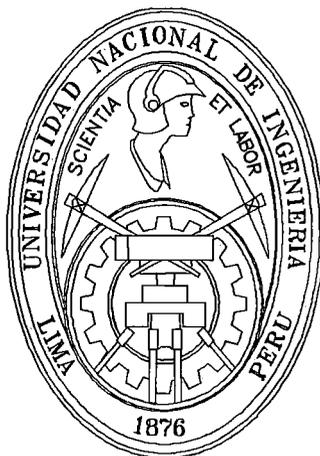


UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



**ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA RESISTENCIA DE
ADHERENCIA AL CORTE EN LOSAS CON PLACA
COLABORANTE**

TESIS

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO CIVIL

MIGUEL AUGUSTO DÍAZ FIGUEROA

Lima – Perú

Digitalizado por:

2009

AGRADECIMIENTO

El más grande agradecimiento a mi familia por su apoyo incondicional durante la elaboración de la tesis, Miguel, Teresa, Ale y Piero. A mi asesor, el Dr. Carlos Zavala Toledo, por sus consejos, ayuda y paciencia en la preparación de esta investigación. A mis amigos, Peter Martel y Guillermo Huaco, por su apoyo desinteresado y asesoramiento en la planificación de los ensayos. Un especial agradecimiento a mis amigos del laboratorio del CISMID, Lourdes Cárdenas, Jorge Salinas, Jenny Taira, Larry Cárdenas y Germán Bautista por la asistencia durante los ensayos, quienes supieron hacer de la investigación una manera entretenida de obtener conocimientos. También, a Rollin Buse, en representación de la empresa Aceros Procesados S.A. por confiar y auspiciar este proyecto de investigación.

ÍNDICE

ÍNDICE	3
RESUMEN.....	7
LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE FOTOS	12
LISTA DE TABLAS	13
SÍMBOLOS	14
INTRODUCCIÓN.....	17
CAPÍTULO 1. ASPECTOS GENERALES.....	19
1.1. Descripción del Sistema Estructural.....	19
1.1.1. Componentes del Sistema Estructural.....	19
1.1.1.1. <i>Placa Colaborante</i>	20
1.1.1.2. <i>Concreto</i>	21
1.1.1.3. <i>Malla de Temperatura</i>	22
1.1.1.4. <i>Conectores de Corte</i>	22
1.1.2. Características de las Placas Colaborantes Usadas en la Investigación	23
1.1.2.1. <i>Perfil AD-900</i>	24
1.1.2.2. <i>Perfil AD-730</i>	24
1.1.2.3. <i>Perfil AD-600</i>	25
1.2. Descripción del Sistema Constructivo.....	25
1.2.1. Ingeniería de Detalles.....	25
1.2.2. Transporte.....	26
1.2.3. Almacenamiento.....	26
1.2.4. Izaje	26
1.2.5. Montaje	26
1.2.6. Instalación de Conectores de Corte.....	26
1.2.7. Fijación.....	27
1.2.8. Colocación del Acero de Refuerzo	27
1.2.9. Colocación de la Malla de Temperatura	28
1.2.10. Vaciado del Concreto	28
1.2.11. Curado del Concreto	28
1.2.12. Apuntalamiento y Desapuntalamiento	29
1.2.13. Protección	29

CAPÍTULO 2. ANÁLISIS TEÓRICO	30
2.1. Principios Básicos.....	30
2.1.1. Mecanismos de Interacción	30
<i>2.1.1.1. Adherencia Química.....</i>	<i>30</i>
<i>2.1.1.2. Adherencia Mecánica Dada por las Muestras.....</i>	<i>31</i>
<i>2.1.1.3. Adherencia Mecánica Dada por la Fricción</i>	<i>31</i>
<i>2.1.1.4. Anclaje Mecánico Dado por los Conectores de Corte</i>	<i>31</i>
<i>2.1.1.5. Anclaje Mecánico Dado por la Deformación de la Placa Colaborante ..</i>	<i>31</i>
2.1.2. Grado de Interacción	32
<i>2.1.2.1. Interacción Total.....</i>	<i>32</i>
<i>2.1.2.2. Interacción Parcial.....</i>	<i>34</i>
<i>2.1.2.3. Interacción Nula</i>	<i>35</i>
2.2. Mecanismos Principales de Falla.....	36
2.2.1. Falla por Flexión.....	36
2.2.2. Falla por Deslizamiento Longitudinal	36
<i>2.2.2.1. Falla por Liberación Longitudinal de la Placa Colaborante</i>	<i>36</i>
<i>2.2.2.2. Falla por Separación Vertical</i>	<i>37</i>
<i>2.2.2.3. Falla por Rotura del Concreto</i>	<i>37</i>
<i>2.2.2.4. Falla por Aplastamiento de las Muestras</i>	<i>38</i>
2.2.3. Falla por Cortante Vertical.....	38
2.2.4. Representación Gráfica de los Modos de Falla	38
2.3. Ductilidad – Fragilidad	39
2.4. Métodos de Cálculo de la Resistencia de Adherencia al Corte	39
2.4.1. Método m-k	39
2.4.2. Método de la Conexión Parcial.....	40
2.4.3. Método del Esfuerzo Tangencial Último	41
2.5. Fundamentos de Diseño de Losas con Placa Colaborante.....	41
2.5.1. Deflexión de la Placa Colaborante en el Estado No Compuesto.....	42
2.5.2. Esfuerzo de Tracción de la Placa Colaborante en el Estado No Compuesto	42
2.5.3. Esfuerzos en la Losa Compuesta	43
2.5.4. Resistencia a la Flexión de la Losa Compuesta	45
2.5.5. Resistencia al Corte	47
2.5.6. Resistencia de Adherencia al Corte.....	48
2.5.7. Deflexión de la Losa Compuesta.....	48

2.5.8. Efecto del Apuntalamiento.....	50
2.6. Cálculo Teórico del Comportamiento de Losas con Placa Colaborante	51
2.6.1. Comportamiento del Concreto.....	51
2.6.2. Comportamiento del Acero.....	53
2.6.3. Análisis Teórico de la Losa Compuesta.....	54
CAPÍTULO 3. ESTUDIO EXPERIMENTAL	61
3.1. Ensayo de Flexión	61
3.1.1. Especímenes.....	62
3.1.2. Metodología del Ensayo	65
3.1.2.1. Descripción	65
3.1.2.2. Equipos y Sistema de Medición	66
3.1.2.3. Registro de Ensayos.....	67
3.1.3. Resultados	69
3.2. Ensayo de Adherencia.....	77
3.2.1. Especímenes.....	77
3.2.2. Metodología del Ensayo	80
3.2.2.1. Descripción	80
3.2.2.2. Equipos y Sistema de Medición	81
3.2.2.3. Registro de Ensayos.....	82
3.2.3. Resultados	82
3.3. Prueba de los Materiales	85
3.3.1. Concreto.....	85
3.3.2. Acero.....	86
CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	88
4.1. Del Ensayo de Flexión	88
4.2. Cálculo de los Parámetros m-k.....	92
4.3. Modelo Numérico.....	94
4.4. Del Ensayo de Adherencia	102
4.5. Mecanismo Resistente al Deslizamiento Longitudinal dado por el Embebimiento de la Placa Colaborante en las Vigas de Concreto.....	103
CONCLUSIONES	108
RECOMENDACIONES.....	110
BIBLIOGRAFÍA.....	111

ANEXOS

ANEXO A. CÁLCULO DE LAS PROPIEDADES GEOMÉTRICAS DE LAS LOSAS CON PLACA COLABORANTE.....	113
A.1. Cálculo de las Propiedades Geométricas de la Placa Colaborante.....	113
A.2. Cálculo de las Propiedades Geométricas de la Losa Compuesta	115
ANEXO B. PANEL FOTOGRÁFICO.....	119

RESUMEN

Esta investigación nace principalmente por la necesidad de conocer los parámetros resistentes de la adherencia entre la placa colaborante y el concreto en losas compuestas, debido a que la falla más común en este tipo de losas se produce por el deslizamiento longitudinal. Para ello, se han estudiado los aspectos generales de este tipo de losas; tales como el sistema estructural, los elementos que lo conforman y su proceso constructivo. También se ha estudiado la mecánica resistente de las losas con placa colaborante y algunos de sus métodos de cálculo. Estos conceptos sirvieron de fundamento para desarrollar el estudio experimental y el análisis de los resultados, algunos de los cuales tuvieron que adaptarse de experiencias desarrolladas en otras partes del mundo. Se han estudiado tres tipos de placa colaborante: AD-900, AD-730 y AD-600 (denominación comercial del fabricante); realizándose un total de 42 ensayos de flexión y 9 ensayos de adherencia; por los que ha sido posible comprender y conocer su comportamiento y características. Se pueden resaltar que sólo las losas con perfiles AD-900 presentan un comportamiento dúctil, a diferencia de las losas con perfiles AD-730 y AD-600; los tres tipos de perfiles, en sus diferentes calibres y luces, aseguran deflexiones menores a los límites de serviciabilidad hasta su capacidad máxima como sistema compuesto. Se observó un comportamiento típico ante un incremento gradual de la carga; desarrollándose un modelo numérico que logra simular con una buena aproximación el comportamiento de las losas hasta el momento en que dejan de ser compuestas, siendo una propuesta de herramienta útil para verificaciones y diseño de este tipo de losas. Durante el desarrollo de esta investigación se ha observado también la importancia que tienen los estudios experimentales, especialmente para este tipo de sistemas estructurales que poseen un gran número de variables, ya que permiten determinar parámetros experimentales (m , k , esfuerzo límite de adherencia) que son útiles para el diseño y verificación de este tipo de losas.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Componentes de la losa con placa colaborante.....	19
Figura 1.2 Muestras en la superficie de la placa colaborante.....	20
Figura 1.3 Esfuerzo de corte horizontal producido en la losa.....	22
Figura 1.4 Conector de corte en un sistema de entrepiso metálico.....	23
Figura 1.5 Perfiles de placa colaborante.....	23
Figura 1.6 Perfil de la placa colaborante del tipo AD-900.....	24
Figura 1.7 Perfil de la placa colaborante del tipo AD-730.....	24
Figura 1.8 Perfil de la placa colaborante del tipo AD-600.....	25
Figura 2.1 Tipos de placa colaborante según la forma de su perfil.....	30
Figura 2.2 Tipos de interacción de la placa colaborante.....	32
Figura 2.3 Esquema conceptual del funcionamiento en interacción total.....	33
Figura 2.4 Esquema de funcionamiento de la interacción parcial.....	34
Figura 2.5 Esquema de funcionamiento de la interacción nula.....	35
Figura 2.6 Liberación longitudinal de la placa colaborante.....	36
Figura 2.7 Curva de resistencia y modos de falla.....	38
Figura 2.8 Diagrama m-k de ensayos que fallaron por adherencia.....	40
Figura 2.9 Diagrama de diseño de interacción parcial.....	41
Figura 2.10 Área de concreto resistente frente al corte.....	47
Figura 2.11 Curva esfuerzo-deformación propuesta por Hognestad.....	51
Figura 2.12 Curva esfuerzo-deformación bilineal para el acero.....	54
Figura 2.13 Idealización de la losa hasta el inicio del agrietamiento del concreto.....	55
Figura 2.14 Idealización de la losa luego del inicio del agrietamiento del concreto.....	56
Figura 2.15 Esfuerzos rasantes idealizados en la sección agrietada.....	57
Figura 2.16 Idealización de las losas según la teoría de la viga elástica.....	58
Figura 2.17 Diagrama de flujo de la herramienta para las simulaciones.....	60
Figura 3.1 Especímenes para el ensayo de flexión.....	62
Figura 3.2 Programa de cómputo utilizado en los experimentos.....	67
Figura 3.3 Disposición del sistema de medición para el ensayo de flexión.....	68
Figura 3.4 Ensayo de flexión estática en especímenes L-001, L-002 y L-003 de alturas 10.05, 12.33 y 13.40cm; respectivamente.....	70
Figura 3.5 Ensayo de flexión estática en especímenes L-004, L-005 y L-006 de alturas 14.38, 16.88 y 19.25cm; respectivamente.....	70

Figura 3.6 Ensayo de flexión en especímenes L-007, L-008 y L-009 de alturas 11.23, 13.10 y 14.45cm; respectivamente.....	71
Figura 3.7 Ensayo de flexión en especímenes L-010, L-011 y L-012 de alturas 9.78, 12.40 y 13.83cm; respectivamente.....	71
Figura 3.8 Ensayo de flexión en especímenes L-013, L-014 y L-015 de alturas 14.15, 17.03 y 19.03cm; respectivamente.....	72
Figura 3.9 Ensayo de flexión en especímenes L-016, L-017 y L-018 de alturas 11.23, 12.65 y 15.20cm; respectivamente.....	72
Figura 3.10 Ensayo de flexión en especímenes L-019, L-020 y L-021 de alturas 10.25, 12.45 y 14.28cm; respectivamente.....	73
Figura 3.11 Ensayo de flexión en especímenes L-022, L-023 y L-024 de alturas 14.85, 17.60 y 20.35cm; respectivamente.....	73
Figura 3.12 Ensayo de flexión en especímenes L-025, L-026 y L-027 de alturas 11.40, 12.80 y 14.48cm; respectivamente.....	74
Figura 3.13 Ensayo de flexión en especímenes L-028, L-029 y L-030 de alturas 9.28, 12.03 y 14.10cm; respectivamente.....	74
Figura 3.14 Ensayo de flexión en especímenes L-031, L-032 y L-033 de alturas 13.60, 16.88 y 20.23cm; respectivamente.....	75
Figura 3.15 Ensayo de flexión en especímenes L-034, L-035 y L-036 de alturas 11.08, 12.83 y 14.68cm; respectivamente.....	75
Figura 3.16 Ensayo de flexión en especímenes L-037 y L-038 de alturas 10.27 y 14.27cm; respectivamente.....	76
Figura 3.17 Ensayo de flexión en especímenes L-039 y L-040 de alturas 13.77 y 19.90cm; respectivamente.....	76
Figura 3.18 Ensayo de flexión en especímenes L-041 y L-042 de alturas 11.00 y 14.17cm; respectivamente.....	77
Figura 3.19 Diseño de especímenes para el ensayo de adherencia.	78
Figura 3.20 Disposición del sistema de medición para el ensayo de adherencia. ...	82
Figura 3.21 Ensayo de adherencia en perfil AD-900 calibre 22.....	83
Figura 3.22 Ensayo de adherencia en perfil AD-600 calibre 22.....	84
Figura 3.23 Ensayo de adherencia en perfil AD-730 calibre 22.....	84
Figura 3.24 Geometría de la muestra de acero para la prueba de tracción.....	86
Figura 4.1 Comportamiento típico de las losas con placa colaborante.....	88
Figura 4.2 Regresión lineal para el cálculo de los parámetros m-k de los perfiles AD-900.	93

Figura 4.3 Regresión lineal para el cálculo de los parámetros m-k de los perfiles AD-730.	93
Figura 4.4 Regresión lineal para el cálculo de los parámetros m-k de los perfiles AD-600.	93
Figura 4.5 Resultados teóricos y experimentales en especímenes L-001, L-002 y L-003 de alturas 14.38, 16.88 y 19.25cm; respectivamente.	96
Figura 4.6 Resultados teóricos y experimentales en especímenes L-004, L-005 y L-006 de alturas 14.38, 16.88 y 19.25cm; respectivamente.	96
Figura 4.7 Resultados teóricos y experimentales en especímenes L-007, L-008 y L-009 de alturas 11.23, 13.10 y 14.45cm; respectivamente.	97
Figura 4.8 Resultados teóricos y experimentales en especímenes L-010, L-011 y L-012 de alturas 9.78, 12.40 y 13.83cm; respectivamente.	97
Figura 4.9 Resultados teóricos y experimentales en especímenes L-013, L-014 y L-015 de alturas 14.15, 17.03 y 19.03cm; respectivamente.	98
Figura 4.10 Resultados teóricos y experimentales en especímenes L-016, L-017 y L-018 de alturas 11.23, 12.65 y 15.20cm; respectivamente.	98
Figura 4.11 Resultados teóricos y experimentales en especímenes L-019, L-020 y L-021 de alturas 10.25, 12.45 y 14.28cm; respectivamente.	99
Figura 4.12 Resultados teóricos y experimentales en especímenes L-022, L-023 y L-024 de alturas 14.85, 17.60 y 20.35cm; respectivamente.	99
Figura 4.13 Resultados teóricos y experimentales en especímenes L-025, L-026 y L-027 de alturas 11.40, 12.80 y 14.48cm; respectivamente.	100
Figura 4.14 Resultados teóricos y experimentales en especímenes L-028, L-029 y L-030 de alturas 9.28, 12.03 y 14.10cm; respectivamente.	100
Figura 4.15 Resultados teóricos y experimentales en especímenes L-031, L-032 y L-033 de alturas 13.60, 16.88 y 20.23cm; respectivamente.	101
Figura 4.16 Resultados teóricos y experimentales en especímenes L-034, L-035 y L-036 de alturas 11.08, 12.83 y 14.68cm; respectivamente.	101
Figura 4.17 Detalle de refuerzo de losas compuestas apoyadas en vigas de concreto.	103
Figura 4.18 Comparación experimental entre losa apoyada en vigas de concreto L-037 y losa simplemente apoyada L-010.	106
Figura 4.19 Comparación experimental entre losa apoyada en vigas de concreto L-040 y losa simplemente apoyada L-016.	106

Figura 4.20 Comparación experimental entre losa apoyada en vigas de concreto L-041 y losa simplemente apoyada L-015.....107

LISTA DE FOTOS

Foto 2.1 Separación vertical de la placa colaborante.....	37
Foto 3.1 Limpieza de espécimen.....	65
Foto 3.2 Preparación del concreto.....	65
Foto 3.3 Vaciado del concreto.....	65
Foto 3.4 Acabado de la superficie.....	65
Foto 3.5 Curado químico.....	65
Foto 3.6 Traslado de los especímenes.....	65
Foto 3.7 Ensayo de flexión en losas con placa colaborante.....	66
Foto 3.8 Disposición de los equipos para el ensayo de flexión.....	67
Foto 3.9 Ensayo de flexión en losas con placa colaborante.....	69
Foto 3.10 Disposición de especímenes.....	80
Foto 3.11 Encofrado de especímenes.....	80
Foto 3.12 Vaciado del concreto.....	80
Foto 3.13 Vaciado de especímenes.....	80
Foto 3.14 Probeta para el ensayo de adherencia.....	81
Foto 3.15 Probeta de pull-out al finalizar el ensayo.....	83
Foto 3.16 Extracción de probetas.....	85
Foto 3.17 Ensayo de compresión.....	85
Foto 3.18 Máquina universal.....	86
Foto 3.19 Ensayo de tracción.....	86
Foto 3.20 Muestras de acero después del ensayo.....	87

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1 Tipos de acero según el tipo de lámina	21
Tabla 1.2 Espesores de acero de la placa colaborante.....	21
Tabla 2.1 Fórmulas para el cálculo de fuerzas y deflexiones en vigas elásticas.	44
Tabla 2.2 Coeficientes de reducción por peso propio.....	51
Tabla 2.3 Parámetros de esfuerzo en resistencia a la flexión de secciones rectangulares encontrados por PCA.	53
Tabla 3.1 Características de las losas apoyadas en rodillos.	63
Tabla 3.2 Características de las losas apoyadas en vigas de concreto.....	64
Tabla 3.3 Ubicación de los canales de adquisición de datos.....	69
Tabla 3.4 Características de las probetas para el ensayo de <i>pull-out</i>	79
Tabla 3.5 Ubicación de los canales de adquisición de datos.....	82
Tabla 3.6 Resultados de los ensayos de compresión axial.	85
Tabla 3.7 Resultados de los ensayos de tracción.	87
Tabla 4.1 Resultados del ensayo de flexión de losas simplemente apoyadas.....	90
Tabla 4.2 Resultados del ensayo de flexión de losas apoyadas en vigas de concreto.....	91
Tabla 4.3 Parámetros m-k para cada tipo de perfil.....	94
Tabla 4.4 Resultados del ensayo de adherencia.....	102
Tabla 4.5 Resultados teórico calculados por el modelo matemático.	103
Tabla 4.6 Comparación de cortantes resistentes de losas apoyadas en vigas de concreto y simplemente apoyadas.....	104
Tabla 4.7 Comparación de cortantes resistentes de losas apoyadas en vigas de concreto y simplemente apoyadas.....	105

SÍMBOLOS

- A_c : Área de concreto resistente al corte.
- A_s : Área de acero en tracción.
- A'_s : Área de acero en compresión.
- A_{sd} : Área de acero de la placa colaborante.
- b : Ancho de la losa compuesta.
- C_s : Distancia entre eje de valles (ancho unitario repetitivo).
- C_c : Fuerza a compresión del concreto en la sección compuesta.
- d : Peralte de la losa compuesta.
- e : Espesor de la lámina de acero (calibre).
- E_c : Módulo de elasticidad del concreto.
- E_{sd} : Módulo de elasticidad de la placa colaborante.
- f_c : Esfuerzo del concreto.
- f'_c : Resistencia a la compresión del concreto.
- f_s : Esfuerzo del acero.
- f_y : Esfuerzo de fluencia del acero.
- h_r : Altura de la placa colaborante.
- I_{agr} : Inercia de la losa compuesta en el estado elástico agrietado.
- I_{nagr} : Inercia de la losa compuesta en el estado elástico no-agrietado.
- I_e : Inercia equivalente de la losa compuesta.
- I_{sd} : Inercia de la placa colaborante.
- I'_{sd} : Inercia de la placa colaborante por ancho unitario.
- I_v : Inercia del concreto en un valle.
- L : Luz libre de la losa.
- l' : Luz rasante.
- l_0 : Distancia entre el apoyo y el extremo más cercano de la losa.
- l_v : Longitud del plano inclinado del valle.

- m, k : Constantes características de la adherencia de las placas colaborantes.
- M_D : Momento flector producido por la carga viva.
- M_L : Momento flector producido por la carga muerta.
- M_n : Momento nominal resistente.
- M_{sd}^+ : Momento flector positivo de la placa colaborante.
- M_{sd}^- : Momento flector negativo de la placa colaborante.
- M_u : Momento último.
- n : Ratio del módulo de elasticidad de la placa colaborante y el concreto.
- s : Distancia entre muescas.
- S_{inf} : Módulo de sección elástica a tracción de la losa compuesta.
- S_{sup} : Módulo de sección elástica a compresión de la losa compuesta.
- $S_{inf\ sd}$: Módulo de sección elástica a tracción de la placa colaborante.
- $S_{sup\ sd}$: Módulo de sección elástica a compresión de la placa colaborante.
- $S_{inf\ agr}$: Módulo de sección a tracción de la losa compuesta en el estado elástico agrietado.
- $S_{sup\ agr}$: Módulo de sección a compresión de la losa compuesta en el estado elástico agrietado.
- $S_{inf\ nagr}$: Módulo de sección compuesta a tracción de la losa en el estado elástico no agrietado.
- $S_{sup\ nagr}$: Módulo de sección compuesta a compresión de la losa en el estado elástico no agrietado.
- t : Altura de la losa compuesta.
- t_c : Altura de la sección de concreto por encima de la placa colaborante.
- T_c : Fuerza a compresión del acero en la sección compuesta.
- T_s : Fuerza a tracción del concreto en la sección compuesta.
- V_e : Cortante nominal experimental.
- V_n : Cortante nominal resistente.
- V_u : Cortante último.
- W_{sup} : Ancho de borde superior.

- W_{inf} : Ancho de base del valle.
- W_r : Ancho medio de valle.
- Y_{cc} : Distancia del eje neutro de la losa compuesta al borde superior del concreto.
- Y_{cc1} : Distancia del eje neutro de la losa compuesta al borde superior del concreto para el estado elástico no agrietado.
- Y_{cc2} : Distancia del eje neutro de la losa compuesta al borde superior del concreto para el estado elástico agrietado.
- Y_{cs} : Distancia del eje neutro de la losa compuesta al centroide de la placa colaborante.
- Y_v : Distancia del centroide del concreto en un valle al nivel superior de la placa colaborante.
- Y_{sb} : Distancia del centroide al borde inferior de la placa colaborante.
- Y_{st} : Distancia del centroide al tope superior de la placa colaborante.
- z : Brazo de palanca de las fuerzas resultantes longitudinales.
- α : Inclinação del valle
- δ_{adm} : Deflexión admisible de la placa colaborante.
- δ_{calc} : Deflexión calculada de la placa colaborante.
- ϵ_c : Deformación unitaria del concreto en la fibra a compresión.
- ϵ'_c : Deformación unitaria del concreto en la fibra a tracción.
- ϵ_{ctr} : Deformación unitaria de tracción del concreto.
- ϵ_u : Deformación unitaria última del concreto.
- ϵ_y : Deformación unitaria de fluencia del acero.
- ϕ : Factor de resistencia.
- ρ_b : Cuantía balanceada.
- ρ_{min} : Cuantía mínima.
- ρ_{max} : Cuantía máxima.
- ρ : Cuantía del acero en tracción.
- ρ' : Cuantía del acero en compresión.

INTRODUCCIÓN

La placa colaborante se introdujo en el Perú con el propósito de satisfacer la necesidad del sector constructivo de contar con un sistema de entrepisos y techos más práctico y funcional que el tradicional. La placa colaborante, conocida comúnmente como steel-deck, comenzó a ser empleada en Estados Unidos (G. Shen, 2003) desde la década de 1920 a manera de encofrado perdido y como sistema estructural a partir de la década de 1950. En el Perú este sistema compuesto se empleó por primera vez a fines de la década de 1990, en los entrepisos de un cine de la ciudad de Lima (Aceros Procesados S.A.). En los últimos años este sistema ha tomado mayor importancia debido a su masificación en el sector de la construcción por sus múltiples aplicaciones.

