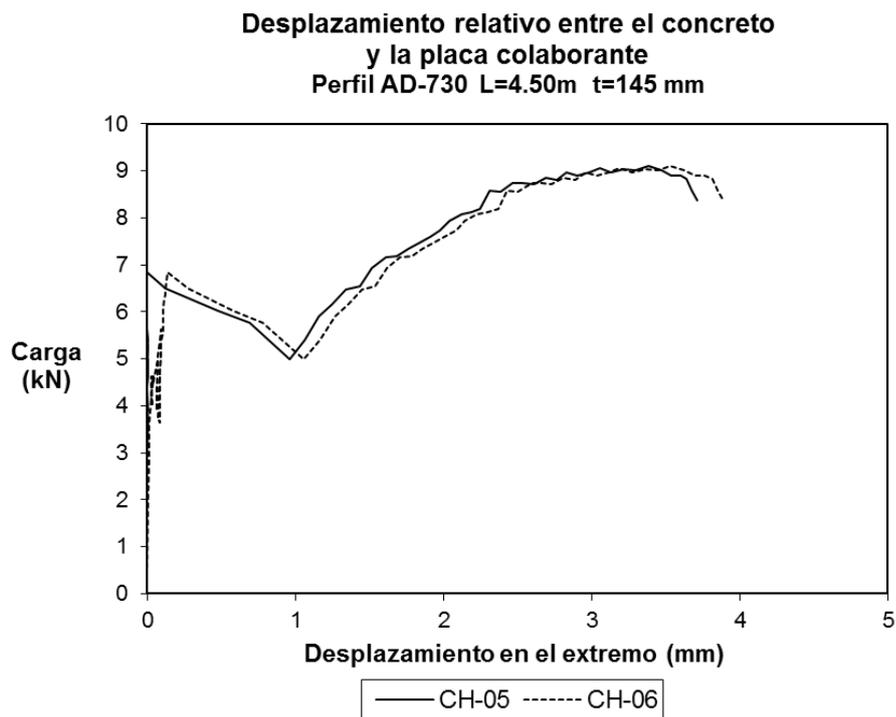


Figura C.3 Desplazamiento relativo en la cara Norte del espécimen L-003.

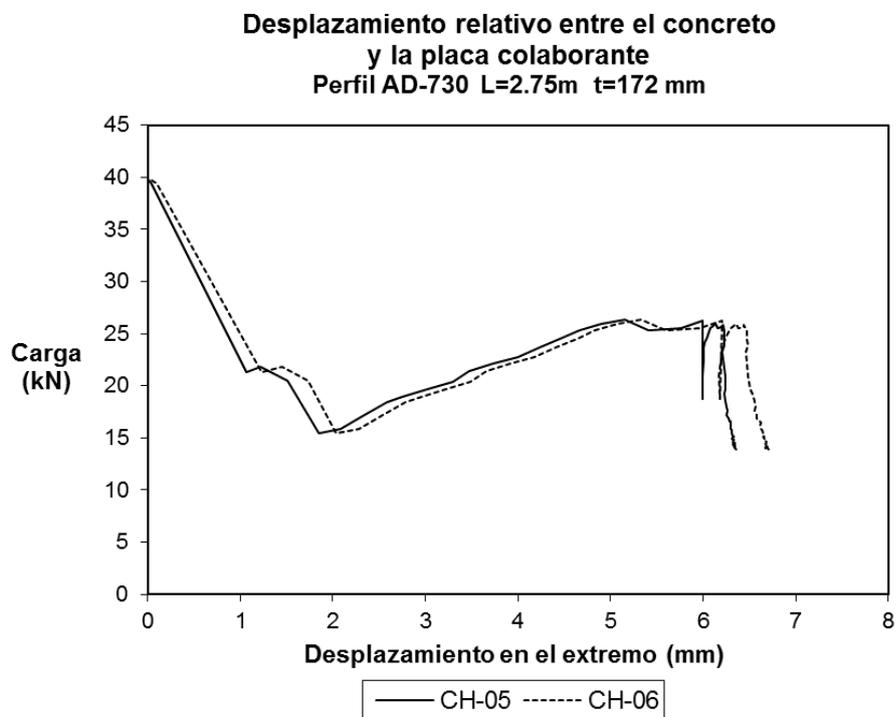


Figura C.4 Desplazamiento relativo en la cara Norte del espécimen L-004.