Por la posibilidad de usar esta lámina de acero como refuerzo en tracción de losas, además de su uso original como encofrado perdido, comienzan a desarrollarse investigaciones en diversas partes del mundo para estudiar su comportamiento y la optimización de su uso. Estas investigaciones nos plantean un comportamiento generalizado. No establecen ecuaciones generales para la determinación de los parámetros de resistencia que puedan ser extendidos a otras placas colaborantes, puesto que existe un gran número de variables, como la resistencia del acero, concreto, geometría del perfil, y sobre todo la geometría y disposición de las hendiduras (muescas), entre otros. Aunque este sistema está estandarizado en algunos países y deben satisfacer los códigos establecidos, la respuesta de este tipo de losas ante diferentes solicitaciones varía conforme las características de cada fabricante de placa colaborante.

Este sistema compuesto deja de ser funcional cuando el concreto y la lámina de acero dejan de interactuar, en la medida que la adherencia entre ambos decrezca. Entonces, la adherencia en la interfase acero-concreto se convierte en un factor esencial en el diseño de este tipo de losas. Por ello, en este trabajo se presenta un estudio experimental de la resistencia de adherencia al corte en losas con tres tipos de placa colaborante, puntos importantes, pero pocas veces tratados, pues la mayoría de estudios se basan en la resistencia del concreto y acero, tratándolos por separado.

El parámetro determinante en el comportamiento de la placa colaborante es la adherencia; el cual es difícil de calcular teóricamente, debido a la disposición y geometría de las hendiduras (muescas) sobre las paredes de sus nervaduras (valles). En ese sentido, las muescas determinan la resistencia de la placa colaborante bajo condiciones normales. Por lo que la determinación de los valores de adherencia de este tipo de losas facilitará el diseño y entendimiento del comportamiento del sistema. Este estudio experimental es más urgente aun si tenemos en cuenta que el diseño de este tipo de losas usadas en el país se basa en valores teóricos de resistencia o extraídos de estudios realizados fuera, correspondientes a otros tipos de placa colaborante, y no precisamente las que encontramos en el mercado de fabricación local.

Entonces, esta investigación tiene como objetivo principal conocer el comportamiento de losas con tres tipos de placa colaborante y establecer los valores de sus resistencias útiles para el diseño. Para lograr esto, es necesario determinar la resistencia de adherencia al corte en los tres tipos de perfil y analizar la influencia del embebimiento de los extremos de la placa colaborante en las vigas de concreto. Concretamente, se propone una herramienta práctica y útil para el diseño y verificación de este tipo de losas.

En el Capítulo 1 se describen los aspectos generales de este tipo de losas; tales como el sistema estructural, los elementos que lo conforman y su proceso constructivo. En el Capítulo 2 se describen la mecánica resistente de las losas con placa colaborante y algunos métodos de cálculos. Estos conceptos sirvieron de fundamento para concebir algunas de las ideas para desarrollar el estudio experimental y el análisis de los resultados; algunos de los cuales tuvieron que adaptarse de experiencias desarrolladas en otras partes del mundo. Luego en el Capítulo 3 se presenta los ensayos de flexión y adherencia en especímenes de diferentes características y bajo distintas características de altura, luz, calibre de placa colaborante y apoyo en los extremos. Finalmente, en el Capítulo 4 se analizan los resultados experimentales y se obtienen algunos parámetros útiles a usar en un modelo numérico para este tipo de losas.

CAPÍTULO 1. ASPECTOS GENERALES

El presente capítulo describe los aspectos generales del sistema de losas con placa colaborante, tales como el sistema estructural, los elementos que lo conforman y su proceso constructivo.

1.1. Descripción del Sistema Estructural

La placa colaborante es una plancha preformada hecha de acero estructural con protección galvánica, la cual después de un proceso de rolado en frío logra una inercia considerable a la flexión, permitiendo soportar cargas elevadas durante el proceso de construcción. Cumple tres funciones principales: refuerzo de acero para tomar los esfuerzos de tracción producidos en la losa, plataforma de trabajo para todas las instalaciones sobre la futura losa y encofrado perdido del concreto; de ahí la denominación de placa colaborante.

1.1.1. Componentes del Sistema Estructural

El sistema estructural está comprendido por diferentes elementos: la placa colaborante, el concreto, la malla de temperatura y los conectores de corte. En la Figura 1.1 se muestra el sistema estructural apoyado sobre vigas de acero.

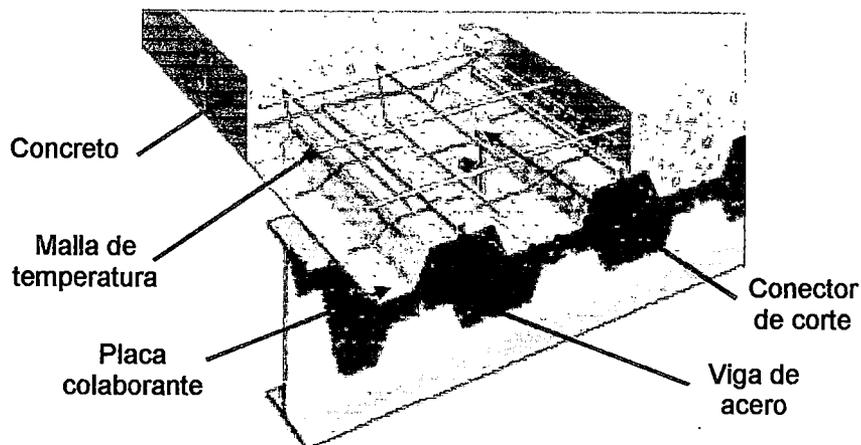


Figura 1.1 Componentes de la losa con placa colaborante.

Este sistema no sólo es usado sobre vigas de acero, sino también apoyado en los extremos sobre vigas de concreto, para lo cual el uso de conectores de corte no aplica, siendo reemplazado por bastones de acero que salen del refuerzo de las vigas de concreto.

1.1.1.1. Placa Colaborante

La placa colaborante es formada a partir de láminas de acero estructural conformadas en bobinas, la cual mediante un proceso de rolado en frío es configurada hasta obtener la geometría del perfil deseado de placa colaborante.

Un proceso importante durante la fabricación de las placas colaborantes es el grabado de relieves y/o hendiduras sobre los valles, denominados muescas, como se muestra en la Figura 1.2. Estas muescas son el principal mecanismo que proporciona la adherencia mecánica para la fijación del concreto a la placa colaborante sobre toda la superficie de contacto.

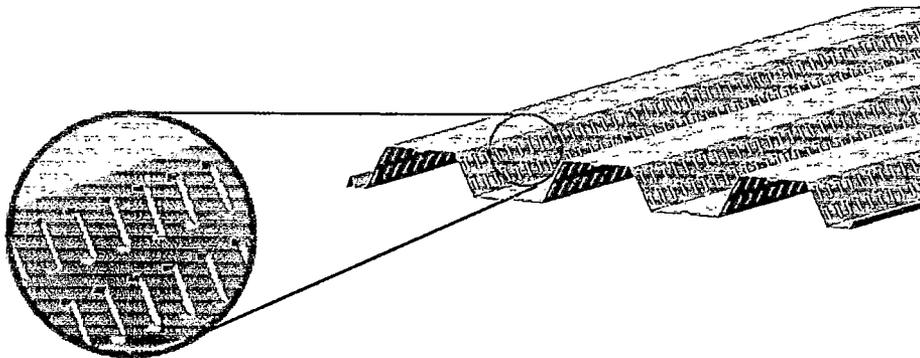


Figura 1.2 Muecas en la superficie de la placa colaborante.

Según SDI¹ y ASTM² A611 "Especificación Normalizada para Acero Estructural, Láminas, Carbón, Rolado en Frío", el esfuerzo mínimo de fluencia es 33ksi (2320kg/cm²), con un módulo de elasticidad de 2.1×10^6 kg/cm², y un espesor de acero 0.710mm sin considerar el galvanizado [17].

En la Tabla 1.1 se especifican los tipos de acero según el uso de la placa colaborante; donde el esfuerzo de fluencia para el Grado C, D y E es 33ksi (2320kg/cm²), 40ksi (2812kg/cm²) y 80ksi (5624kg/cm²), respectivamente [5].

¹ Steel Deck Institute (SDI) *Instituto de Cubiertas de Acero*

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

Tabla 1.1 Tipos de acero según el tipo de lámina.

Tipo	Grado
Placa colaborante para entrepiso	C, D
Placa colaborante en el estado no compuesto	C, D, E
Placa colaborante para techo	C, D, E

El espesor de acero de la placa colaborante varía según el requerimiento de refuerzo de acero en la losa, en la Tabla 1.2 se presentan los espesores de acero usados en placas colaborantes.

Tabla 1.2 Espesores de acero de la placa colaborante.

Denominación	Espesor (mm)
Calibre 22	0.749
Calibre 20	0.909
Calibre 18	1.204
Calibre 16	1.524

1.1.1.2. Concreto

El agregado a utilizarse en la construcción de este tipo de losas deberá cumplir con la norma ASTM C33 "Especificación Normalizada para Agregados del Concreto". En el caso de utilizar concretos con menor peso específico, deberá cumplir la norma ASTM C330 "Especificación Normalizada para Agregados Livianos para la Elaboración de Concreto Estructural".

Las recomendaciones más relevantes para el concreto a usar en este tipo de losas son las siguientes:

- La resistencia a la compresión mínima es de 210kg/cm^2 . No se tomarán en cuenta los concretos de resistencias mayores a los 580kg/cm^2 .
- Se realizará obligatoriamente el proceso de vibrado al concreto para garantizar así la adherencia mecánica entre el acero y el concreto, y para lograr la uniformidad del concreto.
- El curado del concreto se efectuará como mínimo hasta 7 días posterior al vaciado. No se utilizarán aditivos que contengan sales clorhídricas en su composición porque pueden producir efectos corrosivos en la cubierta de acero.

1.1.1.3. Malla de Temperatura

El refuerzo por malla de temperatura es esencial en cualquier tipo de losa para evitar el fisuramiento de la misma, debido a los efectos de temperatura y contracción de fragua que sufre el concreto durante su endurecimiento.

El recubrimiento mínimo de la malla de temperatura es de 2cm, quedando sujeto al criterio de diseño. El acero de refuerzo diseñado para soportar los momentos negativos pasa por debajo de la malla de temperatura y se sujeta a éste. El diseño de la malla de temperatura se puede referir a las normas del ACI³ o a la Norma E.060.

1.1.1.4. Conectores de Corte

Estos elementos de acero tienen como función primordial tomar los esfuerzos de corte horizontal que se generan en la sección compuesta, controlando y reduciendo las deformaciones, como se muestra en la Figura 1.3.

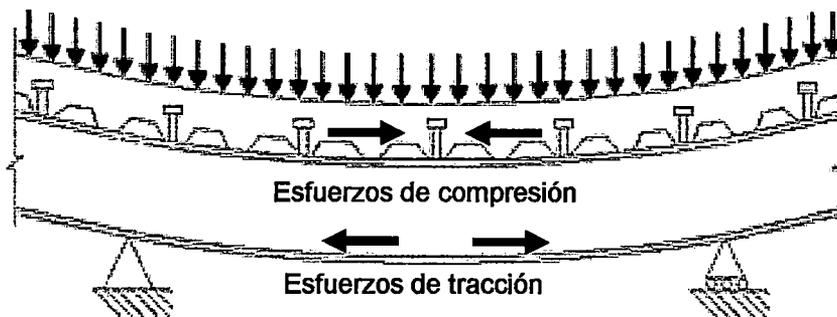


Figura 1.3 Esfuerzo de corte horizontal producido en la losa.

El conector de corte más usado en este sistema es el tipo *Nelson Stud* (forma de un perno con cabeza cilíndrica sin ningún hilo), el cual es soldado al ala superior de la viga a ciertos intervalos, quedando embebido dentro de la losa de concreto.

Algunas de las características relevantes del conector de corte son descritas a continuación:

- La cantidad de conectores por valle no debe ser mayor a 3 en el sentido transversal.

³ American Concrete Institute (ACI) *Instituto Americano del Concreto*

- La altura del conector de corte debe estar entre 3" y 7".
- La longitud mínima entre conectores de corte es 4 veces su diámetro.
- El diámetro del conector de corte no debe ser mayor de $\frac{3}{4}$ ".
- El conector de corte será formado de una sola pieza con protección galvánica electroquímica de zinc conforme a ASTM B633 "Especificación Normalizada para el Galvanizado Electrolítico en Hierro y Acero" [7].

En la Figura 1.4 se muestra la disposición del conector de corte y los elementos que trabajan conjuntamente con este.

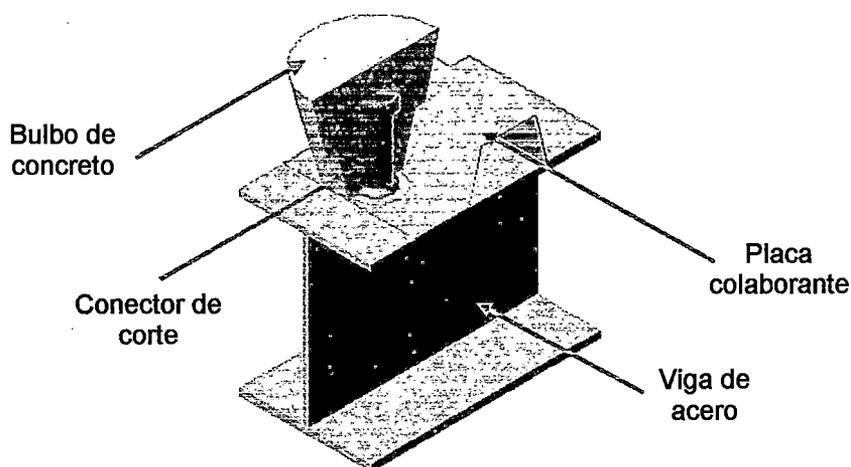


Figura 1.4 Conector de corte en un sistema de entrepiso metálico.

1.1.2. Características de las Placas Colaborantes Usadas en la Investigación

En esta investigación se han estudiado tres perfiles de placa colaborante, los cuales se muestran en la Figura 1.5. Estos perfiles tienen el mismo ancho útil de 900mm, y son de dos espesores: calibre 22 (0.749mm) y calibre 20 (0.909mm).

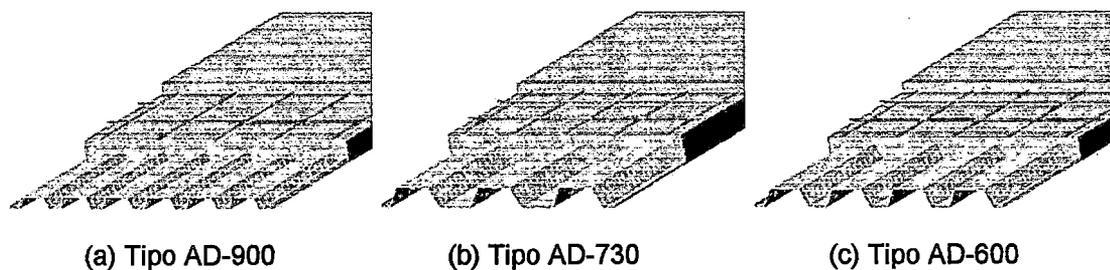


Figura 1.5 Perfiles de placa colaborante.

1.1.2.1. Perfil AD-900

La placa colaborante del tipo AD-900 tiene 6 nervaduras por ancho útil. En la Figura 1.6 se indican las dimensiones de este perfil de placa colaborante.

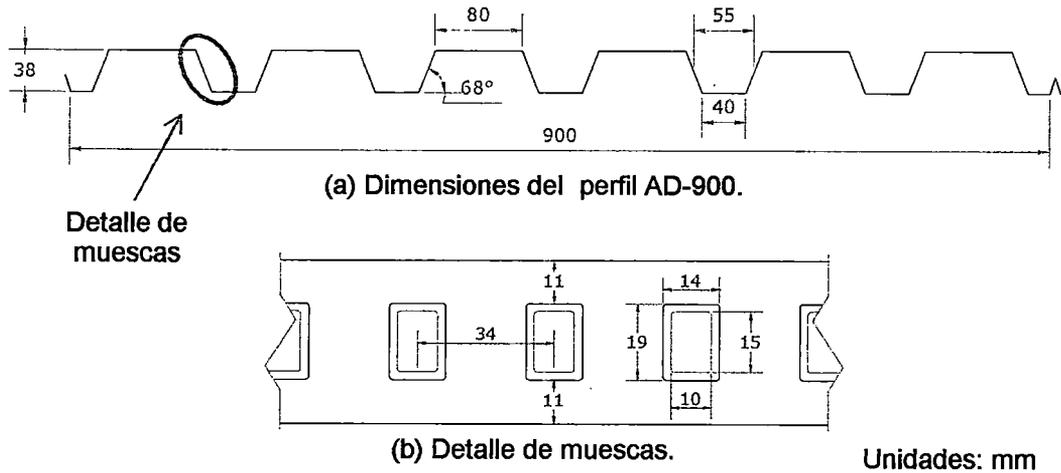


Figura 1.6 Perfil de la placa colaborante del tipo AD-900.

1.1.2.2. Perfil AD-730

La placa colaborante del tipo AD-730 tiene 3 nervaduras por ancho útil. En la Figura 1.7 se indican las dimensiones de este perfil de placa colaborante.

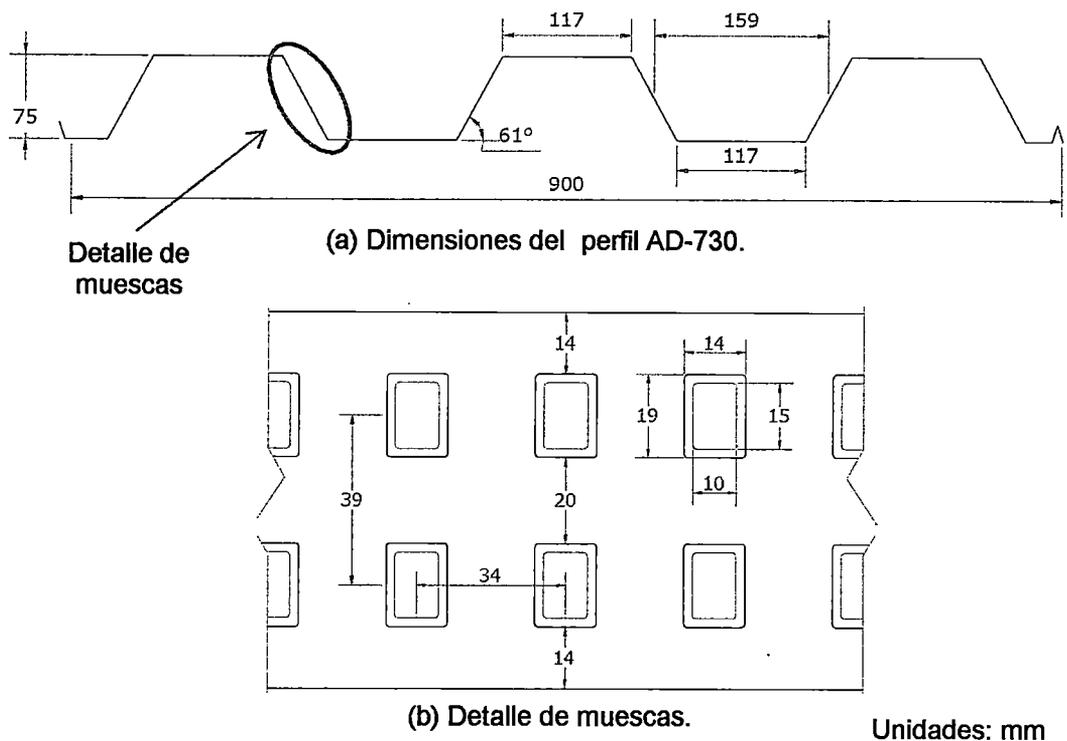
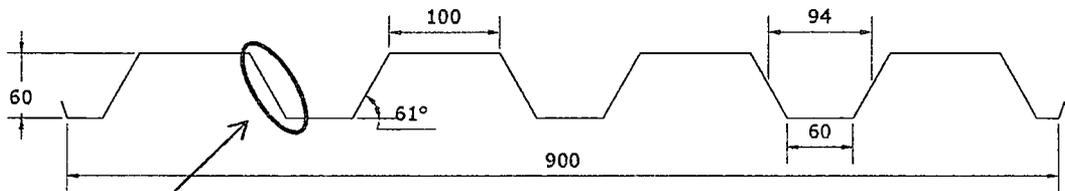


Figura 1.7 Perfil de la placa colaborante del tipo AD-730.

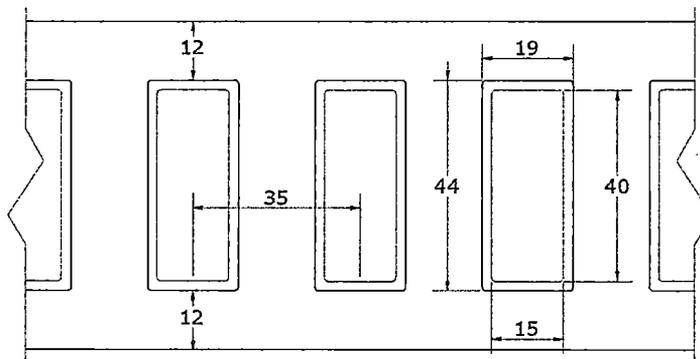
1.1.2.3. Perfil AD-600

La placa colaborante del tipo AD-900 tiene 4 nervaduras por ancho útil. En la Figura 1.8 se indican las dimensiones de este perfil de placa colaborante.



Detalle de muecas

(a) Dimensiones del perfil AD-600.



(b) Detalle de muecas.

Unidades: mm

Figura 1.8 Perfil de la placa colaborante del tipo AD-600

1.2. Descripción del Sistema Constructivo

1.2.1. Ingeniería de Detalles

La ingeniería de detalles son las tareas que deben realizarse en gabinete para optimizar las áreas a cubrir, como por ejemplo la modulación de las placas colaborantes y el metrado de los demás elementos de este sistema estructural.

Para calcular la longitud final de la placa colaborante a instalar, se toma en cuenta la penetración en las vigas especificada en los planos, mínimo 5cm, los empalmes son a tope, en caso se proyecte un traslape, se recomienda que no exceda los 10cm. Se debe procurar tener medidas iguales en el modulado de las placas colaborantes, para así facilitar el proceso de fabricación e instalación.

1.2.2. Transporte

El proceso de transporte se refiere al traslado de las placas colaborantes desde el lugar de su fabricación hasta su destino en obra, los mismos que son embalados por grupos de acuerdo a su tipo y longitud, generalmente en grupos de 25 planchas apoyados sobre durmientes, con el propósito de evitar deformaciones antes de su uso en obra.

1.2.3. Almacenamiento

El almacenamiento de las placas colaborantes es la disposición del material en obra durante el tiempo que éste no vaya a ser utilizado, con el propósito de conservar su calidad. Asimismo, son tomadas en cuenta las condiciones a las que están expuestas, protegiéndolas de la intemperie en grupos donde el peso acumulado de las placas colaborantes no afecte la geometría de las mismas, ni causen deformaciones iniciales.

1.2.4. Izaje

Se denomina izaje a los procesos mediante los cuales la placa colaborantes es llevada del lugar de almacenaje hacia el lugar de montaje. El izaje puede ser manual y/o con el empleo de maquinarias, en cualquiera de los casos debe tenerse especial cuidado en evitar dañar y deformar la placa colaborante.

1.2.5. Montaje

El montaje es la etapa definitiva para la ubicación de las placas colaborantes sobre las vigas de apoyo, es decir, la posición en la cual quedarán para trabajar todo su tiempo de vida útil. El apoyo mínimo sobre vigas transversales terminales es de 5cm, los cuales quedan totalmente embebidos en la losa. Los cortes longitudinales se podrán hacer con esmeril con disco de corte, cizallas eléctricas o manuales, o cualquier otro método que no deteriore la geometría de las láminas. En algunas ocasiones es necesario el apuntalamiento temporal al centro de luz o a los tercios si el diseño así lo manda.

1.2.6. Instalación de Conectores de Corte

Los conectores de corte se unen a la viga metálica mediante soldadura y a la losa por el concreto alrededor del mismo.

Antes de soldar el conector a la viga de acero se recomienda trazar sobre la plancha una línea referencial al eje de la viga para mantener la linealidad. También se recomienda perforar la placa colaborante mediante brocas sacabocados o algún sistema de corte mecánico; obteniendo así, una perforación cuyo diámetro no debe exceder el ancho del valle de apoyo de la placa colaborante, esta perforación debe realizarse por el reverso de la plancha a sobre nivel, de modo que no se perjudique la viga metálica de apoyo. Una vez perforada e instalada la placa colaborante se instala el conector de corte directamente en la viga metálica de apoyo, mediante soldadura que debe cubrir todo el perímetro del área de apoyo del conector. La elección del espesor y tipo de soldadura son determinadas por el diseño.

1.2.7. Fijación

El proceso de fijación de las placas colaborantes se realiza para mantenerlas en su posición final de trabajo y como medida de seguridad, evitando la posibilidad accidentes en obra.

Este proceso se realiza mediante elementos de fijación tales como tornillos autoperforantes, clavos de disparo o simplemente con clavos si la placa colaborante está apoyada sobre el encofrado de madera que sirven a la vez de tapa de las vigas. La fijación se realiza a los extremos de las planchas en todos los puntos de apoyo, teniendo como mínimo un punto de fijación cada tres valles, previendo que todos los valles de las láminas estén debidamente apoyados sobre las vigas de apoyo y las vigas principales.

1.2.8. Colocación del Acero de Refuerzo

El tipo de refuerzo más común para este tipo de sistemas se da para tomar los esfuerzos de momento negativo en los apoyos. Adicional a este tipo de refuerzo, existe el diseño de anclajes en los bordes de la losa, que consiste en bastones que están anclados a la viga.

Por otro lado, se pueden incluir varillas de acero para tomar esfuerzos de momento positivo cuando el acero contribuido por la placa colaborante no sea el suficiente.

1.2.9. Colocación de la Malla de Temperatura

El refuerzo de la malla de temperatura es esencial en cualquier tipo de losa, para resistir los efectos de temperatura y contracción de fragua que sufre el concreto, por lo cual debe ser ubicado siempre en el tercio superior de la losa. Se puede utilizar como malla de temperatura las mallas electrosoldadas o varillas de acero de refuerzo entorchadas con alambre. La posición de las varillas dentro de la losa se dará según planos de estructuras y deberá estar 2cm por debajo de la superficie superior de la losa como mínimo, apoyadas sobre tacos de concreto, dados prefabricados o algún material estandarizado para dicho proceso.

1.2.10. Vaciado del Concreto

Posterior a la colocación de la malla de temperatura se procede a preparar el área de circulación para el vaciado. El proceso de vaciado del concreto se puede realizar mediante bombas, latas o carretillas. En el caso de utilizar carretillas para el vaciado, estas no pueden circular por encima de las láminas, se habilita una ruta de circulación mediante tablonos de 8", aproximadamente; los cuales deben ser capaces de distribuir las cargas puntuales en un área mayor. Antes de realizar el vaciado del concreto, las láminas serán limpiadas para evitar la posibilidad de una pobre adherencia del concreto a la placa colaborante.

La placa colaborante esta preparada para recibir cargas en condiciones normales durante el proceso de vaciado, las mismas que han de haber sido consideradas en el diseño de la misma. Al momento del vaciado, se evita acumular volúmenes de concreto excesivos, así como generar grandes cargas puntuales por acumulación de materiales, máquinas o personas en una misma área; que sean capaces de deformar la placa colaborante.

1.2.11. Curado del Concreto

El curado se empezará a realizar en lo posible cuando el concreto comience a perder la humedad superficial después de haber sido vaciado el concreto, durante los próximos 7 días.

La ventaja que tiene la placa colaborante respecto al curado es que esta genera una superficie impermeable, manteniendo húmeda siempre la mitad inferior del concreto, dependiendo básicamente la pérdida del agua a la evaporación debido

a la condición del medio ambiente. El curado del concreto se hará en lo posible, con agua libre de impurezas, en manera permanente durante el periodo de curado que se especifique.

1.2.12. Apuntalamiento y Desapuntalamiento

En el caso que se haya utilizado apuntalamiento temporal (de acuerdo al diseño), el desapuntalamiento se realiza 7 días después del día de vaciado, asegurando que el concreto ha llegado a un 75% de su capacidad de resistencia a la compresión.

1.2.13. Protección

El uso de sistemas de protección, como son el galvanizado y los procesos de pintura, permite tener una protección adecuada del acero ante agentes agresivos presentes en el medio donde se instalen las placas colaborantes.

Cabe resaltar que las bobinas de acero utilizadas para la fabricación de placa colaborante cumplen con las normas ASTM A653/A653M "*Especificación Normalizada para Láminas de Acero Revestidas de Zinc (Galvanizadas) o Aleación de Hierro y Zinc (Ferrogalvanizadas) por Baño en Caliente*"; las cuales indican que se tiene recubrimiento de galvanizado en ambas caras de la lámina, considerando diversos espesores de zinc en la superficie [6].

Las pinturas usadas comúnmente para este tipo de láminas son: resinas vinílicas o imprimantes vinílicos, resinas epóxicas poliamidas, resinas epóxicas con brea, etc. Estas son pinturas de alta resistencia a la intemperie y se deben de escoger acorde al uso.

CAPÍTULO 2. ANÁLISIS TEÓRICO

En este capítulo se describe la mecánica resistente de las losas con placa colaborante y los métodos de cálculos estándar más usados que sirven de base para el desarrollo de un modelo numérico, cuyos fundamentos e hipótesis se describe al final de este capítulo.

2.1. Principios Básicos

Las losas compuestas están conformadas por planchas de acero roladas en frío, denominadas placas colaborantes, cuya función colaborante entre la plancha de acero y el concreto sólo es posible si se garantiza la transferencia de esfuerzos rasantes entre ambos elementos. De lo contrario se producen flexiones independientes, a modo de losas en paralelo, siendo despreciable la contribución de la placa de acero, donde predominaría sólo el concreto.

La placa colaborante, según la configuración de la nervadura o valle puede ser de dos tipos: de perfil con valles cerrados y de perfil con valles abiertos; tal como es mostrado en la Figura 2.1 [11].

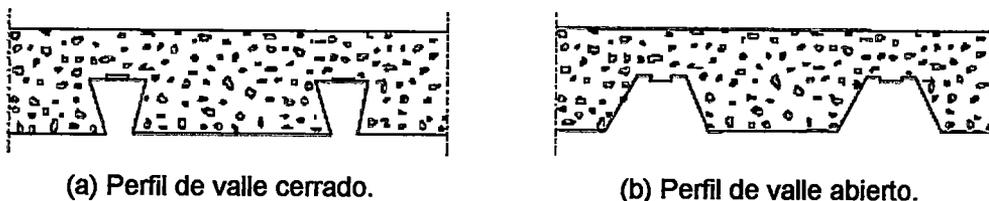


Figura 2.1 Tipos de placa colaborante según la forma de su perfil.

2.1.1. Mecanismos de Interacción

La función de la placa colaborante se consigue mediante los siguientes mecanismos resistentes básicos frente al deslizamiento longitudinal.

2.1.1.1. Adherencia Química

Se refiere al enlace químico producido entre el concreto y el acero durante el proceso de fraguado. La resistencia de estos enlaces puede ser muy elevada, pero no debería tenerse en cuenta debido a su alta variabilidad y poco control.

2.1.1.2. Adherencia Mecánica Dada por las Muestras

Para lograr una interacción razonable entre el concreto y el acero a lo largo de la superficie de placa colaborante se producen intencionalmente unos relieves y/o hendiduras denominadas muescas, las cuales son hechas durante el proceso de rolado. Las muescas actúan como interferencias mecánicas frente al deslizamiento longitudinal, al iniciarse este deslizamiento se produce deformaciones en la placa (flexión transversal) que incrementan notablemente las fuerzas necesarias para que el deslizamiento prosiga, siendo este fenómeno similar al producido por las varillas corrugas de acero embebidas en el concreto.

2.1.1.3. Adherencia Mecánica Dada por la Fricción

Las fuerzas normales producidas por el contacto entre el concreto y el acero producen esfuerzos de fricción que se oponen al deslizamiento. Estas pueden llegar a ser muy importantes cuando existen muescas al incrementar notablemente las fuerzas de contacto, funcionando como grandes rugosidades en la superficie de contacto. También aparecen en placas sin muescas pero en menor proporción debido a la rugosidad propia de la lámina de acero.

2.1.1.4. Anclaje Mecánico Dado por los Conectores de Corte

Las vigas de apoyo de las losas pueden funcionar como vigas compuestas en su flexión propia (transversal a la losa). En estos casos las vigas metálicas incorporan los típicos conectores de corte soldados al ala superior atravesando la placa y embebiéndose en el concreto. Estos conectores de corte actúan también como anclajes extremos de la losa en su dirección de flexión.

2.1.1.5. Anclaje Mecánico Dado por la Deformación de la Placa Colaborante

De manera similar a los conectores de corte, en los extremos de las placas colaborantes, donde no existe momento flector positivo, se puede practicar un aplastamiento de la misma con el objeto de evitar que el concreto escape durante el vaciado a través de las aberturas dejadas entre los valles y sobre las vigas, esto a modo de anclaje.

En la Figura 2.2 [11], son mostrados los tipos de interacción entre la placa colaborante de valles abiertos y cerrados, y el concreto.

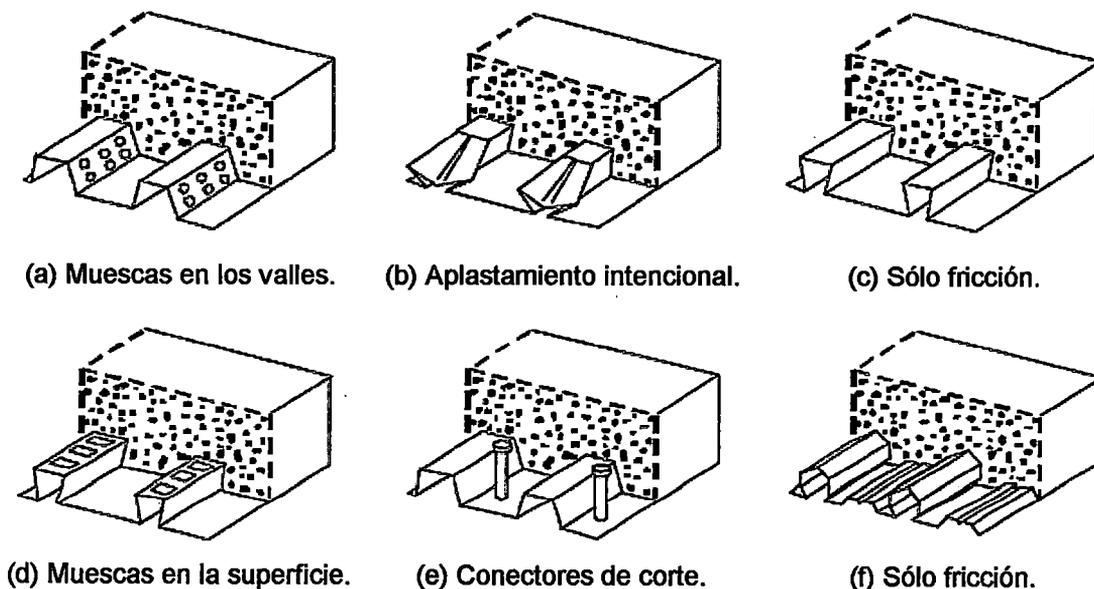


Figura 2.2 Tipos de interacción de la placa colaborante.

2.1.2. Grado de Interacción

Cualquier elemento estructural mixto sometido a flexión presenta un comportamiento que depende de la capacidad de transmisión de esfuerzos rasantes entre ambos materiales, de esto depende el grado de interacción.

2.1.2.1. Interacción Total

Si no existe deslizamiento relativo entre el acero y el concreto, la interacción es total y puede aceptarse como válida la hipótesis de continuidad de deformaciones longitudinales entre los materiales, la ley de deformaciones se supone lineal y los elementos estructurales actúan conjuntamente como un elemento único. En la Figura 2.3 se presenta un esquema del funcionamiento del sistema en conexión total a lo largo del sentido de las nervaduras, donde el concreto se encuentra fisurado y el acero en el rango elástico.

Por condición de equilibrio de fuerzas (Figura 2.3b) se establece la Ecuación (2.1) con la cual se puede calcular la fuerza media, F_m , en cada muesca de la luz de la rasante mediante la Ecuación (2.2).

$$C_c = T_s = \frac{M}{z} = \frac{V \cdot L_x}{z} \quad (2.1)$$

$$F_m = \frac{C_c}{n^\circ \text{muescas}} = \frac{V \cdot l' / z}{l' / s} = V \cdot \frac{s}{z} \quad (2.2)$$

Donde:

C_c : Fuerza resultante de compresión del concreto en la sección compuesta.

T_s : Fuerza resultante de tracción del concreto en la sección compuesta.

l' : Luz rasante.

M : Momento flector en la sección compuesta.

V : Fuerza cortante en la sección compuesta.

s : Distancia longitudinal entre muescas.

z : Brazo de palanca de las fuerzas resultantes longitudinales.

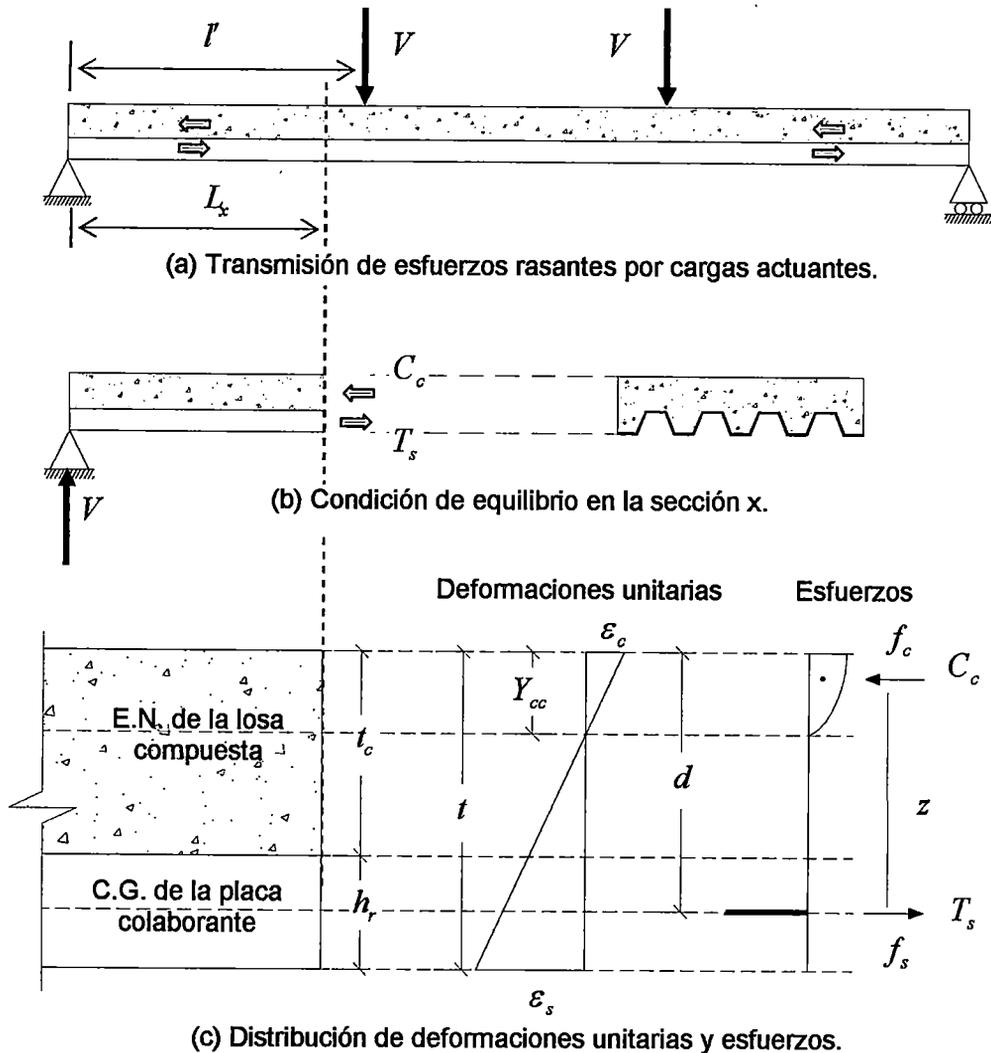


Figura 2.3 Esquema conceptual del funcionamiento en interacción total.

2.1.2.2. Interacción Parcial

En el caso de existir cierto deslizamiento entre los materiales, la interacción es parcial, y aunque los elementos transmitan los esfuerzos rasantes, no puede admitirse la continuidad de deformaciones. En la Figura 2.4 se presenta un esquema del funcionamiento del sistema en conexión parcial, en la cual el concreto se encuentra fisurado y el acero en el rango elástico.

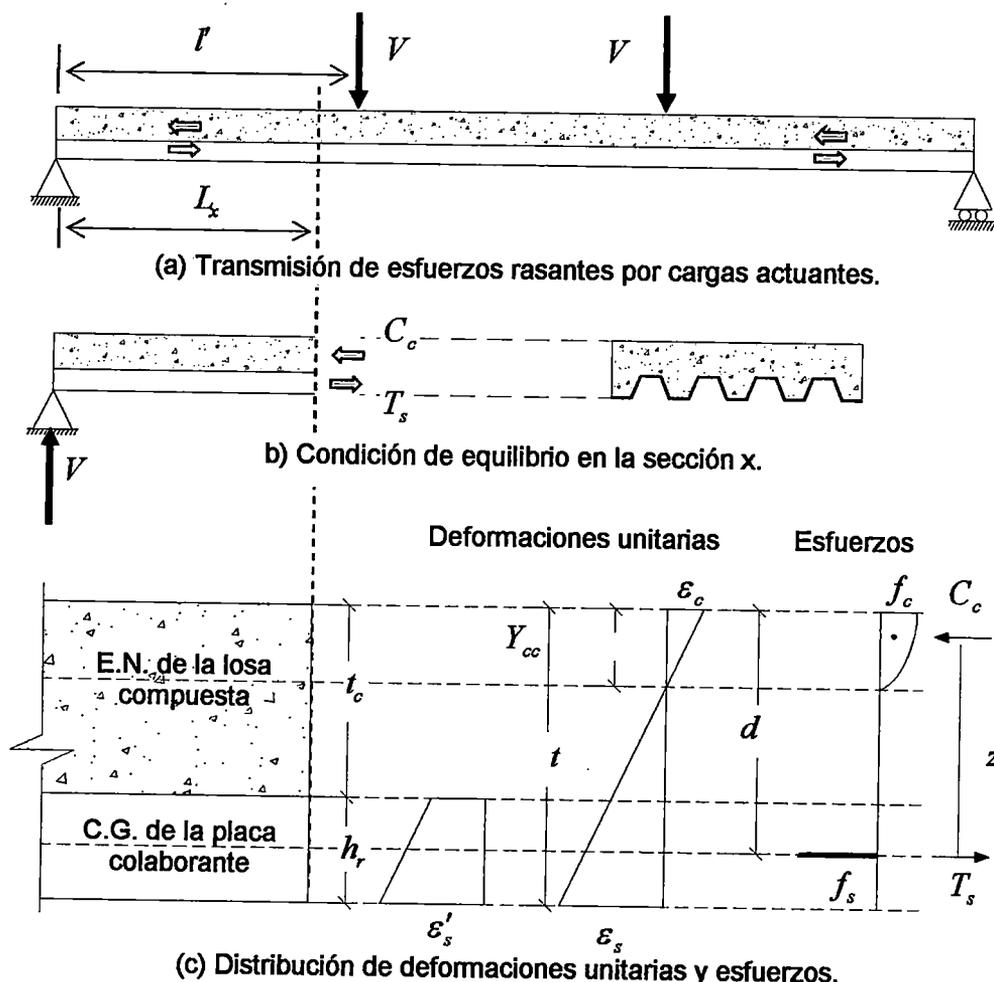


Figura 2.4 Esquema de funcionamiento de la interacción parcial.

Al no existir continuidad de deformaciones entre los elementos los respectivos ejes neutros no coinciden. Se acostumbra suponer, no obstante, que las secciones de ambos elementos se mantienen planas y que sus curvaturas son iguales.

2.1.2.3. Interacción Nula

Si los elementos no transmiten nunca esfuerzos rasantes, el conjunto puede tratarse como una suma en paralelo de los elementos estructurales independientes. En este caso no puede hablarse de una losa compuesta pues no existe interacción de los elementos, sino se trata de una losa nervada de concreto y una plancha de acero actuando en paralelo; entonces sería necesario el uso de refuerzo longitudinal en la losa de concreto para resistir los esfuerzos de tracción; asimismo, la contribución de la plancha de acero pasa a tener un efecto despreciable en la flexión del conjunto, actuando únicamente como encofrado perdido. En la Figura 2.5 se muestra un esquema del funcionamiento de la placa colaborante y el concreto, donde no existe algún tipo de conexión entre estos.

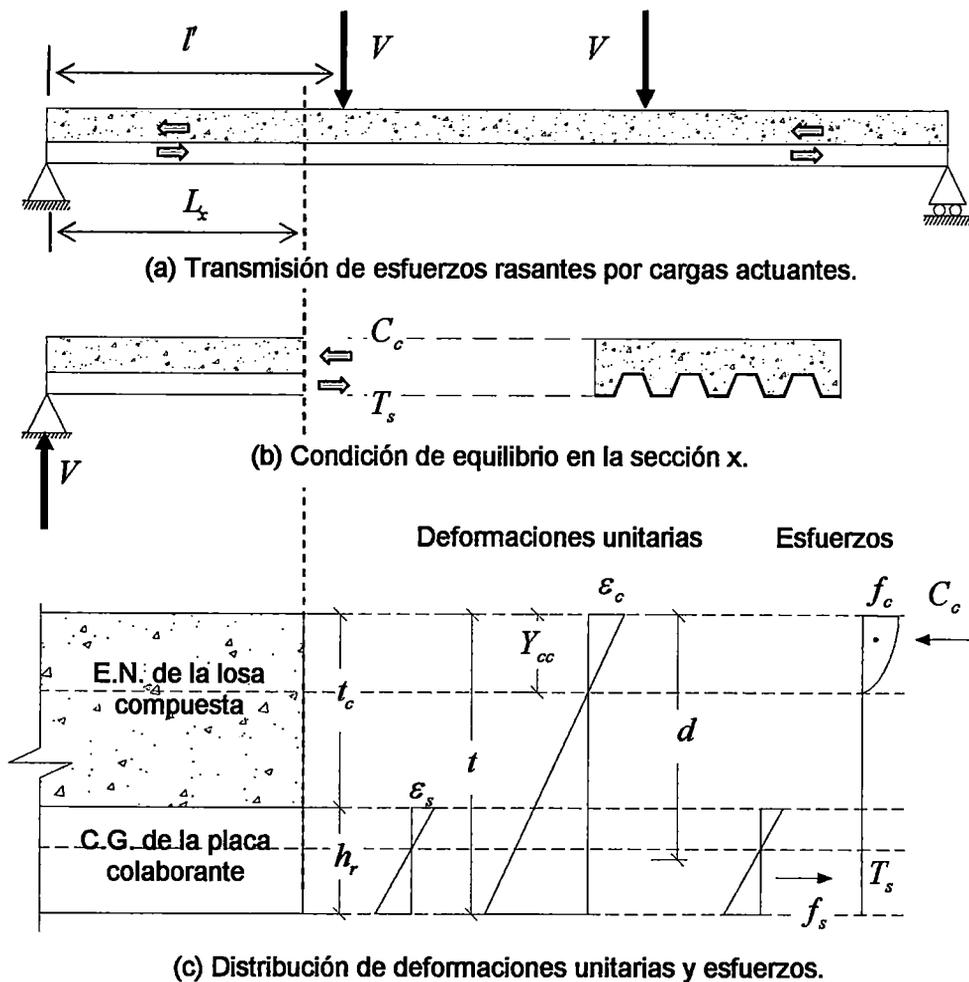


Figura 2.5 Esquema de funcionamiento de la interacción nula.

El estado de interacción nula también puede darse como punto final del proceso de deslizamiento de una losa compuesta sin refuerzo, especialmente en los perfiles de valle abierto, como resultado de la separación vertical entre el concreto y la placa colaborante. En este caso el concreto tendría resistencia a la flexión nula, actuando únicamente la placa.

2.2. Mecanismos Principales de Falla

2.2.1. Falla por Flexión

La falla por flexión se presenta cuando la interacción es total entre el acero y el concreto hasta alcanzar la capacidad última a flexión de la sección compuesta. Esto sucede cuando el esfuerzo cortante es pequeño con relación a los esfuerzos de flexión, es decir, luces grandes, alturas de losa pequeñas.

2.2.2. Falla por Deslizamiento Longitudinal

Es el modo de falla más frecuente dada la baja eficacia de los sistemas de interferencia usados comúnmente. Esta falla se produce cuando se supera los sistemas de retención del deslizamiento como muescas, conectores y fricción.

2.2.2.1. Falla por Liberación Longitudinal de la Placa Colaborante

Las rampas de las muescas transforman el esfuerzo rasante longitudinal en esfuerzos sobre la placa que provocan su flexión transversal, tal como se muestra en la Figura 2.6.

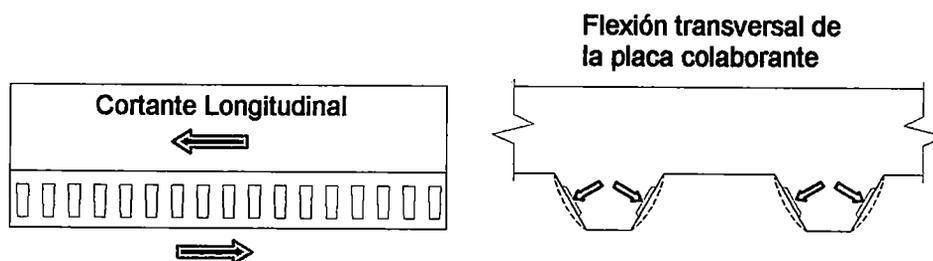


Figura 2.6 Liberación longitudinal de la placa colaborante.

Cuando la flexión de la placa y, por tanto, el deslizamiento es el necesario para que el concreto se desaloje de las muescas, se produce la liberación longitudinal del sistema y se alcanza el límite resistente. Siendo el mecanismo resistente la resistencia a la flexión transversal de la placa.

2.2.2.2. *Falla por Separación Vertical*

Es el modo más frecuente de falla en los perfiles de valle abierto y se puede analizar en forma conjunta con la falla por liberación longitudinal. En muchos casos se produce un deslizamiento inclinado, que es la suma de la vertical y la longitudinal. En los perfiles de valle abierto la inclinación de las paredes de los valles crea una componente vertical en las fuerzas de interacción de las muescas, que tienden a separar verticalmente el concreto de la placa, tal como se muestra en la Foto 2.1.

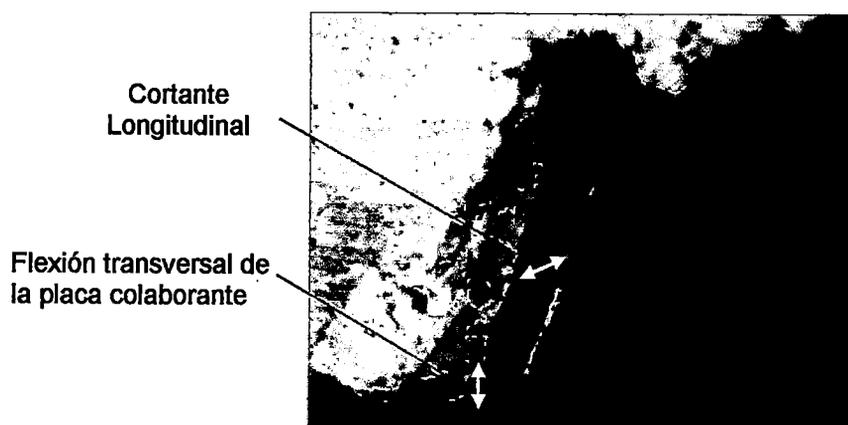


Foto 2.1 Separación vertical de la placa colaborante.