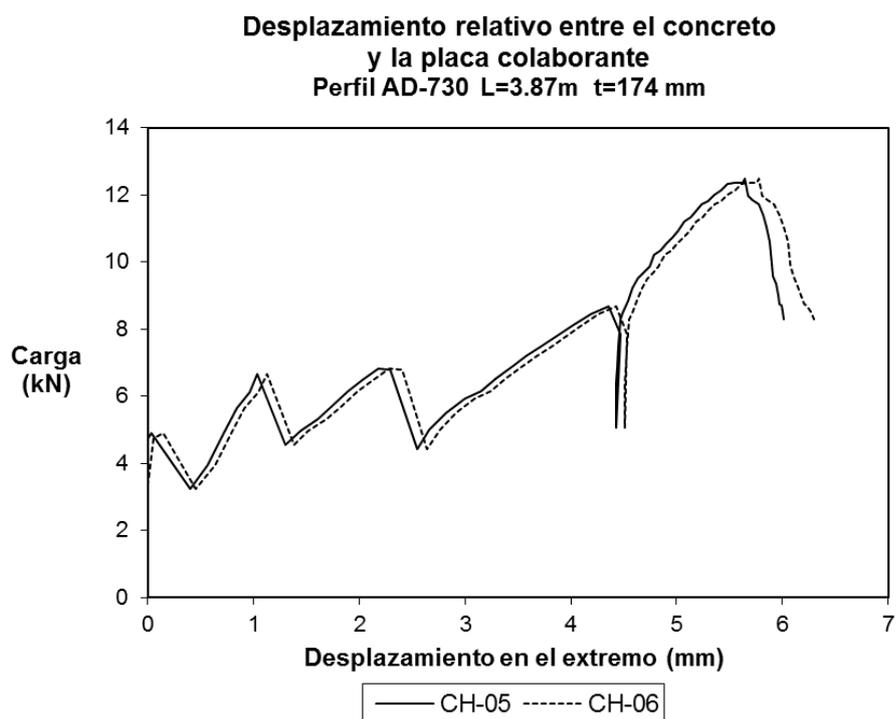


Figura C.5 Desplazamiento relativo en la cara Norte del espécimen L-005.

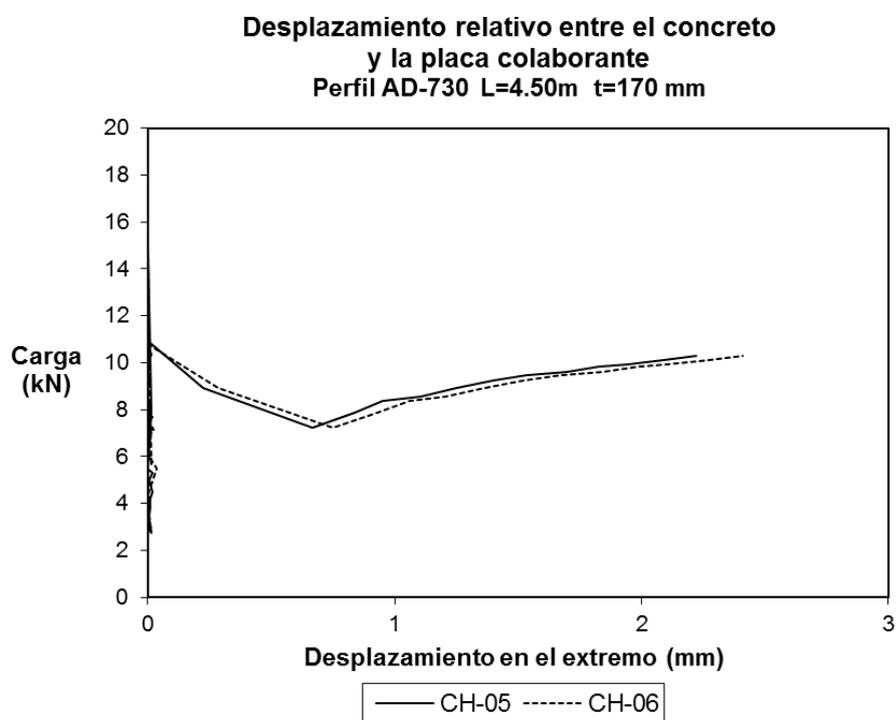


Figura C.6 Desplazamiento relativo en la cara Norte del espécimen L-006.