2.2.2.3. *Falla por Rotura del Concreto*

En el caso de presentarse resistencias en el concreto elevadas al modo por liberación longitudinal y modo por separación vertical, se podría llegar a producir la rotura del concreto por:

- Tracción vertical en la parte de los valles cerrados.
- Cizalladura longitudinal en la base de los valles cerrados.
- Cizalladura del concreto en la base de las muescas salientes.
- Agrietamiento del concreto alrededor de las muescas.
- Compresión local en las zonas de contacto.

En cualquier caso de trataría de roturas frágiles y por tanto, el sistema necesitará cierta ductilidad en la placa colaborante para evitar la rotura sucesiva, no simultánea, de los sistemas de retención. La alta resistencia de la losa se consigue con una alta resistencia del concreto y dimensiones adecuadas en las zonas de rotura.

La compresión local es un fenómeno dependiente de la resistencia a la compresión del mortero superficial en situación de confinamiento. Cuando se produce el deslizamiento se transforma en erosión superficial, causando los característicos surcos sobre la superficie del concreto.

2.2.2.4. Falla por Aplastamiento de las Muestras

En el caso de que las muescas sean entrantes al concreto, si el ángulo de embebimiento de la muesca es pequeño, el efecto de cuña que provocan las muescas, crea una fuerza de interacción cuya componente perpendicular a la placa puede llegar a presentar intensidades muy importantes, llegando incluso a aplastar el embebimiento por completo.

2.2.3. Falla por Cortante Vertical

Es un modo de falla poco frecuente ya que sólo se da en losas de luces pequeñas, alturas grandes de losa y esfuerzos cortantes considerables. Debe evitarse por su carácter frágil.

2.2.4. Representación Gráfica de los Modos de Falla

La Figura 2.7 muestra la forma típica de la curva de resistencia de una losa compuesta. Los parámetros que determinan el tipo de falla para una losa de sección transversal definida son la luz de rasante y el esfuerzo cortante.

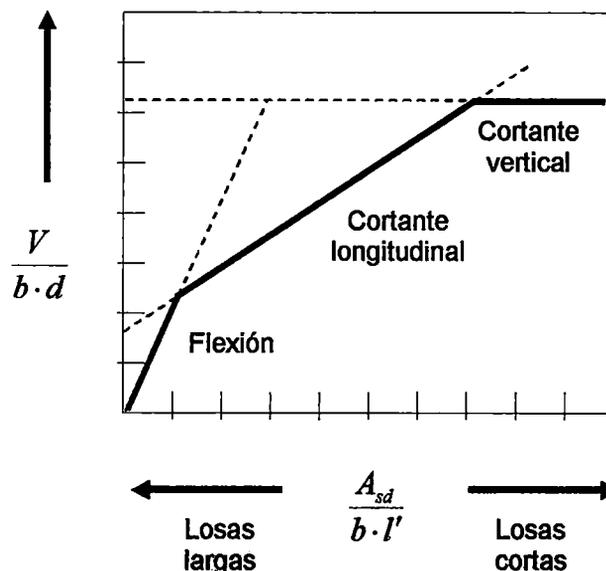


Figura 2.7 Curva de resistencia y modos de falla.

$$\frac{V_e}{b \cdot d \cdot \sqrt{f'_c}} = k + m \frac{\rho \cdot d}{l' \cdot \sqrt{f'_c}} \quad (2.4)$$

En estos términos, la Ecuación (2.4) representa una línea recta, de manera que cuando $V_e/(b \cdot d \cdot \sqrt{f'_c})$ se dibuja contra $\rho \cdot d/l' \cdot \sqrt{f'_c}$; ρ es la cuantía de la sección compuesta dada por la relación $A_{sd}/b \cdot d$. k representa la intersección con la ordenada y m representa la pendiente de la línea recta, como se indica en la Figura 2.8. Con el propósito de diseño, la línea recta puede ser reducida en un 15%.

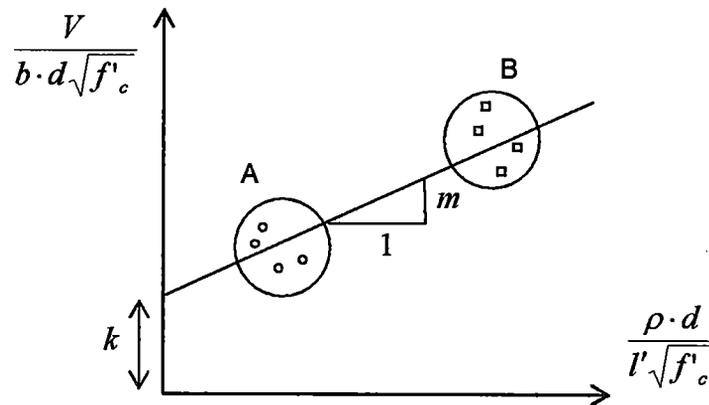


Figura 2.8 Diagrama m-k de ensayos que fallaron por adherencia.

2.4.2. Método de la Conexión Parcial

Este método sólo es aplicable a losas de comportamiento dúctil. El método asume la distribución uniforme de esfuerzos en toda la luz de rasante, basado en el cálculo de la tensión tangencial media última entre la placa colaborante y el concreto, a partir del momento flector de ensayo y del diagrama teórico de estados límites últimos desde conexión nula hasta conexión total [13]. El esfuerzo rasante medio último se determina con la Ecuación (2.5) [10].

$$\tau_u = \frac{\eta \cdot N_{ef}}{b \cdot (l' + l_0)} \quad (2.5)$$

En la Figura 2.9 se muestra el diagrama de interacción parcial para losas de este tipo.

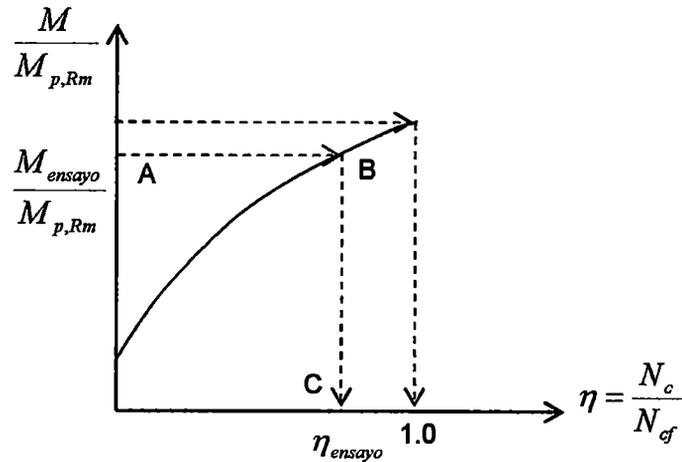


Figura 2.9 Diagrama de diseño de interacción parcial.

Donde:

M_{ensayo} : Momento obtenido en el ensayo en conexión total.

$M_{p,Rm}$: Momento plástico máximo resistente en conexión total.

N_c : Esfuerzo en el concreto para una conexión parcial.

N_{cf} : Esfuerzo teórico en el concreto para conexión total.

2.4.3. Método del Esfuerzo Tangencial Último

Este método experimental consiste en la obtención del esfuerzo rasante por adherencia inicial e interferencia mecánica (muescas) mediante un ensayo directo denominado *pull-out* en probetas reducidas de concreto con placa colaborante, desarrollado por diversos investigadores tales como Schuster (1972), Stark (1978), July y Zubair (1987), Daniels (1988) y Patrick (1990) [18].

Este método se supone, al igual que el método de conexión parcial, uniformemente distribuidas a lo largo de la luz rasante [11].

2.5. Fundamentos de Diseño de Losas con Placa Colaborante

En el diseño de este tipo de sistemas se debe tener en cuenta dos estados. Antes del endurecimiento del concreto fresco o estado no compuesto; la placa colaborante funciona como tablero para soportar las cargas producidas por el concreto fresco, equipos y maniobras durante la construcción. Después del endurecimiento del concreto o estado compuesto, la placa colaborante y el concreto trabajan como uno solo para resistir las cargas muertas y vivas.

2.3. Ductilidad – Fragilidad

La interacción entre la placa colaborante y el concreto es crucial en el comportamiento de las losas compuestas, es por eso que todas las muescas, o dispositivos de cualquier tipo de anclaje o adherencia deben ser capaces de repartirse los esfuerzos para poder resistir conjuntamente el deslizamiento.

La rigidez excesiva del sistema de retención en estas losas puede provocar la rotura frágil del concreto por cizalladura y una falla no secuencial de los dispositivos de retención, es decir una mínima resistencia en este tipo de losas.

Por lo tanto, para lograr la interacción total debe lograrse un sistema de retención adecuado, que evite el deslizamiento y presente la deformabilidad necesaria para que el esfuerzo rasante se distribuya convenientemente antes que se produzca la rotura del concreto.

2.4. Métodos de Cálculo de la Resistencia de Adherencia al Corte

2.4.1. Método m-k

Es un método semi-experimental (Porter y Ekberg, 1976) utilizado para determinar la resistencia de una losa al esfuerzo cortante longitudinal. A partir de los resultados experimentales se construye una Ecuación (2.3) [18], utilizando los parámetros resistentes más significativos de este tipo de losas.

$$V_e = \left(k \cdot \sqrt{f'_c} + m \frac{\rho \cdot d}{l'} \right) \cdot b \cdot d \quad (2.3)$$

Donde:

V_e : Fuerza cortante experimental.

m, k : Parámetros característicos de la adherencia de la placa colaborante.

b : Ancho de la losa compuesta.

d : Peralte de la losa compuesta.

f'_c : Resistencia a la compresión del concreto.

Reformulando la Ecuación (2.3) se establece la Ecuación (2.4) para propósitos del ensayo:

2.5.1. Deflexión de la Placa Colaborante en el Estado No Compuesto

La placa colaborante debe ser capaz de funcionar como plataforma durante los trabajos de construcción. Se considera que la deformación admisible en este estado es el mínimo valor entre $1/180$ de la luz libre, L , y 19mm , establecida en la Ecuación (2.6) [19].

$$\delta_{calc} \leq \delta_{adm} = \min \left\{ \frac{L}{180}, 19\text{mm} \right\} \quad (2.6)$$

Bajo estas condiciones se verificará que las deflexiones no superen el valor límite. Considerando como carga el peso propio del concreto y de la placa colaborante; usando las fórmulas mostradas en la Tabla 2.1 [19] para uno, dos o tres tramos.

2.5.2. Esfuerzo de Tracción de la Placa Colaborante en el Estado No Compuesto

Al igual que la sección anterior, se utilizarán las condiciones de servicio durante la construcción hasta que el concreto endurezca y la losa funcione como un sistema compuesto. Se considera como esfuerzo admisible de la lámina de acero el 60% de su esfuerzo de fluencia; determinada por la Ecuación (2.7) y la Ecuación (2.8) para el esfuerzo de tracción y compresión, respectivamente.

$$\left(\frac{M_{sd}^+}{S_{inf\ sd}} \right) \leq 0.60 \cdot f_y \quad (2.7)$$

$$\left(\frac{M_{sd}^-}{S_{sup\ sd}} \right) \leq 0.60 \cdot f_y \quad (2.8)$$

Donde:

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

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

$S_{inf\ sd}$: Módulo de sección elástica a tracción de la placa colaborante.

$S_{sup\ sd}$: Módulo de sección elástica a compresión de la placa colaborante.

Bajo estas condiciones se verificará que los esfuerzos no superen el valor límite. Considerando la carga uniforme producida por el peso del concreto, una carga uniforme producida durante el proceso constructivo de 20psf (100kg/m²) y una carga concentrada producida por un operario o equipo de 150lb/ft (225kg/m) [19].

2.5.3. Esfuerzos en la Losa Compuesta

Para el cálculo de los esfuerzos de la placa colaborante se utilizarán las condiciones de servicio en el estado compuesto, es decir el esfuerzo producido por la carga muerta y carga viva sin factorar. El esfuerzo admisible de la lámina de acero está determinado por el 60% de su esfuerzo de fluencia, como se indica en la Ecuación (2.9).

$$\left(\frac{M_D + M_L}{S_{\text{inf}}} \right) \cdot n \leq 0.60 \cdot f_y \quad (2.9)$$

En el caso del concreto, el esfuerzo admisible está determinado por el 45% de su resistencia a compresión, como se indica en la Ecuación (2.10).

$$\left(\frac{M_D + M_L}{S_{\text{sup}}} \right) \leq 0.45 \cdot f'_c \quad (2.10)$$

Donde:

M_D : Momento flector producido por la carga viva.

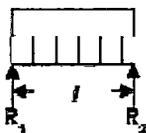
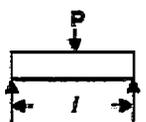
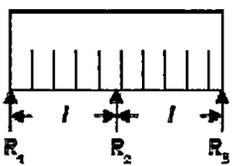
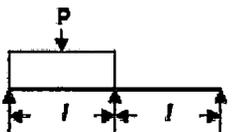
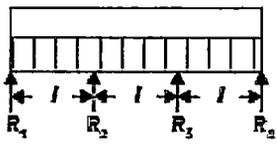
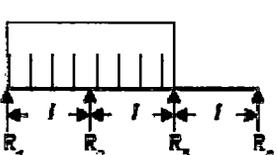
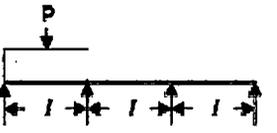
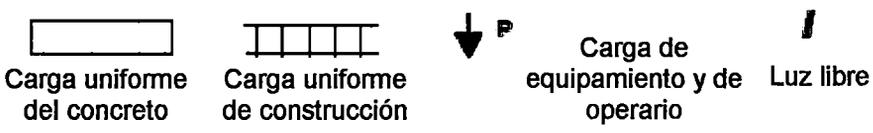
M_L : Momento flector producido por la carga muerta.

n : Relación del módulo de elasticidad del acero y el concreto.

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

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

Tabla 2.1 Fórmulas para el cálculo de fuerzas y deflexiones elásticas en vigas.

Un tramo ^(*)	
	$R_1 = R_2 = 0.5wl$ $M_{sd}^+ = 0.125wl^2$ $\delta_{calc} = 0.013 \cdot wl^4 / E_{sd} I$
	$M_{sd}^+ = 0.250Pl + 0.125wl^2$
Dos tramos	
	$R_2 = 1.25wl$ $V = 0.625wl$ (En el apoyo interior) $M_{sd}^+ = 0.070wl^2$ $M_{sd}^- = 0.125wl^2$ $\delta_{calc} = 0.0054 \cdot wl^4 / E_{sd} I$
	$M_{sd}^+ = 0.203Pl + 0.096wl^2$ $M_{sd}^- = 0.094Pl + 0.063wl^2$
Tres tramos	
	$R_1 = R_4 = 0.40wl$; $R_2 = R_3 = 1.10wl$ $V = 0.60wl$ (En el apoyo interior) $M_{sd}^+ = 0.080wl^2$ $M_{sd}^- = 0.100wl^2$
	$R_2 = 1.20wl$ $V = 0.617wl$ (En el apoyo interior) $M_{sd}^+ = 0.074wl^2$ $M_{sd}^- = 0.117wl^2$
	$M_{sd}^+ = 0.200Pl + 0.094wl^2$
	<p>Carga uniforme del concreto</p> <p>Carga uniforme de construcción</p> <p>↓ P Carga de equipamiento y de operario</p> <p> Luz libre</p>

^(*) Para losas de un solo tramo, se le adicionará a la carga uniforme producida por el concreto, el menor valor del 50% del peso del concreto o 150kg/m² (30psf) [19].

2.5.4. Resistencia a la Flexión de la Losa Compuesta

El espesor de la placa colaborante se determina generalmente con el requisito referente a que, durante la construcción y antes de que el concreto fragüe, la lámina de acero debe soportar su propio peso, el peso del concreto y las cargas producidas durante la construcción. Esto significa que, aunque la lámina en la estructura terminada sirva de refuerzo a la losa, las dimensiones de su sección transversal y por tanto su área por lo general las controlan las condiciones temporales de construcción. En consecuencia, las losas compuestas se pueden sobreforzar o subreforzar, según la combinación particular de luces, cargas, resistencias de materiales y condiciones del apuntalamiento temporal. En este sistema no es posible evitar las losas sobre-reforzadas, en contraste con la situación para las losas convencionales que utilizan barras de acero convencionales de refuerzo.

Como se mencionó anteriormente, las losas de este tipo pueden estar sobre-reforzadas o subreforzadas, dependiendo de que su cuantía este o no por encima de la cuantía balanceada, respectivamente. La cuantía balanceada, ρ_b , es calculada como se indica en la Ecuación (2.11).

$$\rho_b = 0.85 \cdot \beta_1 \cdot \frac{f'_c}{f_y} \cdot \left(\frac{\varepsilon_u}{\varepsilon_u + \frac{f_y}{E_{sd}}} \right) \cdot \left(\frac{t_c}{d} \right) \quad (2.11)$$

Donde:

β_1 : Coeficiente que depende del valor que tome f'_c : 0.85 para concretos cuya resistencia a la compresión son menores a 280kg/cm²; y se reduce 0.05 veces en cada incremento de 70kg/cm², hasta un mínimo de 0.65 [1].

ε_u : Deformación unitaria límite del concreto, 0.0038.

E_{sd} : Módulo de elasticidad del acero de la placa colaborante, 2.1x10⁶kg/cm².

f_y : Esfuerzo de fluencia del acero de la placa colaborante.

t_c : Altura de la sección llena de concreto en la losa compuesta (por encima de las nervaduras).

En el caso de una losa subreforzada, se considera una falla dúctil y se calcula la resistencia a la flexión utilizando la Ecuación (2.12) y la Ecuación (2.13).

$$M_n = A_s \cdot f_y \cdot \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (2.12)$$

Donde a se obtiene de:

$$a = \frac{A_s \cdot f_y}{0.85 \cdot f'_c \cdot b} \quad (2.13)$$

En el caso de losas sobre-reforzadas, se considera una falla frágil; condición en la que es complicado calcular la resistencia a flexión, por el hecho que las deformaciones en la sección de la placa colaborante varían con la altura, según el historial de las cargas, es decir, dependen de si la lámina de acero se cargó en estado no compuesto, de si se colocó apuntalamiento temporal o no, y en caso afirmativo de cómo se colocaron, etc. Para el caso en el que proporcionan apuntalamiento continuo en la estructura, es decir cuando todas las cargas son compuestas y con la aproximación de que el esfuerzo en el acero en toda la altura es igual a su valor en el centroide, un análisis de compatibilidad de deformaciones establece la Ecuación (2.14) y la Ecuación (2.15).

$$M_n = 0.85 \cdot f'_c \cdot a \cdot b \cdot \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (2.14)$$

Donde a se obtiene de:

$$\left(\frac{0.85 \cdot f'_c}{\rho \cdot E_s \cdot \varepsilon_u} \right) \cdot a^2 + a \cdot d - \beta_1 \cdot d^2 = 0 \quad (2.15)$$

Finalmente, se considera que el momento nominal, M_n , o capacidad de tomar el momento flector debe verificar la Ecuación (2.16):

$$M_u \leq \phi \cdot M_n \quad (2.16)$$

Donde:

M_u : Momento flector último.

ϕ : Coeficiente de reducción de resistencias nominales.

2.5.5. Resistencia al Corte

La resistencia al corte está basada en un refuerzo de corte promedio sobre toda la sección transversal efectiva de la sección será resistida por el alma de concreto únicamente en caso este no tenga refuerzo de acero adicional por corte. La resistencia al corte proporcionado por el concreto se supone que es la misma para vigas con y sin refuerzo por corte, y se toma como el corte que provoca un agrietamiento inclinado significativo [1], tal como es mostrado en la Figura 2.10.

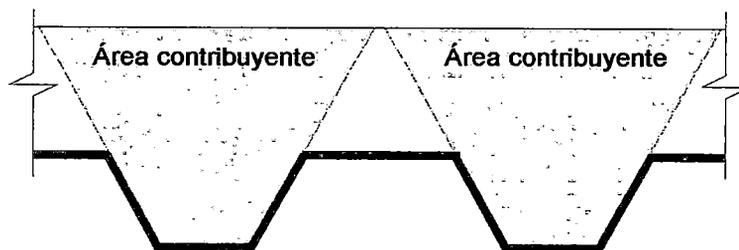


Figura 2.10 Área de concreto resistente frente al corte.

Al no llevar acero adicional por corte, se acepta que el corte será tomado netamente por la losa de concreto, y se obvia que la lámina de acero pueda aportar en la resistencia del corte, con lo cual se obtiene la Ecuación (2.17).

$$V_n = 0.53 \cdot \sqrt{f'_c} \cdot A_c \quad (2.17)$$

Finalmente, se considera que el corte nominal, V_n , o capacidad de tomar el corte por parte del sistema debe verificar la Ecuación (2.18):

$$V_u \leq \phi \cdot V_n \quad (2.18)$$

Donde:

V_u : Fuerza cortante última.

Los coeficientes ϕ que deben aplicarse a las resistencias nominales, V_n y M_n , para determinar las resistencias de diseño varían según el tipo de resistencia que se calcule, al igual que para el caso del concreto armado convencional, presentados en el ACI-318-05 [1].

2.5.6. Resistencia de Adherencia al Corte

Una característica esencial de la construcción de las losas compuestas es que los esfuerzos de adherencia a flexión a lo largo de la interfase acero-concreto no deben permitir deslizamiento horizontal entre los dos elementos. Así como ocurre con las barras de acero la sola adherencia no basta, por esta razón se utilizan una variedad de dispositivos para transferencia de cortante. En este estudio, nos referiremos a las hendiduras en la superficie, a los que denominamos muescas, que trabajan de manera similar a las estrías de las barras de acero; además contrarrestan la tendencia de la lámina de acero a separarse verticalmente del concreto. Bajo carga, la losa compuesta puede fallar en una forma que combina falla a cortante y de adherencia, de ahí que se le llame falla por adherencia a cortante, con ciertas características peculiares para este tipo de construcción.

En el código ACI-318, con base en cientos de ensayos de vigas de concreto, se determina una ecuación para determinar la resistencia de adherencia a cortante en vigas de concreto [15], basados en el mismo procedimiento se obtienen los parámetros para las losas con placa colaborante mediante la Ecuación (2.19); la misma que debe satisfacer la Ecuación (2.18).

$$V_n = \left(k \cdot \sqrt{f'_c} + m \frac{\rho \cdot d}{l'} \right) \cdot b \cdot d \quad (2.19)$$

Una buena aproximación para el caso de cargas uniformemente distribuidas es considerar la luz rasante l' , como $L/4$ [14].

2.5.7. Deflexión de la Losa Compuesta

Cuando se emplea un elemento losa o viga, existirán dos tipos de deformaciones, la primera e inmediata, será la deformación elástica debido a la carga, se le llama elástica dado que el elemento podrá regresar a su forma original si se retirara la carga; el otro tipo de deformación existente es la deformación por flujo plástico o deformación diferida que sucede debido a las cargas y el paso del tiempo, estas deformaciones, a diferencia de las deformaciones elásticas, no son totalmente reversibles.

En el caso de este tipo de losas, notaremos que dependiendo del uso de apuntalamientos temporales se producirán diversos tipos de deformaciones. Si no se hubiera utilizado ningún tipo de apuntalamiento, las deflexiones que se producirán en el sistema compuesto dependerán exclusivamente de las cargas vivas que se le apliquen al sistema y las cargas muertas sobre impuestas después del desencofrado (en caso existieran) así también como de las deformaciones diferidas.

Si se hubiera utilizado apuntalamientos temporales, entonces se considerará que existirán deformaciones debido a las cargas propias de la losa, este adicional a las deformaciones del sistema sin apuntalar, y dichas deformaciones dependerán obviamente de acuerdo al tipo de apuntalamiento que se le haya dado al sistema en el momento del vaciado.

Para la deflexión inmediata, debido a las cargas permanentes (dependiendo si están apuntaladas o no) y las cargas vivas se tiene la Ecuación (2.20).

$$\Delta'_{st} = \frac{5}{384} \cdot \frac{(W_D + W_L) \cdot b \cdot L^4}{E_c \cdot I_e} \quad (2.20)$$

Donde:

I_e : Inercia efectiva de la losa compuesta.

E_c : Módulo de elasticidad del concreto, considerado como $15100 \cdot \sqrt{f'_c}$ [15].

W_D : Carga muerta uniformemente distribuida por unidad de área.

W_L : Carga viva uniformemente distribuida por unidad de área.

Para estimar las deformaciones diferidas o deformaciones a largo plazo, Δ_{LT} , una buena aproximación sería considerar la Ecuación (2.21):

$$\Delta_{LT} = \Delta'_{st} \times \left[2 - 1.2 \times \frac{A'_s}{A_s} \right] \quad (2.21)$$

Donde:

A'_s : Área de acero en tracción.

A_s : Área de acero en compresión, considerándose el acero temperatura.

Finalmente, se debe de verificar que la deformación total de la losa, establecida en la Ecuación (2.22); no exceda la deformación admisible, calculada con la Ecuación (2.23).

$$\Delta_{total} = \Delta_{LT} + \Delta'_{st} \quad (2.22)$$

$$\Delta_{adm} = \frac{L}{360} \quad (2.23)$$

El ACI-318 señala que las deformaciones diferidas se pueden determinar como las deformaciones inmediatas multiplicadas por un factor λ , determinado por la Ecuación (2.24) [1].

$$\lambda = \frac{\xi}{1 + 50 \times \rho'} \quad (2.24)$$

Con lo cual, la Ecuación (2.24) es reformulada en la Ecuación (2.25).

$$\Delta_{LT} = \lambda \times \Delta'_{st} \times \left[2 - 1.2 \times \frac{A'_s}{A_s} \right] \quad (2.25)$$

La cuantía ρ' es calculada como la relación $A'_s/b \cdot h$; y el factor ξ es 1.40, para cargas sostenidas por un año y 2.00, para 5 o más años [1].