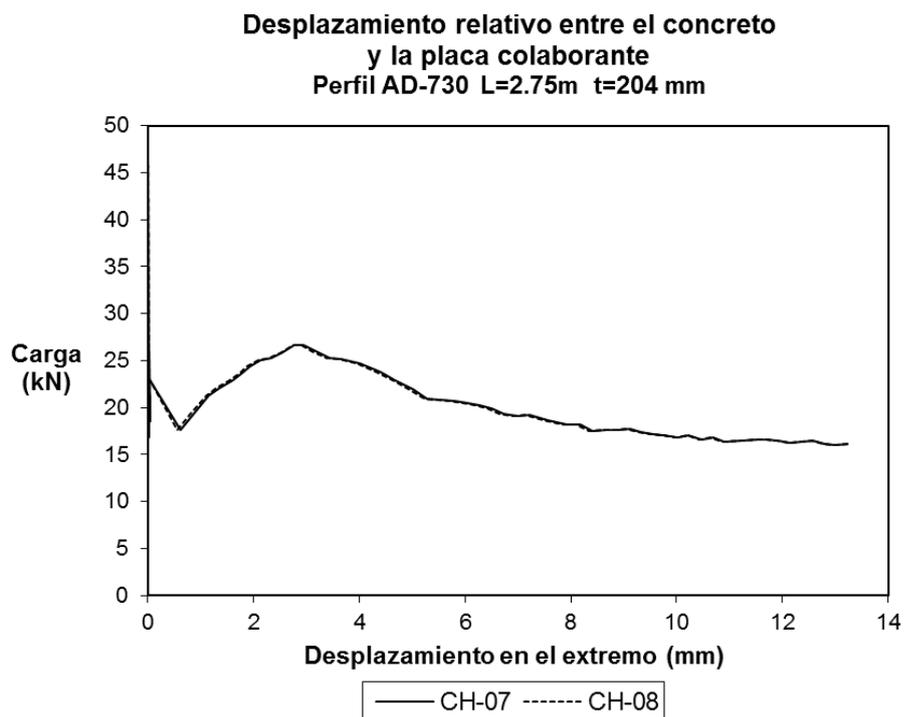


Figura C.7 Desplazamiento relativo en la cara Sur del espécimen L-007.