2.5.8. Efecto del Apuntalamiento

Sólo en el caso, en que la deflexión y esfuerzo calculados considerando la etapa de la construcción sea mayor a la admisible, como se trató en la Sección 2.5.1 y Sección 2.5.2, será necesario el uso de uno o más apuntalamientos temporales, según sea el caso.

El apuntalamiento temporal ocasionará que el esfuerzo producido por las cargas de peso propio y demás presentes durante el endurecimiento del concreto se incremente conforme se aumenten las redundancias (apoyos temporales). Este esfuerzo es determinado por una fracción de las mismas.

En la Tabla 2.2 se presenta el coeficiente de reducción del peso propio para diferentes condiciones de apuntalamiento temporal; estos coeficientes pueden ser usados sólo para efectos de verificación de resistencias, en el caso de diseño no es necesario incluir este efecto [14].

Tabla 2.2 Coeficientes de reducción por peso propio.

Condición	Coeficiente de reducción del peso propio (γ)
Sin apuntalamiento	0.000
Apuntalamiento en el centro	0.625
Apuntalamiento en los tercios	0.733
Apuntalamiento total	1.000

2.6. Cálculo Teórico del Comportamiento de Losas con Placa Colaborante

2.6.1. Comportamiento del Concreto

En la Figura 2.11, se presenta la curva esfuerzo-deformación para el concreto no confinado propuesto por Hognestad. Para el cálculo de la fuerza en compresión en el concreto después del comportamiento elástico se consideró un diagrama de esfuerzo-deformación unitaria para el concreto con una rama ascendente parabólica, definida por la Ecuación (2.26), y una rama descendente lineal, definida por la Ecuación (2.27) [15].

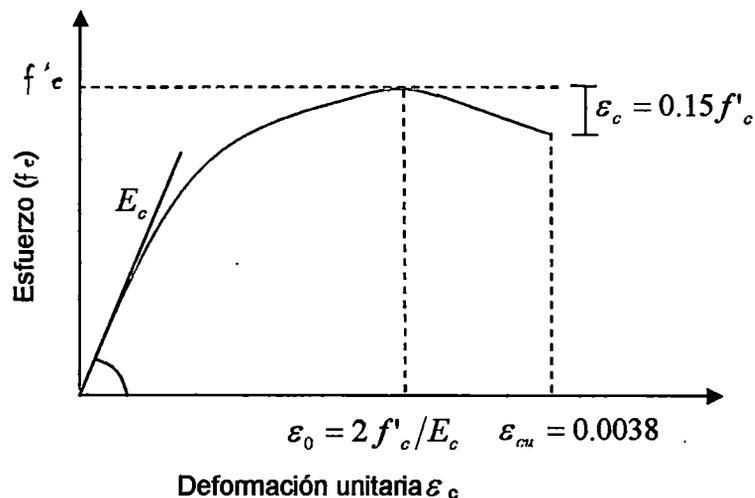


Figura 2.11 Curva esfuerzo-deformación propuesta por Hognestad.

$$f_c = \left[\frac{2\varepsilon}{\varepsilon_0} - \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^2 \right] \cdot f'_c \quad \text{para } 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_0 \quad (2.26)$$

$$f_c = [1 - 100 \cdot (\varepsilon - \varepsilon_0)] \cdot f'_c \quad \text{para } \varepsilon_0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu} \quad (2.27)$$

El esfuerzo de compresión equivalente en el concreto está dado por el parámetro k_1 , definido en la Ecuación (2.28).

$$k_1 = \frac{\int_0^\varepsilon f_c \cdot d\varepsilon}{\varepsilon} \quad (2.28)$$

Reformulando la Ecuación (2.28) para la rama ascendente parabólica y la rama descendente lineal se obtiene la Ecuación (2.29) y la Ecuación (2.30), respectivamente.

$$k_1 = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \left(1 - \frac{\varepsilon_c}{3\varepsilon_0} \right); \text{ Para } 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_0 \quad (2.29)$$

$$k_1 = 1 - \frac{\varepsilon_0}{3\varepsilon_c} - 50\varepsilon_c + 100\varepsilon_0 - 50 \frac{\varepsilon_0^2}{\varepsilon_c}; \text{ Para } \varepsilon_0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu} \quad (2.30)$$

La posición de la fuerza de compresión en el concreto, referida a la posición de la fibra más lejana en compresión desde el eje neutro está dada por el parámetro k_2 , definido en la Ecuación (2.31).

$$k_2 = 1 - \frac{\int_0^\varepsilon f_c \cdot \varepsilon \cdot d\varepsilon}{\varepsilon \cdot \int_0^\varepsilon f_c \cdot d\varepsilon} \quad (2.31)$$

Reformulando la Ecuación (2.31) para la rama ascendente parabólica y la rama descendente lineal se obtiene la Ecuación (2.32) y la Ecuación (2.33), respectivamente.

$$k_2 = \frac{4\varepsilon_0 - \varepsilon_c}{12\varepsilon_0 - 4\varepsilon_c}; \text{ Para } 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_0 \quad (2.32)$$

$$k_2 = \frac{\frac{\varepsilon_0^2}{12} - \frac{\varepsilon_c \cdot \varepsilon_0}{3} + \frac{\varepsilon_c^2}{2} - \frac{50}{3}(\varepsilon_c - \varepsilon_0)^3}{\varepsilon_c^2 \left(1 - \frac{\varepsilon_0}{3\varepsilon_c} - 50\varepsilon_c + 100\varepsilon_0 - 50 \frac{\varepsilon_0^2}{\varepsilon_c} \right)}; \text{ Para } \varepsilon_0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu} \quad (2.33)$$

La reducción del esfuerzo de compresión de concreto en probetas cilíndricas al esfuerzo de compresión máximo real está dada por el parámetro k_3 , definido por la Ecuación (2.34). En la Tabla 2.3 se muestran los parámetros experimentales de esfuerzo en resistencia a la flexión de secciones rectangulares encontrados por PCA (Portland Cement Association) [15].

$$k_3 = f_{c,max} / f'_c \quad (2.34)$$

Tabla 2.3 Parámetros de esfuerzo en resistencia a la flexión de secciones rectangulares encontrados por PCA.

f'_c		k1	k2	k3	ε_c
Kg/cm ²	psi				
140	2000	0.86	0.48	1.03	0.0037
210	3000	0.82	0.46	0.97	0.0035
280	4000	0.79	0.45	0.94	0.0034
350	5000	0.75	0.44	0.92	0.0032
420	6000	0.71	0.42	0.92	0.0031
490	7000	0.67	0.41	0.93	0.0029

2.6.2. Comportamiento del Acero

El comportamiento del acero se idealiza como una curva bilineal, mostrada en la Figura 2.12. Para el cálculo de la deformación unitaria posterior al comportamiento elástico se considera una plataforma de fluencia, con una deformación unitaria de fractura muy grande; el esfuerzo del acero se calcula según la Ecuación (2.35) [16].

$$f_s = E_s \cdot \varepsilon_s; \text{ Si } f_s \geq f_y \rightarrow f_s = f_y \quad (2.35)$$

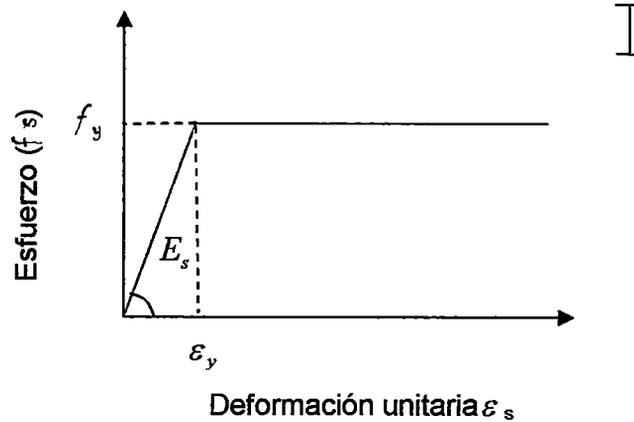


Figura 2.12 Curva esfuerzo-deformación bilineal para el acero.

2.6.3. Análisis Teórico de la Losa Compuesta

Con el objeto de predecir el comportamiento de las losas con placa colaborante, se empleó un método de cálculo que consiste en asumir una interacción total entre el concreto y el acero, esto debido a que se busca predecir el comportamiento de esta losa hasta que la placa de acero se desprende del concreto y deja de ser un elemento compuesto, es decir pierde su funcionalidad. Como se describe en la Sección 2.1.2.1, puede aceptarse como válida la hipótesis de continuidad de deformaciones longitudinales entre los materiales. La ley de deformaciones se supone lineal.

Particularmente, las losas estudiadas en esta investigación tienen su eje neutro en la sección llena de concreto, por lo cual, las ecuaciones mostradas más adelante son válidas en el modelo teórico desarrollado. En caso contrario, las ecuaciones deberían ser modificadas de acuerdo a la posición del eje neutro.

En la sección de la losa mostrada en la Figura 2.13, se plantea una condición de esfuerzos antes que el concreto inicie su etapa de agrietamiento en la fibra inferior.

Se supone una relación lineal en las deformaciones y esfuerzos producidos en la sección, representada por la Ecuación (2.36).

$$\frac{\varepsilon_c}{Y_{cc}} = \frac{\varepsilon_s}{(d - Y_{cc})} = \frac{\varepsilon'_c}{(t - Y_{cc})} \quad (2.36)$$

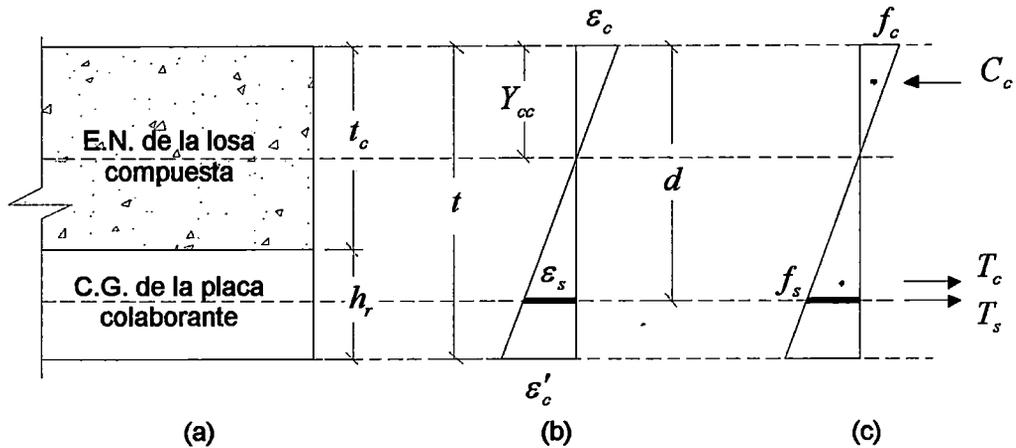


Figura 2.13 Idealización de la losa hasta el inicio del agrietamiento del concreto.
a) Sección transversal de la losa compuesta. b) Distribución de deformaciones unitarias.
c) Distribución de esfuerzos.

Se supone una relación lineal en los esfuerzos producidos en la sección, representada por la Ecuación (2.37) y Ecuación (2.38) para el concreto y acero, respectivamente.

$$f_c = E_c \cdot \varepsilon_c \quad (2.37)$$

$$f_s = E_s \cdot \varepsilon_s \quad (2.38)$$

La Ecuación (2.39), Ecuación (2.40) y Ecuación (2.41), son utilizadas para el cálculo de la fuerza en compresión del concreto, fuerza de tracción acero y fuerza de tracción del concreto; respectivamente.

$$C_c = 0.5 \cdot f_c \cdot Y_{cc} \cdot b \quad (2.39)$$

$$T_s = A_{sd} \cdot f_s \quad (2.40)$$

$$T_c = 0.5 \cdot (\varepsilon'_c \cdot E_c) \cdot [(t_c - Y_{cc}) + A_{valle}/C_s] \cdot b \quad (2.41)$$

Por condición de equilibrio de fuerzas, como se plantea en la Figura 2.13 c, se obtiene la Ecuación (2.42).

$$C_c = T_s + T_c \quad (2.42)$$

Por consiguiente el momento flector respecto al eje neutro es determinado por la Ecuación (2.43).

$$M = C_c \cdot (2/3 \cdot Y_{cc}) + T_c \cdot (2/3 \cdot (t - Y_{cc})) + T_s \cdot (d - Y_{cc}) \quad (2.43)$$

La curvatura de la sección analizada se obtiene mediante la Ecuación (2.44).

$$\varphi = \frac{\varepsilon_c}{Y_{cc}} \quad (2.44)$$

El agrietamiento del concreto se inicia por la fibra inferior, en ese sentido se define la Ecuación (2.45), el cual nos da el límite del rango elástico de la losa compuesta.

$$\varepsilon'_c \geq \varepsilon_{ctr} \quad (2.45)$$

Una vez agrietada la zona de concreto en tracción, la sección analizada es planteada como se muestra en la Figura 2.14. Se mantiene la hipótesis de la continuidad de deformaciones, las cuales son calculadas de manera lineal, usando la Ecuación (2.36).

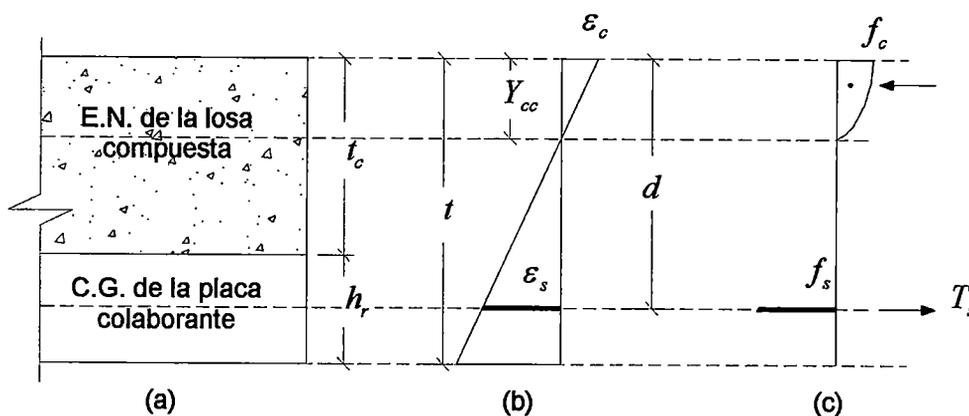


Figura 2.14 Idealización de la losa luego del inicio del agrietamiento del concreto.
a) Sección transversal de la losa compuesta. b) Distribución de deformaciones unitarias.
c) Distribución de esfuerzos.

Para el cálculo de los esfuerzos del concreto y del acero se usarán un modelo de esfuerzo-deformación parabólico y el modelo bilineal, respectivamente.

Entonces, la fuerza resultante del concreto en compresión y del acero en tracción es calculada por la Ecuación (2.46) y la Ecuación (2.47), respectivamente.

$$C_c = f_c \cdot Y_{cc} \cdot b \quad (2.46)$$

$$T_s = A_{sd} \cdot f_s \quad (2.47)$$

En esta etapa, los esfuerzos producidos en el concreto por tracción (debajo del eje neutro) no son considerados en el equilibrio de fuerzas, pues se consideran poco significativos. Entonces, por condición de equilibrio de fuerzas en la sección se plantea la Ecuación (2.48):

$$C_c = T_s \quad (2.48)$$

Por consiguiente el momento flector respecto al eje neutro es definido por la Ecuación (2.49).

$$M = T_s \cdot (d - k_2 \cdot Y_{cc}) \quad (2.49)$$

Como se muestra en la Figura 2.15, la fuerza horizontal para ser transferida a través de la zona agrietada de la sección permanece constante; por lo tanto el flujo cortante en la zona en tracción es también constante [15].

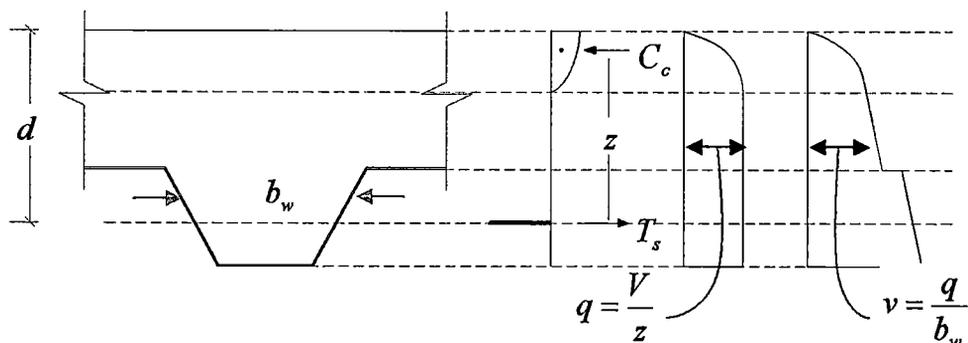


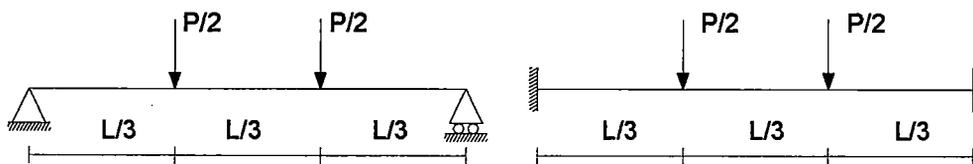
Figura 2.15 Esfuerzos rasantes idealizados en la sección agrietada.

Entonces, estos esfuerzos rasantes pueden ser calculados mediante la Ecuación (2.50) [15].

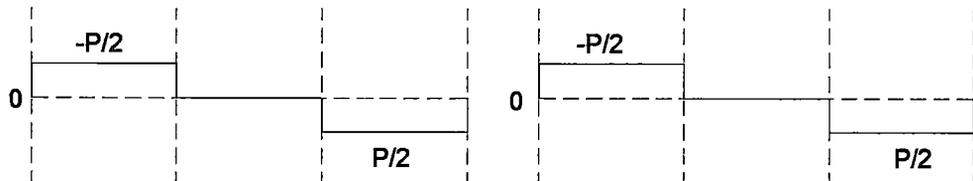
$$v = \frac{1}{b_w} \cdot \frac{dT}{dx} = \frac{dM}{dx} \cdot \frac{1}{b_w \cdot z} = \frac{V}{b_w \cdot z} \quad (2.50)$$

Otro parámetro importante en la predicción del comportamiento de las losas con placa colaborante es la inercia posterior al agrietamiento del concreto por debajo del eje neutro (zona en contacto con la placa colaborante), la cual es calculada mediante la Ecuación (2.51) recomendada por el Comité del ACI 318-71 [15].

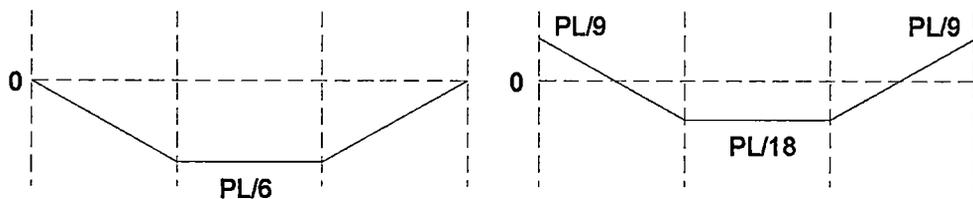
$$I_e = \left(\frac{M_{agr}}{M} \right)^3 \cdot I_{n-agr} + \left[1 - \left(\frac{M_{agr}}{M} \right)^3 \right] \cdot I_{agr} \quad (2.51)$$



(a) condiciones de apoyo y cargas en la viga.



(b) Diagrama de fuerza cortante.



(c) Diagrama de momento flector.

$$\delta_{m\acute{a}x} = \frac{23}{1296} \cdot \frac{P \cdot L^3}{E_c \cdot I_e}$$

$$\delta_{m\acute{a}x} = \frac{5}{1296} \cdot \frac{P \cdot L^3}{E_c \cdot I_e}$$

(d) Flechas centrales.

Los a apoyada en rodillos.

Los a apoyada en vigas de concreto.

Figura 2.16 Idealización de las losas según la teoría de la viga elástica.

Las deflexiones inmediatas son calculadas usando las fórmulas de la teoría de la viga elástica, teniendo como factor de rigidez $E_c I_e$, las cuales dependen de las condiciones de carga aplicadas en la losa. En la Figura 2.16 se presenta la idealización de las condiciones de carga en los especímenes ensayados.

Con el objeto de corroborar la hipótesis expuesta previamente se desarrolló una rutina, la cual sirve como herramienta para el simular la respuesta de las losas ante cargas similares a las del ensayo, y así poder comparar las curvas de carga-desplazamiento experimentales con las simulaciones realizadas.

El procedimiento del método propuesto para la predicción del comportamiento es como sigue:

Paso 1: Suponer un incremento progresivo de las deformaciones unitarias del concreto en la fibra superior de la losa

Paso 2: Calcular las deformaciones unitarias producidas en el concreto y acero en la fibra inferior.

Paso 3: Calcular la posición del eje neutro mediante iteraciones hasta satisfacer el equilibrio de fuerzas de compresión y tracción, una aproximación inicial de la distancia del eje neutro a la fibra superior es el peralte de la losa. Se supone una relación lineal de deformaciones hasta el agrietamiento del concreto en la fibra inferior, posteriormente se supone el modelo propuesto por Hognestad; y en el caso del acero, se supone un comportamiento bilineal.

Paso 4: Una vez satisfecha la condición de equilibrio de la sección en el Paso 3, las fuerzas de compresión y tracción se utilizan para hallar las fuerzas y deformaciones actuantes en la losa, como el momento flector, la fuerza cortante, el esfuerzo rasante, deflexiones, curvatura, etc.

Paso 5: Verificar si se produce algún tipo de falla en el concreto en la fibra superior, en el acero, y en la interfase acero-concreto. Si no ha fallado la losa, se repite el procedimiento desde el Paso 1.

El diagrama de flujo mostrado en la Figura 2.17 resume la computación de las simulaciones de la respuesta de las losas ante condiciones de cargas similares a las tenidas en los ensayos.

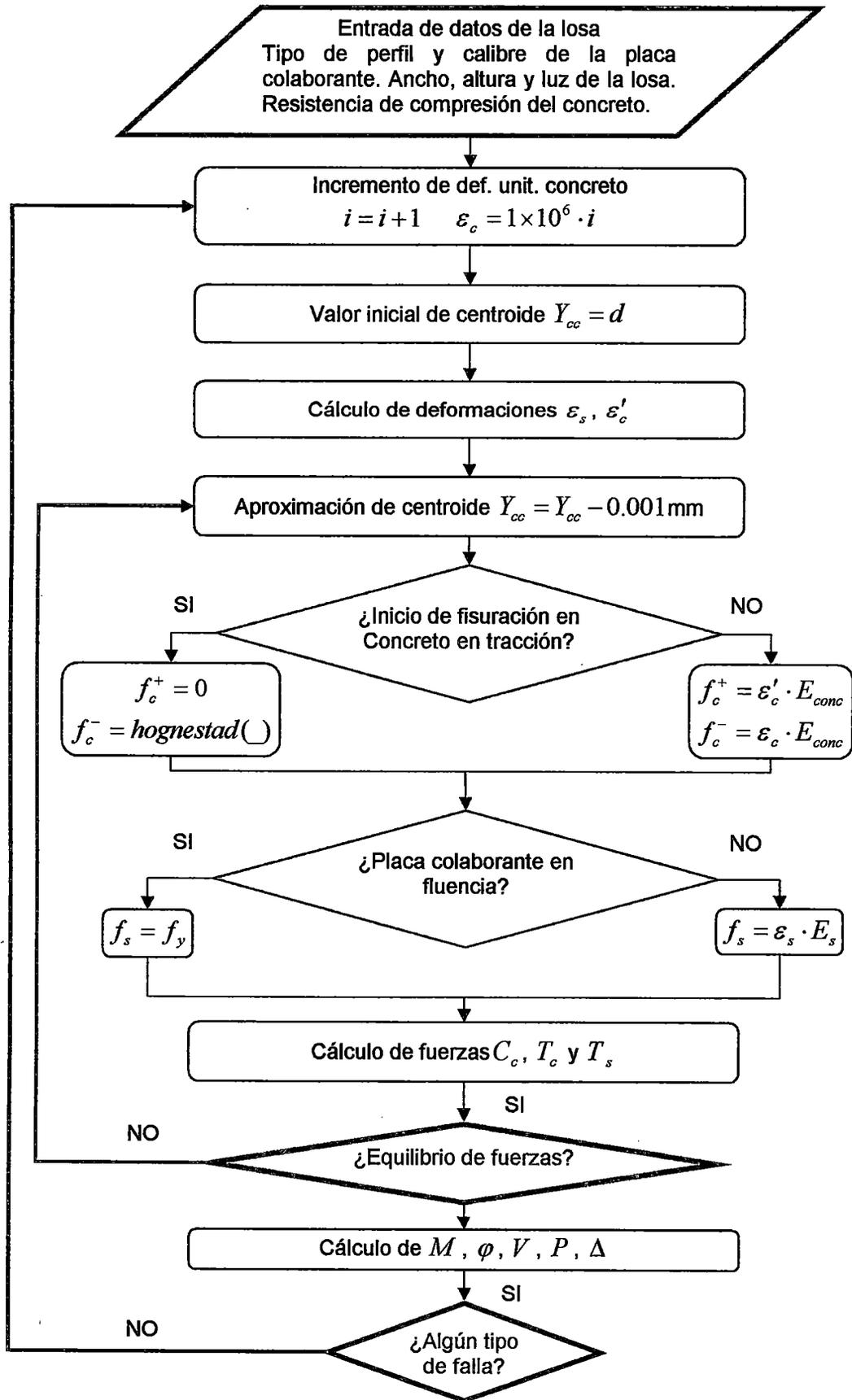


Figura 2.17 Diagrama de flujo de la herramienta para las simulaciones.

CAPÍTULO 3. ESTUDIO EXPERIMENTAL

El presente capítulo describe los ensayos llevados a cabo en esta investigación: la preparación de los especímenes, la metodología de los ensayos y los resultados obtenidos.

Esta serie de experimentos está comprendida por 6 ensayos de flexión de losas apoyadas en rodillos, 6 ensayos de flexión de losas apoyadas en vigas de concreto y 9 ensayos de adherencia de probetas reducidas de concreto embebido en placa colaborante. Los especímenes presentan distintas variantes, tales como la luz entre apoyos, el tipo de perfil de la placa colaborante y su espesor, el espesor de la losa de concreto y los tipos de apoyo; los cuales son descritos más adelante.

Estos experimentos se llevaron a cabo en el Laboratorio de Estructuras del CISMID⁴. Durante los meses de septiembre y octubre del 2006 se desarrollaron los ensayos de flexión, y en el mes de septiembre del 2007 los ensayos de *pull-out*.

3.1. Ensayo de Flexión

Con la finalidad de conocer la respuesta de las losas colaborantes frente al incremento de cargas puntuales se llevaron a cabo ensayos de flexión, los cuales permiten conocer la resistencia a la flexión, la resistencia de adherencia al corte, que servirán de base para la determinación de los parámetros m-k.

Estos ensayos se llevaron a cabo en dos tipos de especímenes. El primer tipo comprenden losas apoyadas sobre rodillos que simulan la condición de una viga simplemente apoyada, representan la condición más desfavorable, la cual consiste en la ausencia de conectores de corte y grandes luces, donde el único mecanismo resistente es la adherencia química entre el concreto y la placa colaborante, y la adherencia mecánica proporcionada por las muescas. El segundo tipo comprenden losas apoyadas en vigas de concreto se ensayaron con el propósito de conocer el incremento de resistencia de adherencia al corte producido por el embebimiento de los extremos de la placa colaborante en las vigas de concreto.

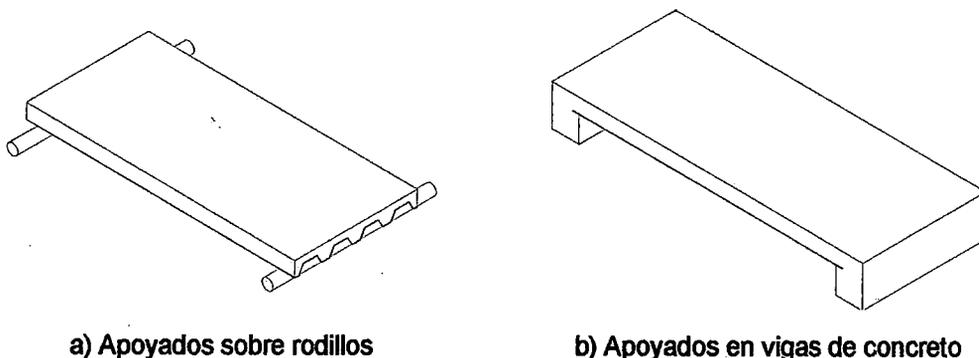
⁴ Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID)

3.1.1. Especímenes

Los especímenes a ser ensayados a flexión fueron construidos en grupos de 6 losas, con el objeto de tener un mejor control de los procesos constructivos.

Las características con las que se diseñaron las losas fueron las siguientes:

- Las Luces, espesores de concreto, calibres de placa colaborante son las mostradas en la Tabla 3.1 y Tabla 3.2.
- El concreto de todas las losas tiene una resistencia nominal a la compresión de 210kg/cm^2 y un diseño de mezcla en volumen de 1:2:4:3 con relación agua/cemento de 0.65. La calidad de concreto se verificó mediante ensayos de compresión axial, como se indica en la Tabla 3.6 (Sección 3.3.1).
- El refuerzo de acero por temperatura (malla de temperatura) es de un diámetro de $\frac{1}{4}$ " cada 15cm en ambas direcciones, con un recubrimiento superior de 3cm. El esfuerzo de fluencia del refuerzo de acero en todos los casos es de 4200kg/cm^2 .
- Las vigas de concreto usadas de apoyo son de $0.20 \times 0.30\text{m}$, con refuerzo de acero longitudinal $4 \text{ } \varnothing \frac{1}{2}$ " y estribos de $\varnothing \frac{1}{4}$ " cada 15cm. El vaciado de las vigas se realizó al mismo tiempo que las losas para obtener un elemento monolítico.
- La placa colaborante está embebida en las vigas de concreto unos 5cm en cada extremo.



a) Apoyados sobre rodillos

b) Apoyados en vigas de concreto

Figura 3.1 Especímenes para el ensayo de flexión.

En la Tabla 3.1 y Tabla 3.2 se presentan listados de los especímenes para el tipo losa apoyada en rodillos y apoyada en vigas de concreto, respectivamente; las cuales muestran las características principales de los especímenes.

Tabla 3.1 Características de las losas apoyadas en rodillos.

ID	Perfil	Calibre	Luz libre m	Altura cm	Fecha de construcción	Fecha de ensayo
L-001	AD-900	22	2.76	10.05	07/08/06	11/09/06
L-002	AD-900	22	2.76	12.33	07/08/06	13/09/06
L-003	AD-900	22	2.76	13.40	07/08/06	13/09/06
L-004	AD-730	22	2.76	14.38	07/08/06	18/09/06
L-005	AD-730	22	2.76	16.88	07/08/06	15/09/06
L-006	AD-730	22	2.76	19.25	07/08/06	15/09/06
L-007	AD-600	22	2.76	11.23	11/08/06	18/09/06
L-008	AD-600	22	2.76	13.10	11/08/06	20/09/06
L-009	AD-600	22	2.76	14.45	11/08/06	20/09/06
L-010	AD-900	22	3.78	9.78	11/08/06	22/09/06
L-011	AD-900	22	3.78	12.40	11/08/06	22/09/06
L-012	AD-900	22	3.78	13.83	11/08/06	27/09/06
L-013	AD-730	22	3.78	14.15	15/08/06	27/09/06
L-014	AD-730	22	3.78	17.03	15/08/06	27/09/06
L-015	AD-730	22	3.78	19.03	15/08/06	25/09/06
L-016	AD-600	22	3.78	11.23	15/08/06	29/09/06
L-017	AD-600	22	3.78	12.65	15/08/06	29/09/06
L-018	AD-600	22	3.78	15.20	15/08/06	29/09/06
L-019	AD-900	20	2.76	10.25	18/08/06	02/10/06
L-020	AD-900	20	2.76	12.45	18/08/06	02/10/06
L-021	AD-900	20	2.76	14.28	18/08/06	02/10/06
L-022	AD-730	20	2.76	14.85	18/08/06	06/10/06
L-023	AD-730	20	2.76	17.60	18/08/06	06/10/06
L-024	AD-730	20	2.76	20.35	18/08/06	06/10/06
L-025	AD-600	20	2.76	11.40	25/08/06	04/10/06
L-026	AD-600	20	2.76	12.80	25/08/06	04/10/06
L-027	AD-600	20	2.76	14.48	25/08/06	04/10/06
L-028	AD-900	20	3.78	9.28	25/08/06	16/10/06
L-029	AD-900	20	3.78	12.03	25/08/06	13/10/06
L-030	AD-900	20	3.78	14.10	25/08/06	13/10/06
L-031	AD-730	20	3.78	13.60	28/08/06	13/10/06
L-032	AD-730	20	3.78	16.88	28/08/06	11/10/06
L-033	AD-730	20	3.78	20.23	28/08/06	11/10/06
L-034	AD-600	20	3.78	11.08	28/08/06	16/10/06
L-035	AD-600	20	3.78	12.83	28/08/06	16/10/06
L-036	AD-600	20	3.78	14.68	28/08/06	16/10/06

Tabla 3.2 Características de las losas apoyadas en vigas de concreto.

ID	Perfil	Calibre	Luz libre m	Altura cm	Fecha de construcción	Fecha de ensayo
L-037	AD-900	22	3.93	10.27	08/09/06	20/10/06
L-038	AD-900	22	3.93	14.27	08/09/06	18/10/06
L-039	AD-730	22	3.93	13.77	08/09/06	20/10/06
L-040	AD-730	22	3.93	19.90	08/09/06	20/10/06
L-041	AD-600	22	3.93	11.00	08/09/06	20/10/06
L-042	AD-600	22	3.93	14.17	08/09/06	18/10/06

Una etapa importante en esta investigación fue la construcción de los especímenes; la misma que se realizó teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

- Los especímenes se apoyaron en durmientes con un espaciamiento mínimo de 1m con la finalidad de evitar deflexiones previas al fraguado del concreto.
- Se eliminaron las impurezas de la superficie de acero con aire a presión, con la finalidad de permitir la adherencia natural entre el concreto y el acero; como se observa en la Foto 3.1.
- El concreto se preparó con una mezcladora eléctrica, como se observa en la Foto 3.2, siguiendo las especificaciones técnicas apropiadas, como el vibrado del concreto (Foto 3.3). Para verificar la resistencia a la compresión del concreto se realizaron ensayos de compresión axial a probetas extraídas en cada vaciado (3 por 1m³ en promedio).
- Se procuró en todo momento, mantener la horizontalidad de las losas; desde el apoyo de la placa colaborante hasta el acabado de la superficie de la losa, como se aprecia en la Foto 3.4. Con el propósito de transmitir las cargas de manera uniforme al momento del ensayo.
- Se aplicó un curado químico a las losas, como se observa en la Foto 3.5, creando una película impermeabilizante en la superficie del concreto para evitar la pérdida de humedad durante su endurecimiento.
- El transporte de las losas se realizaron de manera cuidadosa a fin de evitar el desprendimiento de la lámina de acero del concreto por esfuerzos producidos por un mal izamiento de los especímenes., como se observa en la Foto 3.6.

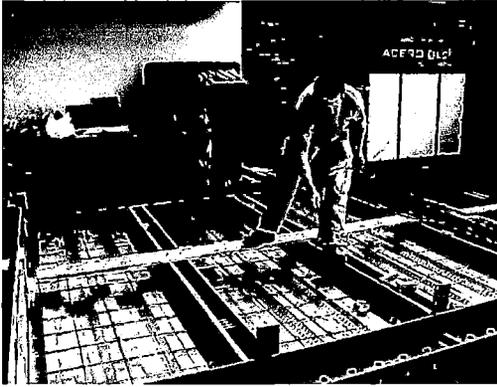


Foto 3.1 Limpieza de espécimen.

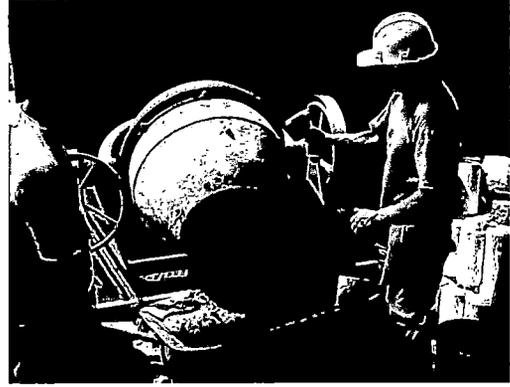


Foto 3.2 Preparación del concreto.



Foto 3.3 Vaciado del concreto.

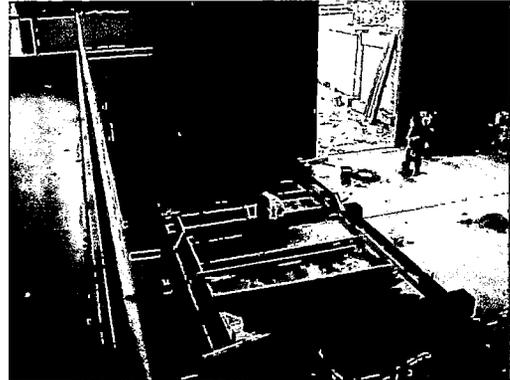


Foto 3.4 Acabado de la superficie.

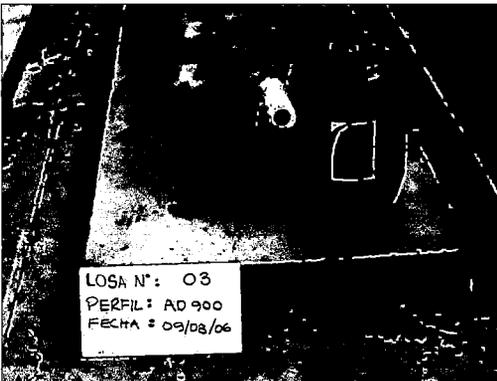


Foto 3.5 Curado químico.

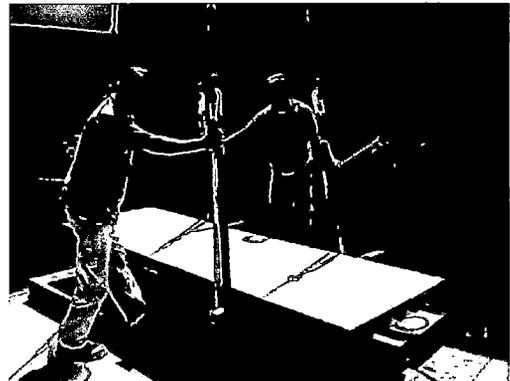


Foto 3.6 Traslado de los especímenes.

3.1.2. Metodología del Ensayo

3.1.2.1. Descripción

De acuerdo a las especificaciones para sistemas de entrepiso se han desarrollado ensayos de flexión estática siguiendo las especificaciones ASTM C78 "Método Experimental Normalizado de la Resistencia a la Flexión en Concreto (Usando una Viga Simple con Carga en los Tercios)". La carga se aplicó a través de un gato hidráulico sujeto a un riel que transfiere la carga a dos puntos en los tercios de la luz en las losas con placa colaborante [8], como se muestra en la Foto 3.7.

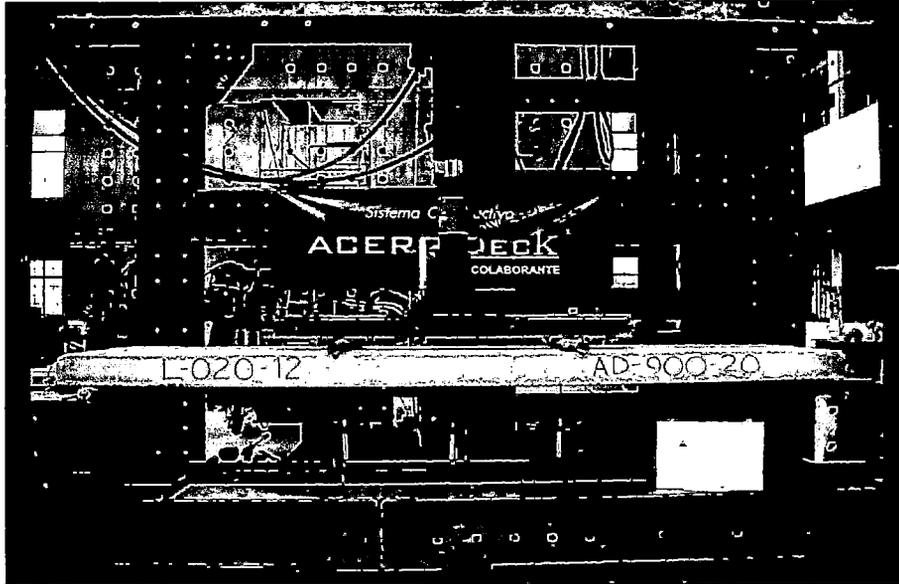


Foto 3.7 Ensayo de flexión en losas con placa colaborante.

En general, el espécimen fue apoyado sobre rodillos ubicados en los extremos a una distancia indicada como la luz libre para el caso de losas simplemente apoyadas; y sobre vigas de concreto para el caso de losas apoyadas sobre vigas de concreto.

3.1.2.2. Equipos y Sistema de Medición

Para la realización de este ensayo se montó un aparato de carga con un gato hidráulico de 50t de capacidad de carga; el cual se controla por válvulas que regulan la velocidad de carga mediante el incremento de la presión.

Para la medición de la respuesta del espécimen se utilizó una celda de carga montada sobre el gato hidráulico, y un sistema de 11 transductores de desplazamiento y 3 ó 4 medidores de deformación unitaria (strain gage), los cuales fueron ubicados estratégicamente para medir la respuesta del espécimen frente a la demanda de carga incremental durante el ensayo.

Cada sensor fue conectado a un amplificador dinámico de señales que elevó la señal de estos a los niveles requeridos para ser transformados en un convertidor análogo-digital Kyowa que introdujo las señales en la computadora, a través de una caja conectora, para ser registradas y almacenadas. La disposición de estos equipos son mostrados en la Foto 3.8.

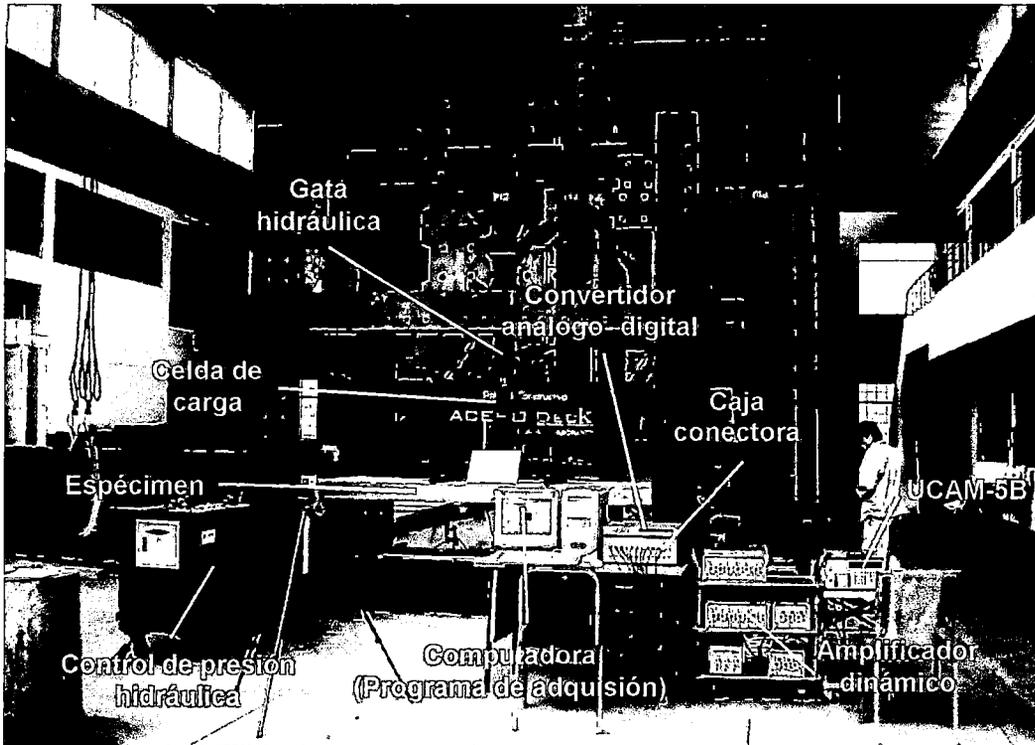


Foto 3.8 Disposición de los equipos para el ensayo de flexión.

3.1.2.3. Registro de Ensayos

Al instante que la señal registrada por los equipos es introducida en la computadora, el programa *Kyowa2006Mii* (Figura 3.2), desarrollado en el paquete *LabView* en el lenguaje G, convierte la señal y la almacena en una base de datos.

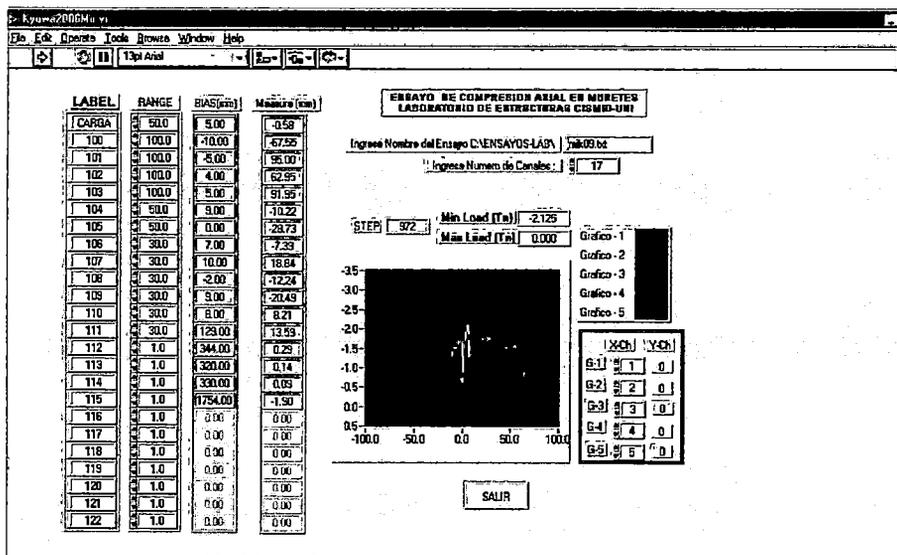
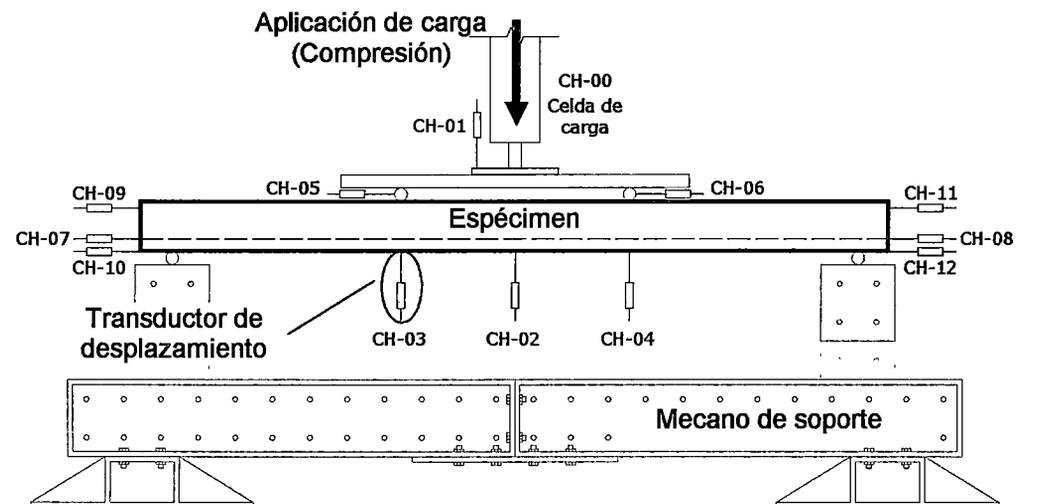


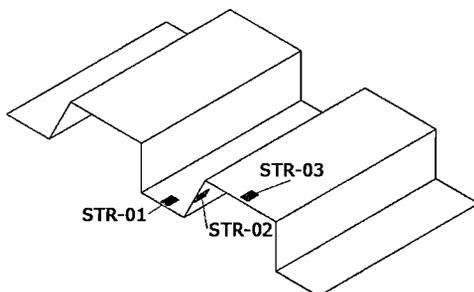
Figura 3.2 Programa de cómputo utilizado en los experimentos.

Los datos almacenados corresponden a la celda de carga, los transductores y *strain gages*; los cuales están ordenados de acuerdo a la disposición del sistema de medición establecida previamente, como se indica en la Tabla 3.3.

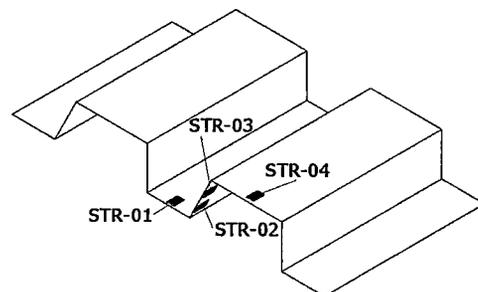
En la Figura 3.3a se muestra la disposición de los transductores. En el caso de los *strain gages*, la disposición dependía de la cantidad de muescas. Todos los *strain gages* fueron colocados en el centro de la luz y en el eje longitudinal de la losa: uno en el fondo del valle, uno en el tope del valle, y en las muescas, dependiendo del perfil (Figura 3.3b,c).



a) Ubicación de transductores desplazamientos (CH).



b) Strain gages para perfiles
 AD-900 & AD-600.



c) Strain gages para perfiles
 AD-730.

Figura 3.3 Disposición del sistema de medición para el ensayo de flexión.

Tabla 3.3 Ubicación de los canales de adquisición de datos.

Canal	Descripción
CH - 00	Celda de carga
CH - 01	Transductor vertical superior centro
CH - 02	Transductor vertical inferior centro
CH - 03	Transductor vertical inferior tercio izquierdo
CH - 04	Transductor vertical inferior tercio derecho
CH - 05	Transductor horizontal izquierdo
CH - 06	Transductor horizontal derecho
CH - 07	Transductor lateral central izquierdo
CH - 08	Transductor lateral central derecho
CH - 09	Transductor lateral superior izquierdo
CH - 10	Transductor lateral inferior izquierdo
CH - 11	Transductor lateral superior derecho
CH - 12	Transductor lateral inferior derecho
STR - 01, 02, 03 y 04	Strain gage sobre placa colaborante

3.1.3. Resultados

El incremento de la carga se realizó de tal forma que se llegará a la falla última de la losa, sobrepasando la etapa de desprendimiento de la placa colaborante del concreto. En la Foto 3.9 se muestra el espécimen al finalizar el ensayo.