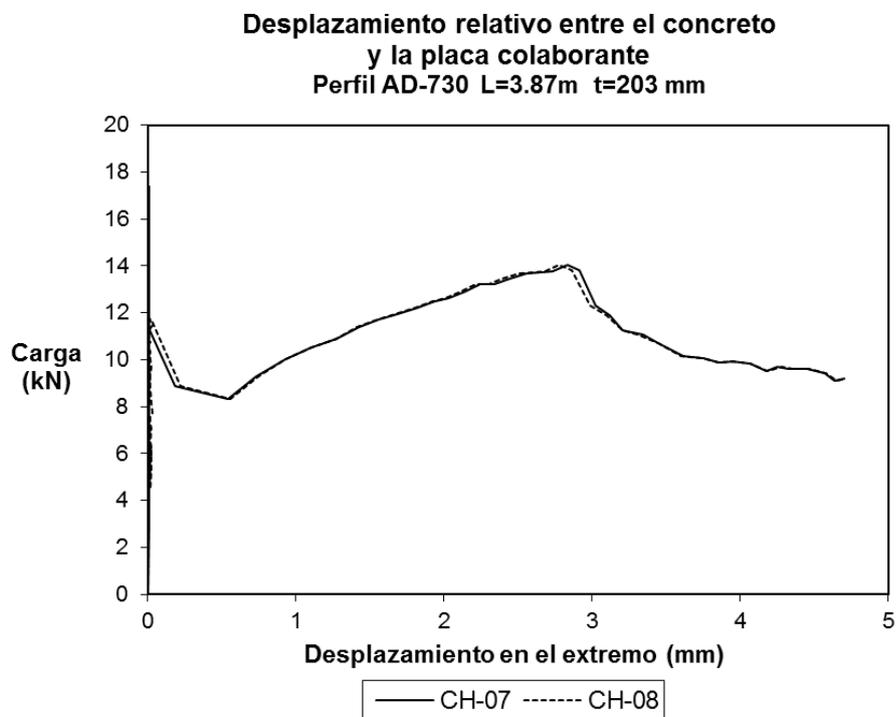


Figura C.8 Desplazamiento relativo en la cara Sur del espécimen L-008.

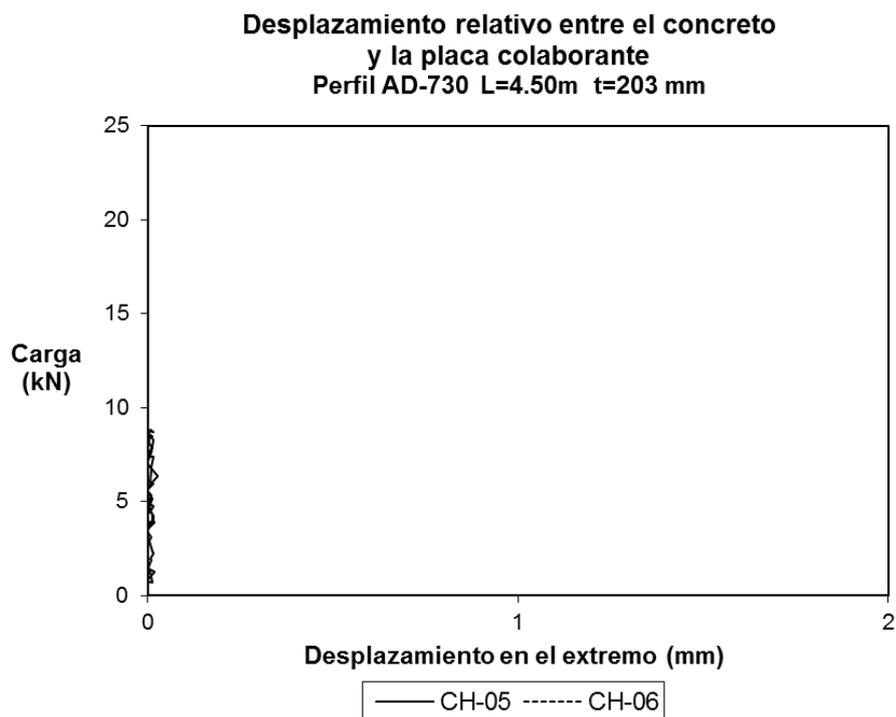


Figura C.9 Desplazamiento relativo en la cara Norte del espécimen L-009.

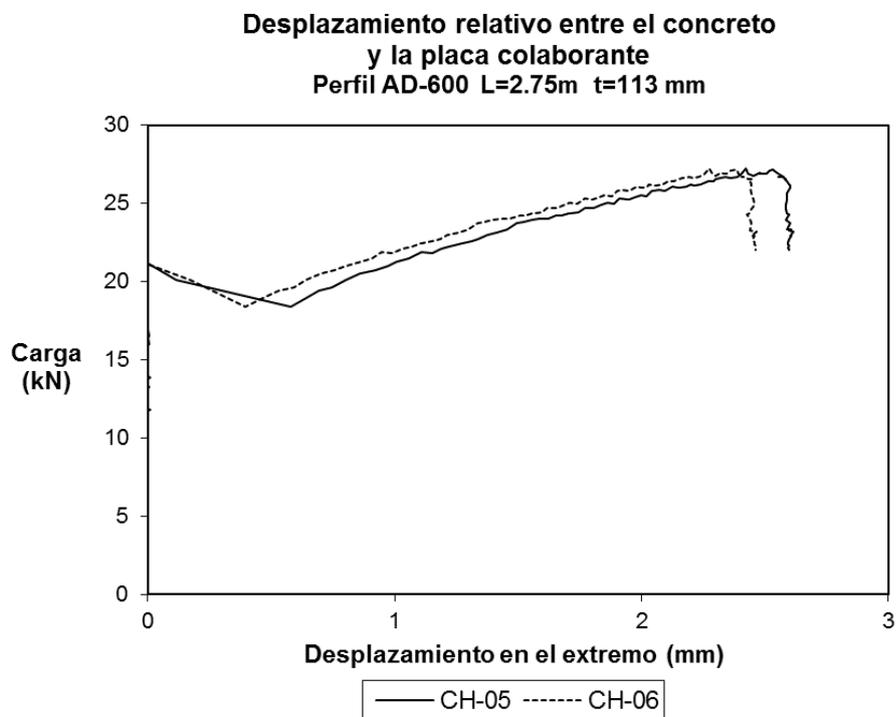


Figura C.10 Desplazamiento relativo en la cara Norte del espécimen L-010.

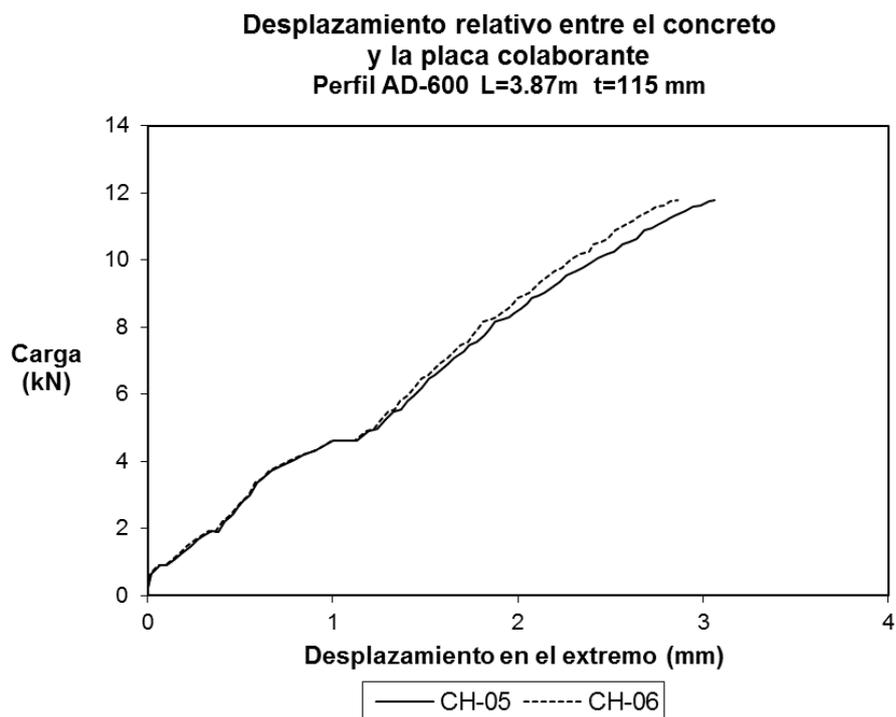


Figura C.11 Desplazamiento relativo en la cara Norte del espécimen L-011.