Foto 3.9 Ensayo de flexión en losas con placa colaborante

A continuación se presentan las curvas carga-desplazamiento central de las losas simplemente apoyadas:

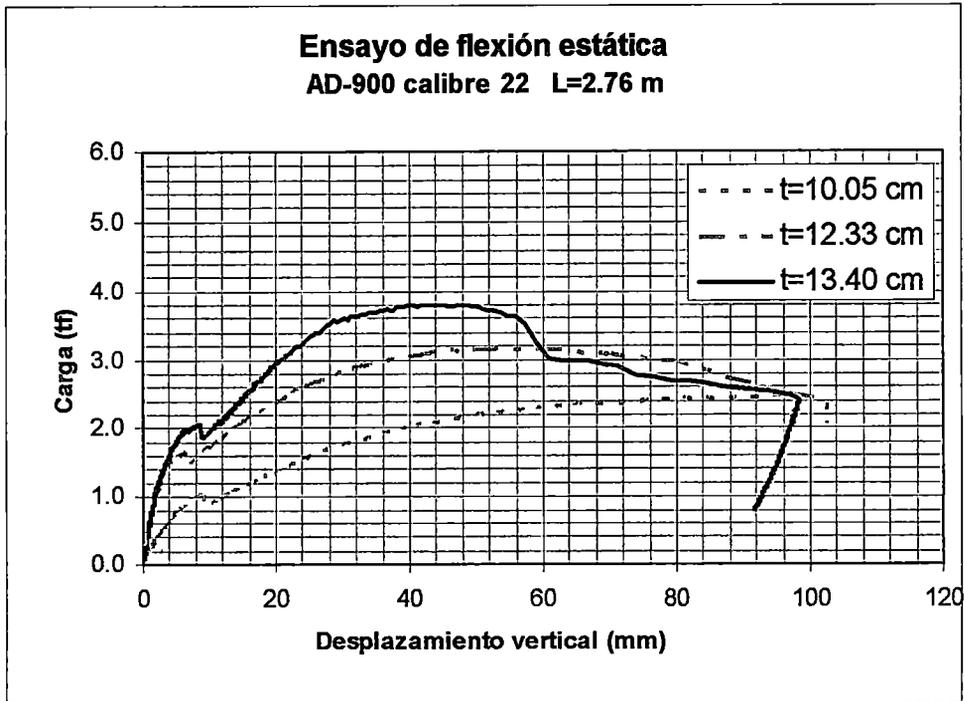


Figura 3.4 Ensayo de flexión estática en especímenes L-001, L-002 y L-003 de alturas 10.05, 12.33 y 13.40cm; respectivamente.

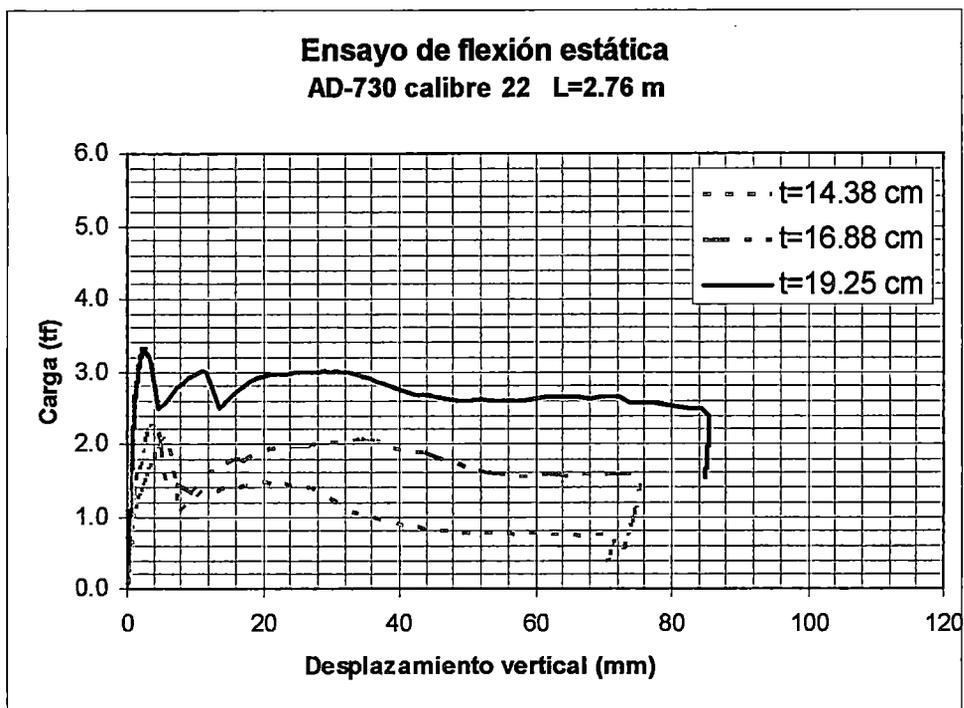


Figura 3.5 Ensayo de flexión estática en especímenes L-004, L-005 y L-006 de alturas 14.38, 16.88 y 19.25cm; respectivamente.

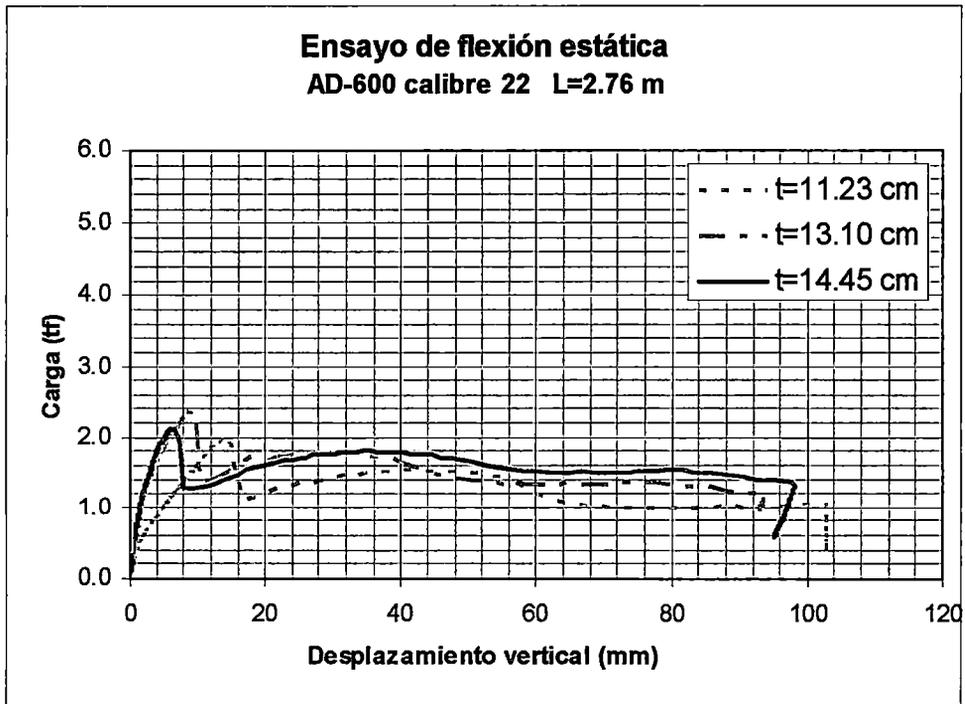


Figura 3.6 Ensayo de flexión en especímenes L-007, L-008 y L-009 de alturas 11.23, 13.10 y 14.45cm; respectivamente.

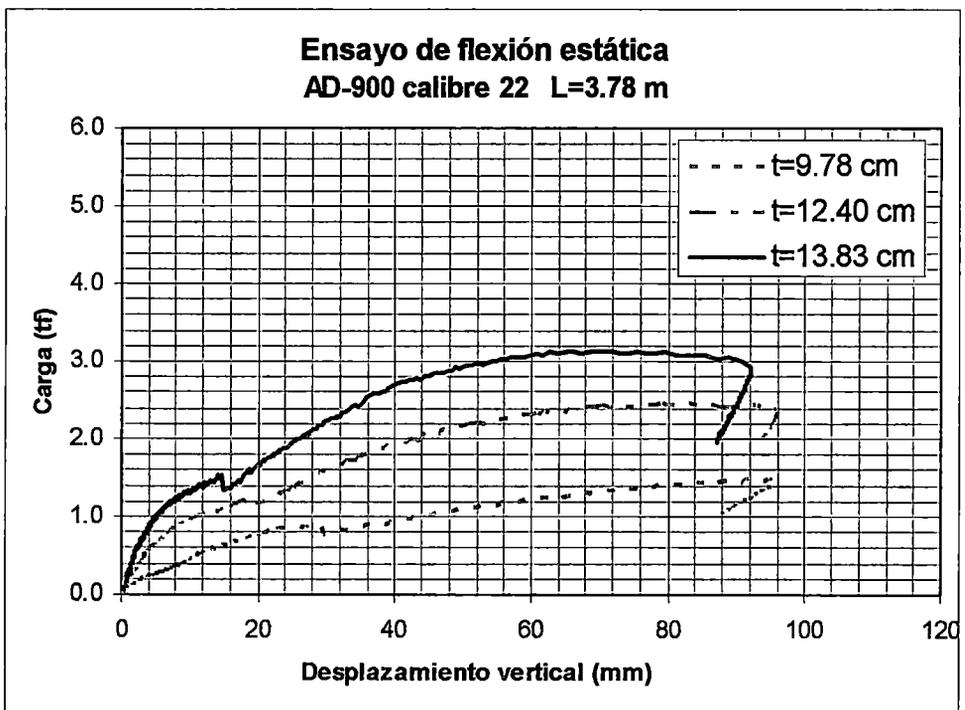


Figura 3.7 Ensayo de flexión en especímenes L-010, L-011 y L-012 de alturas 9.78, 12.40 y 13.83cm; respectivamente.

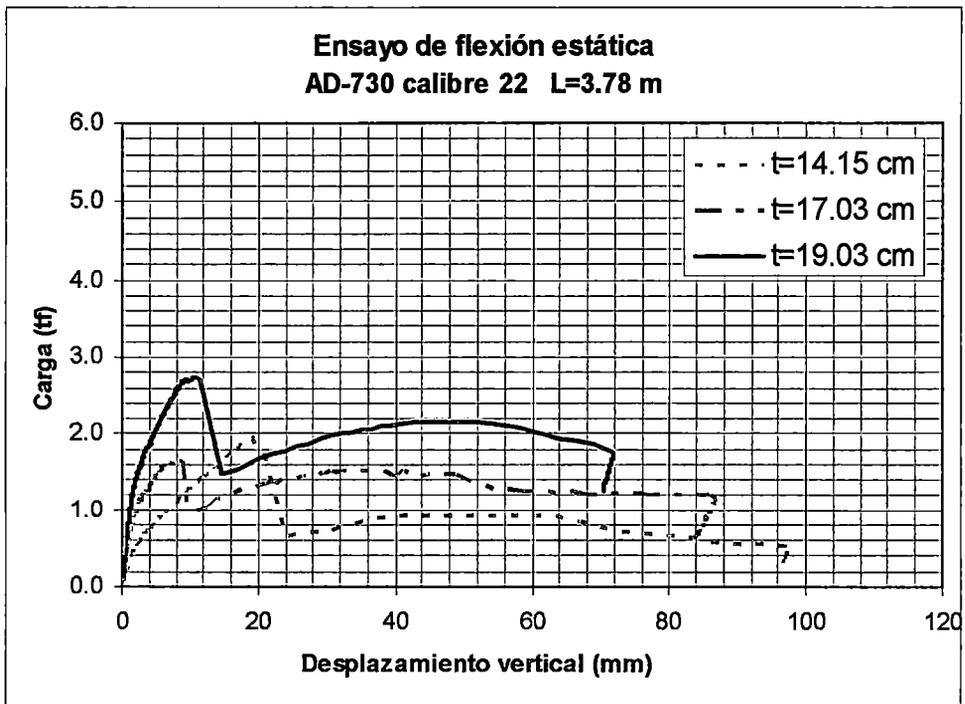


Figura 3.8 Ensayo de flexión en especímenes L-013, L-014 y L-015 de alturas 14.15, 17.03 y 19.03cm; respectivamente.

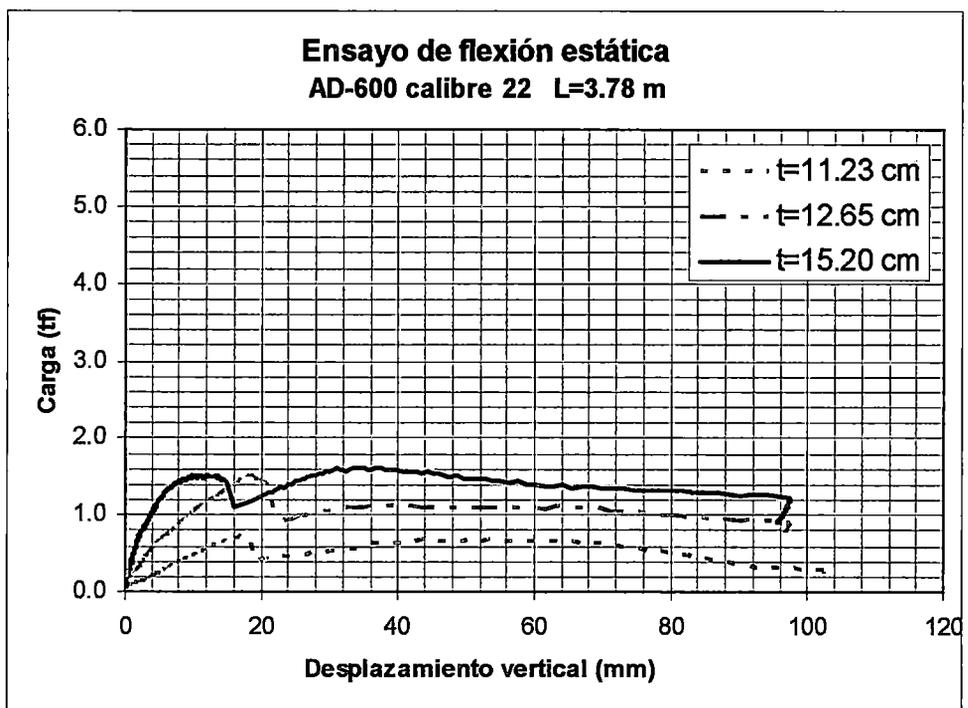


Figura 3.9 Ensayo de flexión en especímenes L-016, L-017 y L-018 de alturas 11.23, 12.65 y 15.20cm; respectivamente.

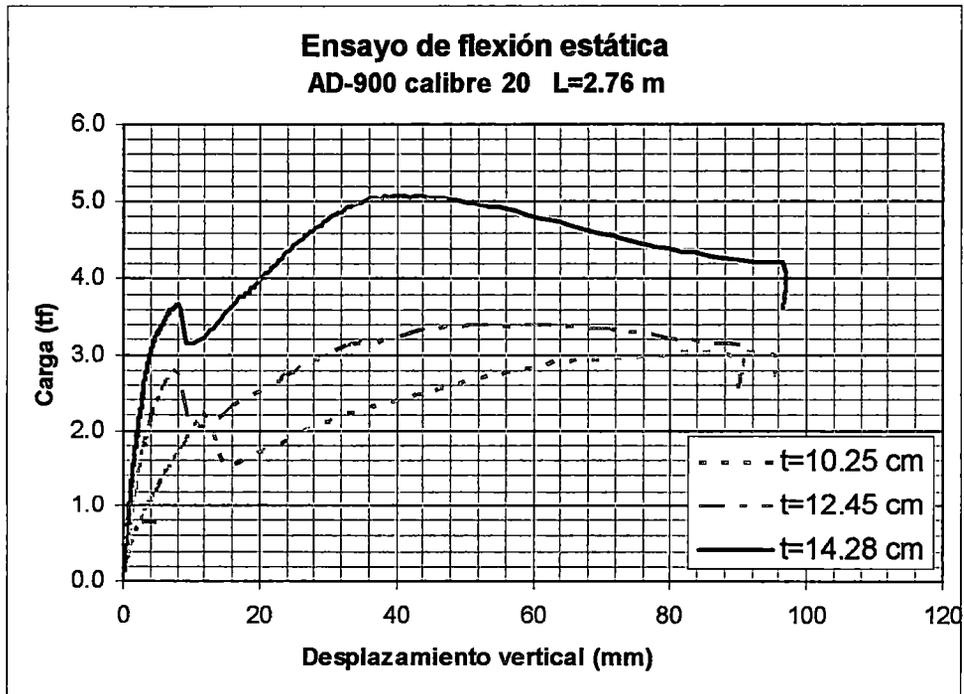


Figura 3.10 Ensayo de flexión en especímenes L-019, L-020 y L-021 de alturas 10.25, 12.45 y 14.28cm; respectivamente.

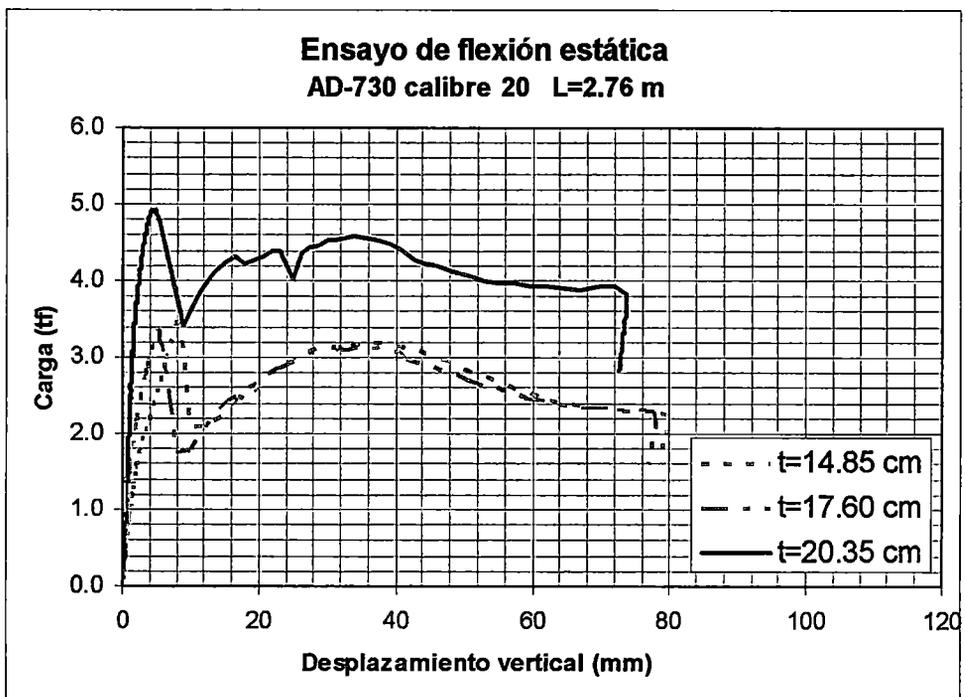


Figura 3.11 Ensayo de flexión en especímenes L-022, L-023 y L-024 de alturas 14.85, 17.60 y 20.35cm; respectivamente.

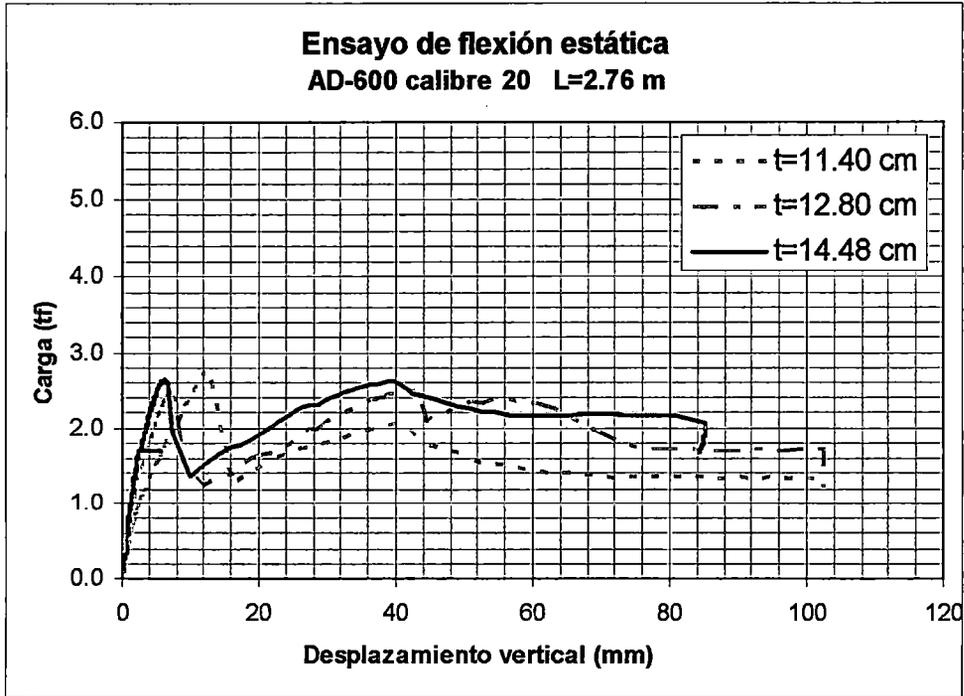


Figura 3.12 Ensayo de flexión en especímenes L-025, L-026 y L-027 de alturas 11.40, 12.80 y 14.48cm; respectivamente.

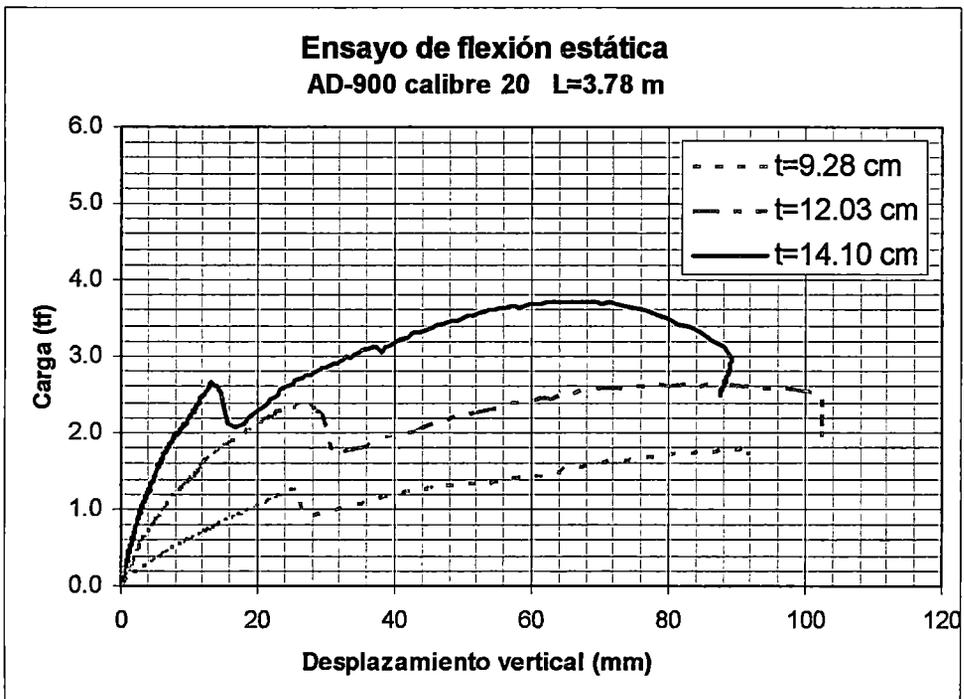


Figura 3.13 Ensayo de flexión en especímenes L-028, L-029 y L-030 de alturas 9.28, 12.03 y 14.10cm; respectivamente.

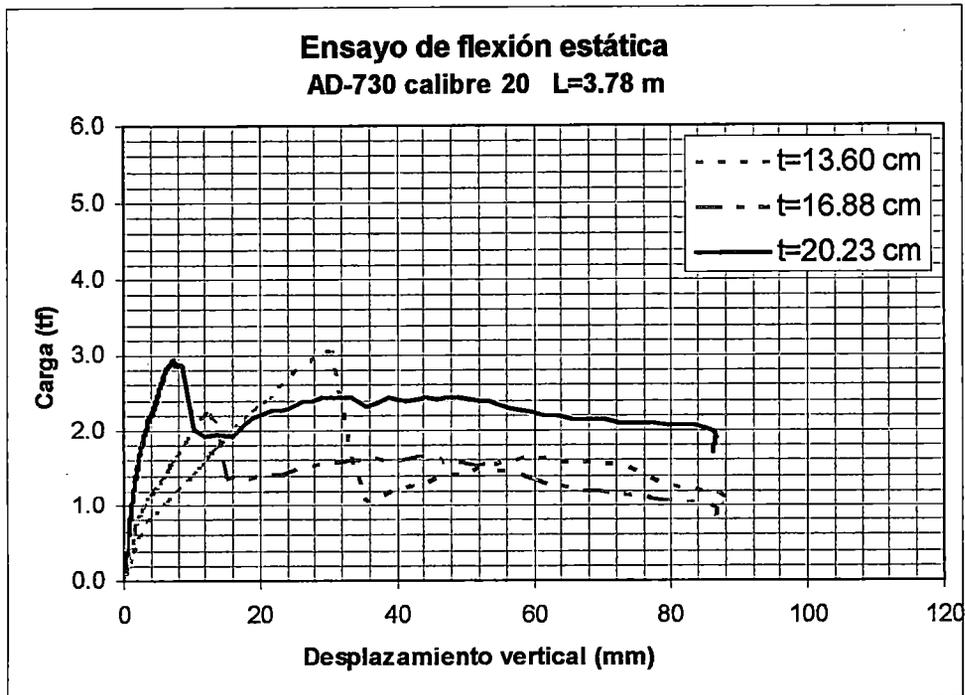


Figura 3.14 Ensayo de flexión en especímenes L-031, L-032 y L-033 de alturas 13.60, 16.88 y 20.23cm; respectivamente.