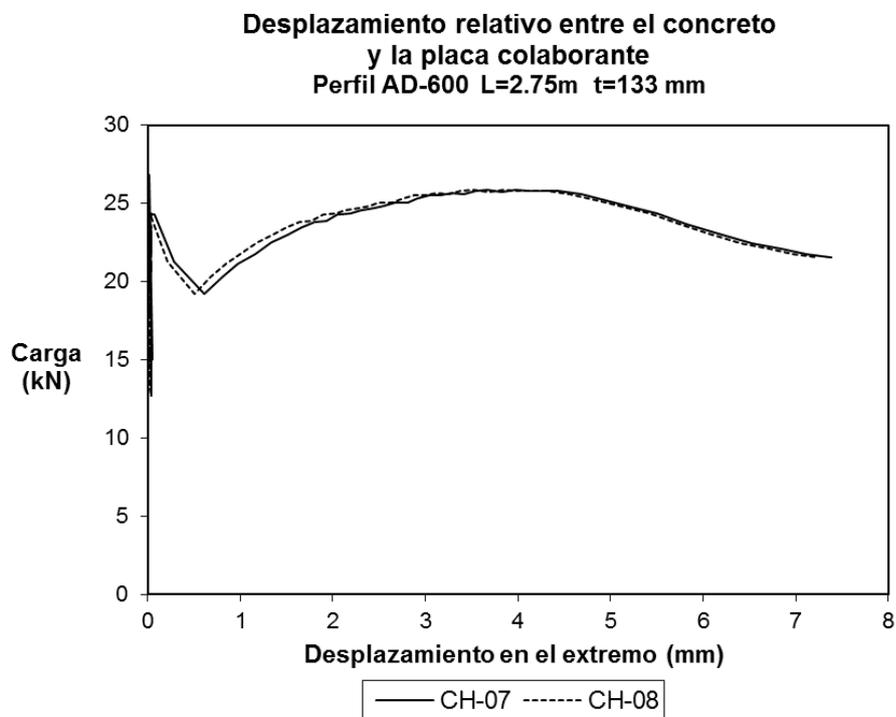


Figura C.12 Desplazamiento relativo en la cara Sur del espécimen L-012.

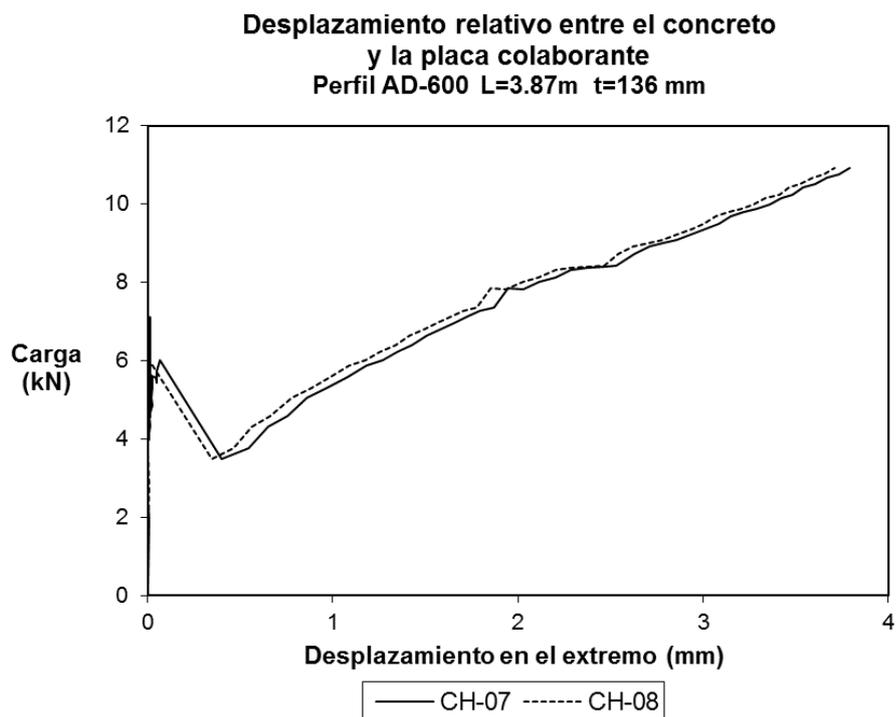


Figura C.13 Desplazamiento relativo en la cara Sur del espécimen L-013.

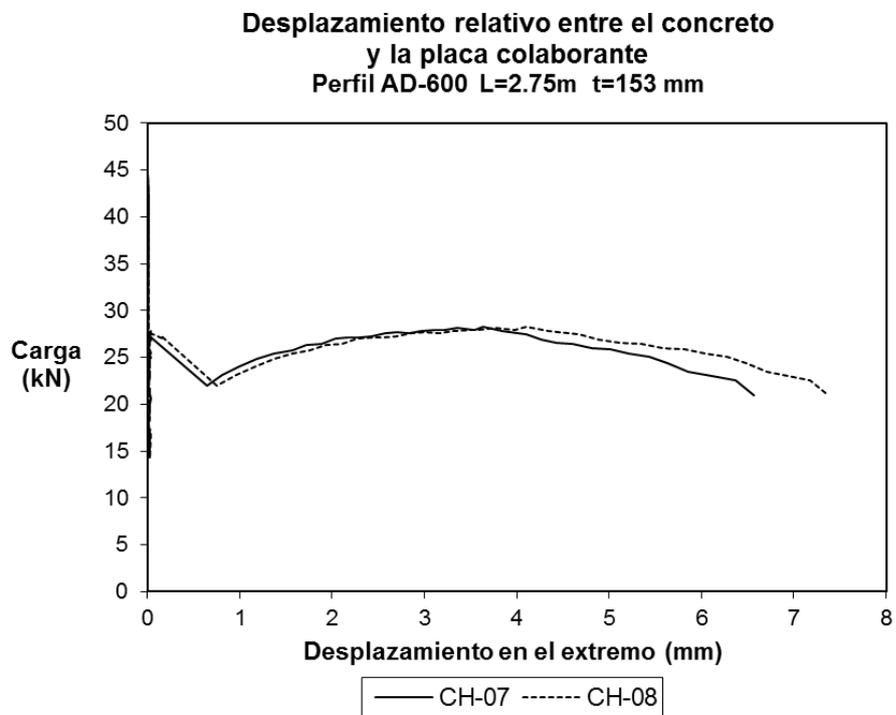


Figura C.14 Desplazamiento relativo en la cara Sur del espécimen L-014.

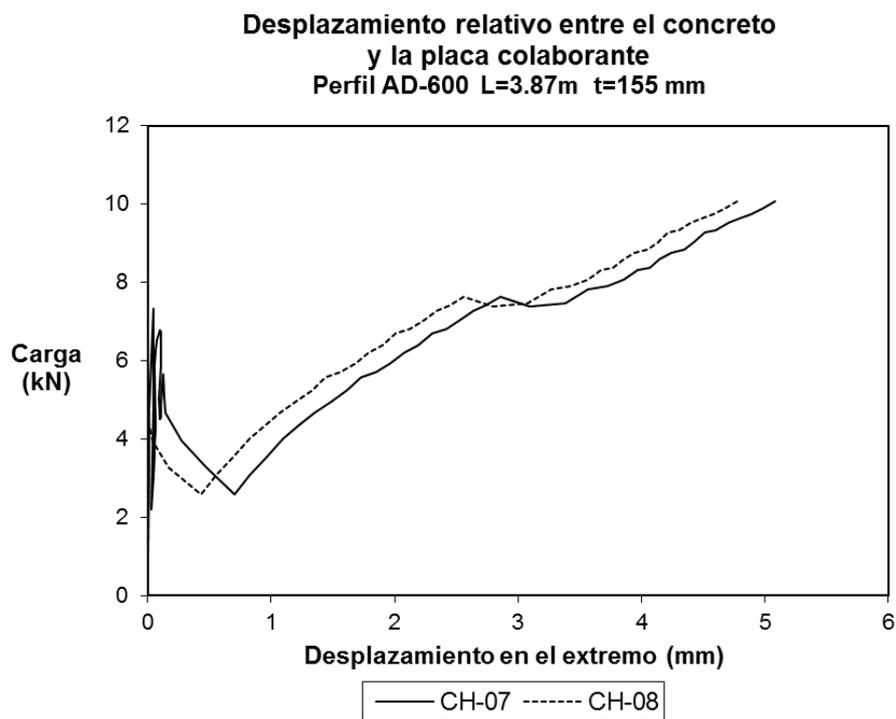


Figura C.15 Desplazamiento relativo en la cara Sur del espécimen L-015.