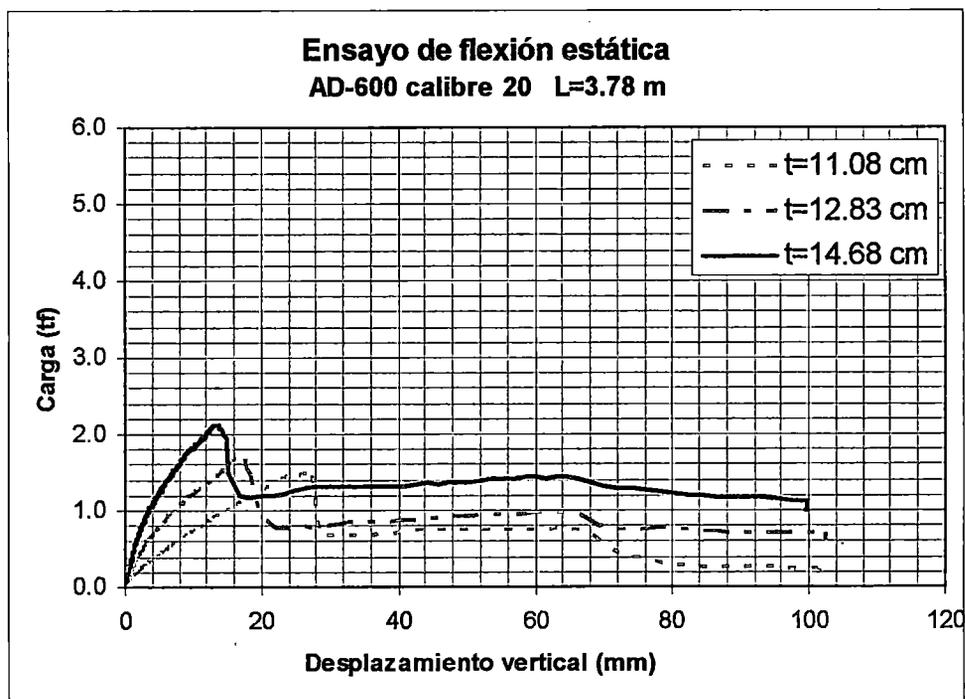


Figura 3.15 Ensayo de flexión en especímenes L-034, L-035 y L-036 de alturas 11.08, 12.83 y 14.68cm; respectivamente.

Las curvas carga-desplazamiento central de las losas apoyadas sobre vigas de concreto se muestran a continuación:

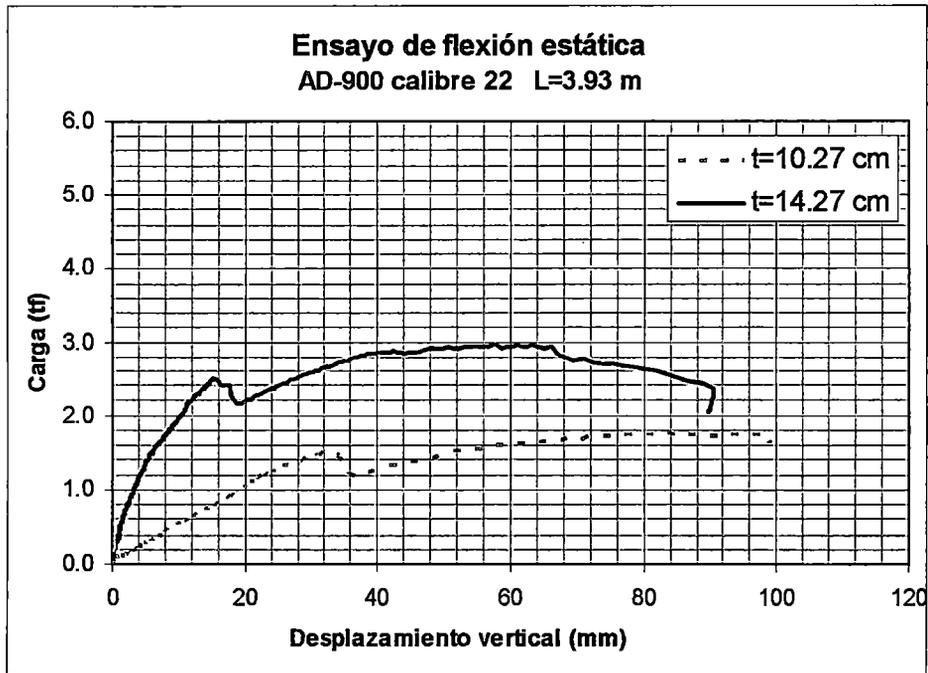


Figura 3.16 Ensayo de flexión en especímenes L-037 y L-038 de alturas 10.27 y 14.27cm; respectivamente.

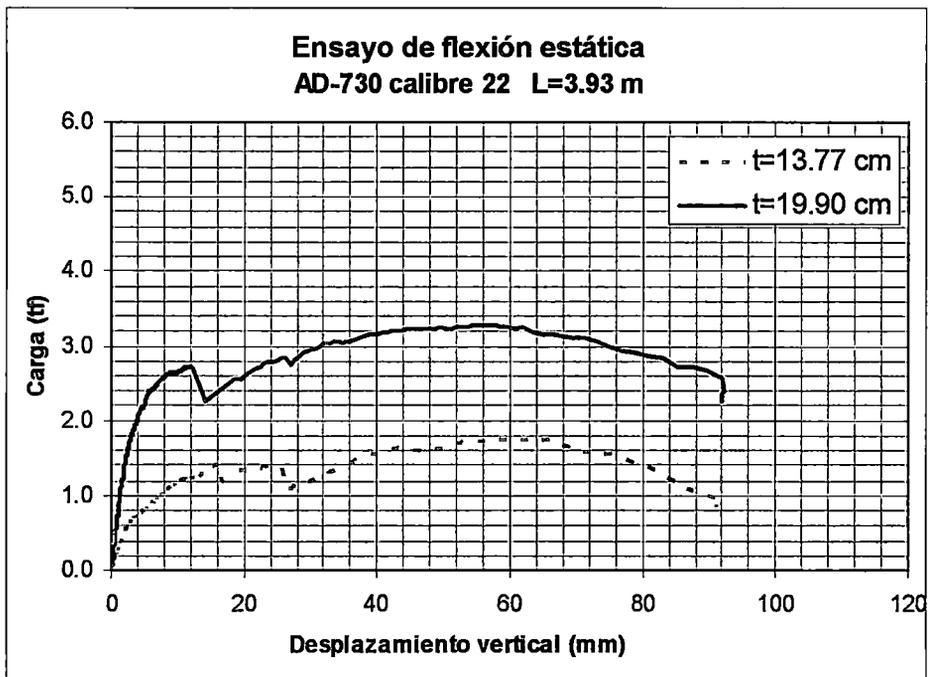


Figura 3.17 Ensayo de flexión en especímenes L-039 y L-040 de alturas 13.77 y 19.90cm; respectivamente.

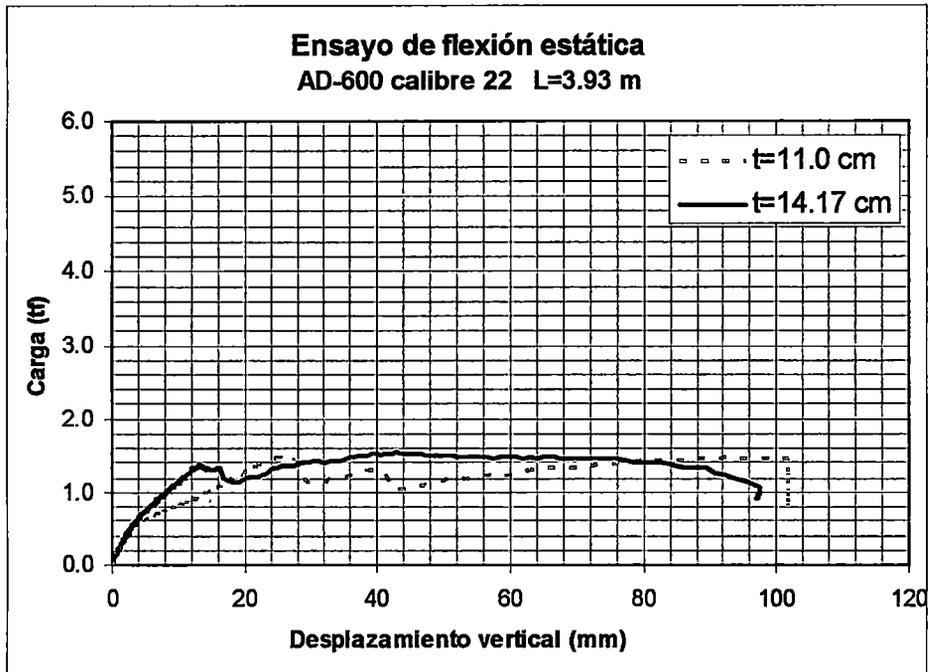


Figura 3.18 Ensayo de flexión en especímenes L-041 y L-042 de alturas 11.00 y 14.17cm; respectivamente.

3.2. Ensayo de Adherencia

El ensayo de adherencia, también conocido como ensayo de *pull-out*, es un experimento reducido que sirve para determinar la resistencia de adherencia al corte en la interfase del concreto y la lámina de acero.

A partir de resultados experimentales, (Daniels, 1988) se desarrolló una probeta de concreto y placa colaborante, así como las ecuaciones para determinar las fuerzas de cortante en la interfase entre el concreto y la lámina de acero, los cuales son bastante aceptados universalmente (Schumacher et al, 2000, Crisinel et al, 1999) [11].

3.2.1. Especímenes

Para el ensayo de *pull-out* se diseñaron especímenes basados en la probeta desarrollada por Byron J. Daniels, el cual consiste en dos pequeñas porciones de losa compuesta, concretamente dos nervios, encarados por la parte inferior de la placa colaborante a una lámina de acero, que sirve de elemento de enlace y rigidización, debido a que los espesores de la placa colaborante usados en esta investigación son menores que 1mm, como se muestra en la Figura 3.19

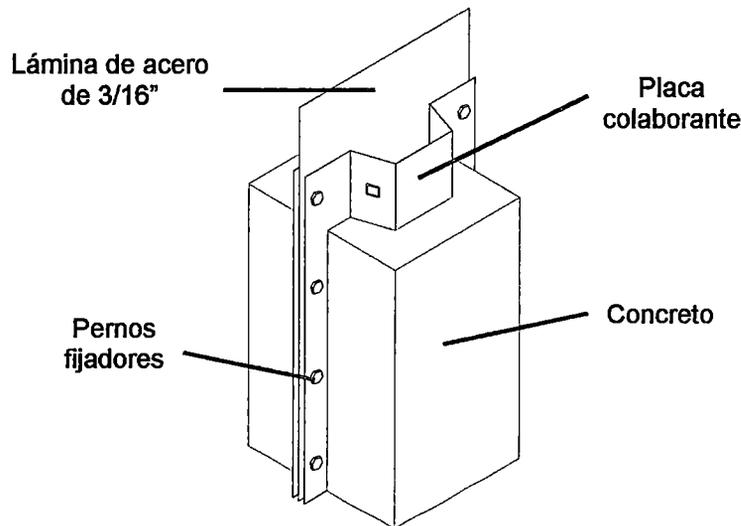


Figura 3.19 Diseño de especímenes para el ensayo de adherencia.

Los especímenes para el ensayo de adherencia fueron construidos en un solo grupo de 9 especímenes. Las características con las que se diseñaron las probetas fueron las siguientes:

- La altura, espesor y ancho de concreto, calibre de placa colaborante son descritas en la Tabla 3.4.
- El ancho y altura de la probeta está en relación 1:2, aproximadamente.
- El concreto de todas las losas tiene una resistencia nominal a la compresión de 210kg/cm^2 y un diseño de mezcla en volumen de 1:2:4:3 con relación agua/cemento de 0.65. La calidad de concreto se verificó mediante ensayos de compresión axial, como se indica en la Tabla 3.6 (Sección 3.3.1).
- Los especímenes no llevan acero de refuerzo.
- La lámina rigidizadora de enlace de las placas colaborantes es de acero ASTM A36 "Especificación Normalizada para Acero al Carbono Estructural" [4], con un espesor de 3/16". Fijados con pernos ASTM A325 "Especificación Normalizada para Pernos Estructurales, Acero, Tratados en Caliente, Mínima Resistencia la Tracción 120/105 ksi" [3] con un diámetro de 3/8".

En la Tabla 3.4 se presenta un listado de los especímenes para el ensayo de *pull-out*, el cual comprende las principales características de los especímenes, tales como el tipo de perfil y espesor de la placa colaborante; largo, ancho y altura del concreto; y la fecha de construcción.

Tabla 3.4 Características de las probetas para el ensayo de *pull-out*.

ID	Perfil	Calibre	Largo cm	Ancho cm	Altura cm	Fecha de construcción
PO-01	AD-900	22	30.00	15.00	12.00	18/08/07
PO-02	AD-900	22	30.00	15.00	12.00	18/08/07
PO-03	AD-900	22	30.00	15.00	12.00	18/08/07
PO-04	AD-600	22	45.00	22.70	13.00	18/08/07
PO-05	AD-600	22	45.00	22.70	13.00	18/08/07
PO-06	AD-600	22	45.00	22.70	13.00	18/08/07
PO-07	AD-730	22	60.00	31.70	17.00	18/08/07
PO-08	AD-730	22	60.00	31.70	17.00	18/08/07
PO-09	AD-730	22	60.00	31.70	17.00	18/08/07

Durante la construcción de las probetas se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones:

- Se eliminaron las impurezas de la superficie de la placa colaborante (Foto 3.10) con el objeto de permitir la adherencia natural entre el concreto y el acero.
- Se tuvo especial cuidado en mantener la horizontalidad y verticalidad durante la construcción de los especímenes desde el encofrado (Foto 3.11) hasta el vaciado (Foto 3.12), con el objeto de transmitir las cargas de manera equitativa al momento de ser ensayadas. Al igual que la base, el encofrado se forro con plástico para facilitar el desencofrado y evitar el desprendimiento entre concreto y placa colaborante.
- El concreto se preparó con una mezcladora eléctrica, siguiendo las especificaciones técnicas apropiadas, como el vibrado del concreto por capas. Para verificar la resistencia a la compresión del concreto se realizaron ensayos de compresión axial a 6 probetas extraídas en durante el vaciado (Foto 3.13).
- Se aplicó un curado químico a las losas, creando una película impermeabilizante en la superficie del concreto para evitar la pérdida de humedad durante su endurecimiento.
- El desencofrado y transporte de las probetas se realizó de manera cuidadosa, a fin de evitar el desprendimiento de la plancha de acero del concreto por esfuerzos producidos por un mal izamiento de los especímenes.

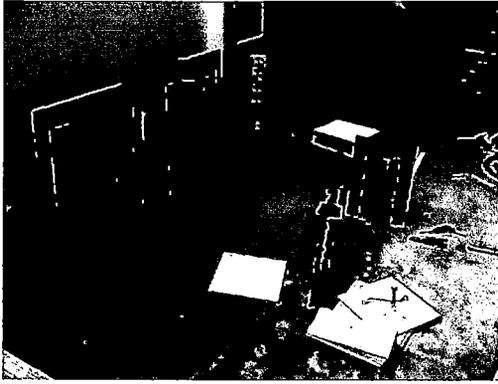


Foto 3.10 Disposición de especímenes.

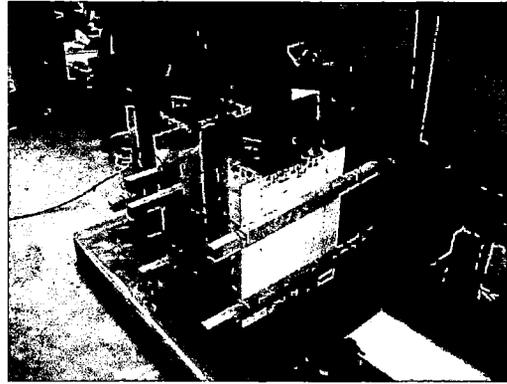


Foto 3.11 Encofrado de especímenes.

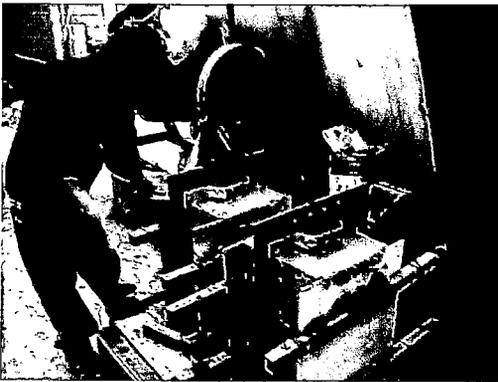


Foto 3.12 Vaciado del concreto.



Foto 3.13 Vaciado de especímenes.

3.2.2. Metodología del Ensayo

3.2.2.1. Descripción

De acuerdo a la investigación desarrollada por Daniels se han desarrollado ensayos de *pull-out* siguiendo sus recomendaciones. La carga de tracción se aplicó a través de un gato hidráulico sujeto a una plancha de acero con una conexión diseñada para ajustarse con pernos a la lámina rigidizadora de acero que transfiere la carga a la sección de la placa colaborante por su extremo superior, produciendo un esfuerzo de cizalladura entre la placa colaborante y el concreto al momento que el gato comience a tirar; el concreto se encuentra fijado en la parte superior por vigas rígidas de acero; como se muestra en la Foto 3.14.

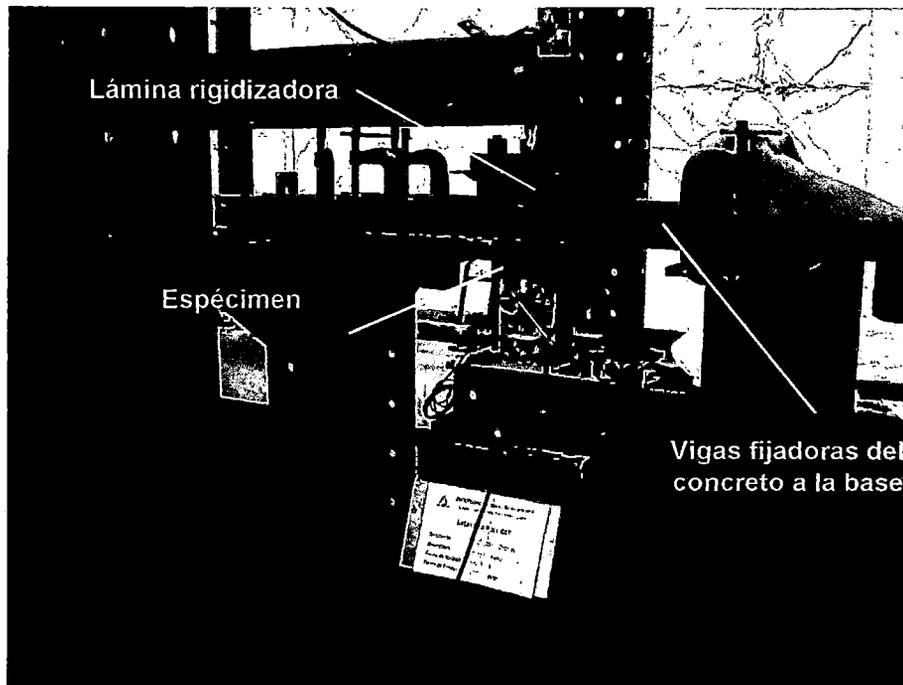


Foto 3.14 Probeta para el ensayo de adherencia.

3.2.2.2. Equipos y Sistema de Medición

Para la realización de este ensayo se montó un aparato de carga con un gato hidráulico de 50t de capacidad de carga; el cual se controla por válvulas que regulan la velocidad de carga mediante el incremento de la presión.

Para la medición de la respuesta del espécimen se utilizó una celda de carga montada sobre el gato hidráulico, y un sistema de 2 transductores de desplazamiento, los cuales fueron ubicados estratégicamente para medir la respuesta del espécimen frente a la demanda de carga incremental durante el ensayo.

Cada sensor fue conectado a un amplificador dinámico de señales que elevó la señal de estos a los niveles requeridos para ser transformados en un convertidor análogo-digital Kyowa que introdujo las señales en la computadora, a través de una caja conectora, para ser registradas y almacenadas. A excepción de los transductores, la disposición del resto de los equipos es similar a la mostrada en la Foto 3.8.

3.2.2.3. Registro de Ensayos

Al igual que el ensayo de flexión, los datos obtenidos en los ensayos fueron registrados por programa *Kyowa2006Mii* (Figura 3.2).

Los datos almacenados corresponden a la celda de carga y los transductores; los cuales están ordenados de acuerdo a la disposición del sistema de medición establecida previamente, como se muestran en la Figura 3.20 y se describen en la Tabla 3.5.

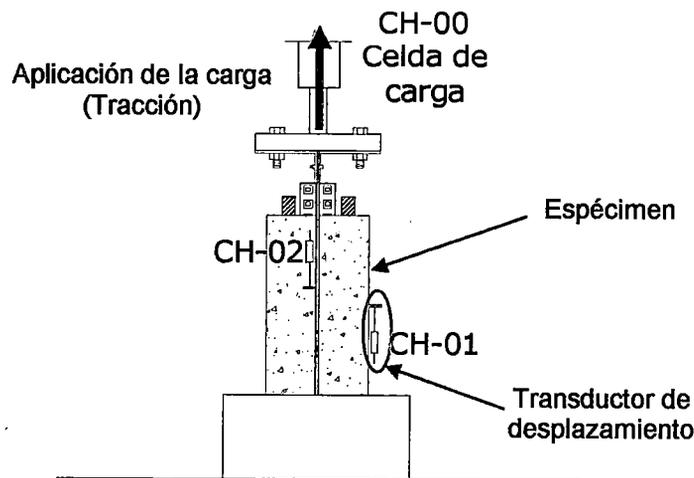


Figura 3.20 Disposición del sistema de medición para el ensayo de adherencia.

Tabla 3.5 Ubicación de los canales de adquisición de datos.

Canal	Descripción
CH - 00	Celda de carga
CH - 01	transductor vertical en el concreto
CH - 02	transductor vertical en el acero

3.2.3. Resultados

El incremento de la carga se realizó de tal forma que la placa colaborante deslizó por completo del concreto, como se observa en la Foto 3.15. En la Figura 3.21, Figura 3.22 y Figura 3.23; se muestra la curva de carga-deslizamiento producida en los ensayos de adherencia para los perfiles AD-900, AD-600 y AD-730, respectivamente.

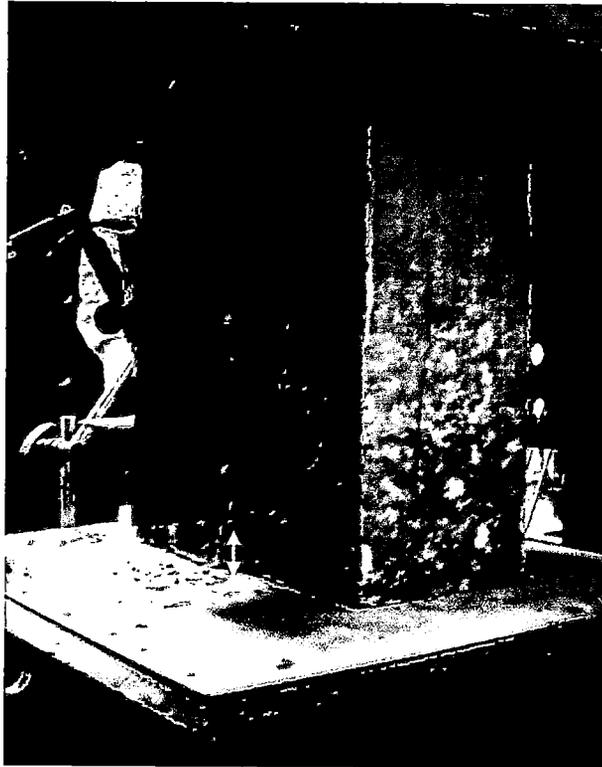


Foto 3.15 Probeta de pull-out al finalizar el ensayo.

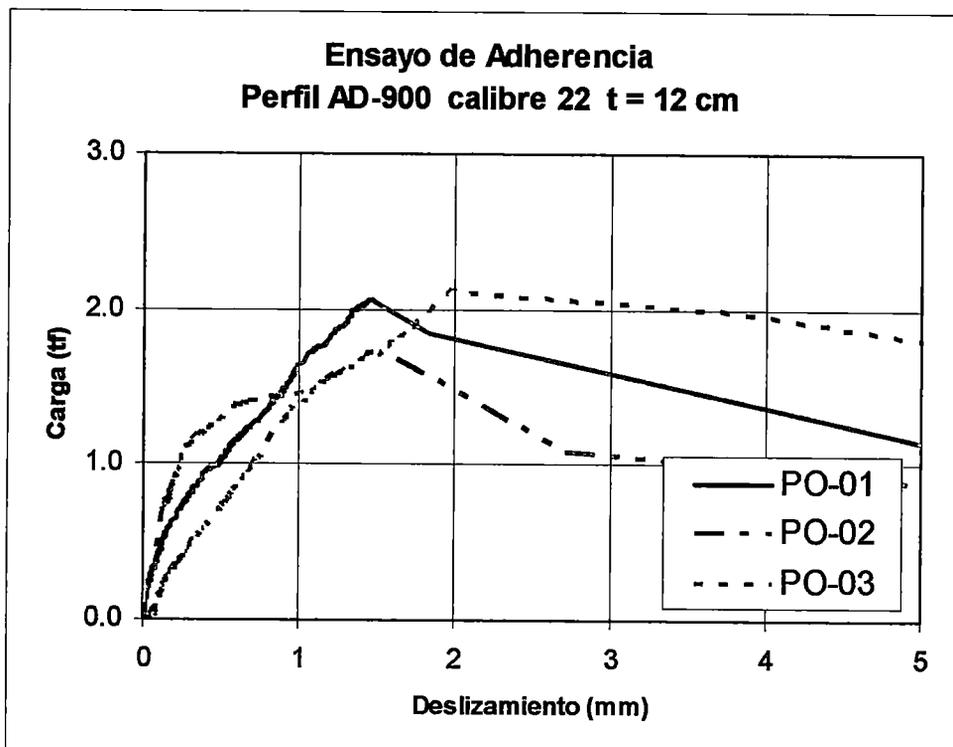


Figura 3.21 Ensayo de adherencia en perfil AD-900 calibre 22.

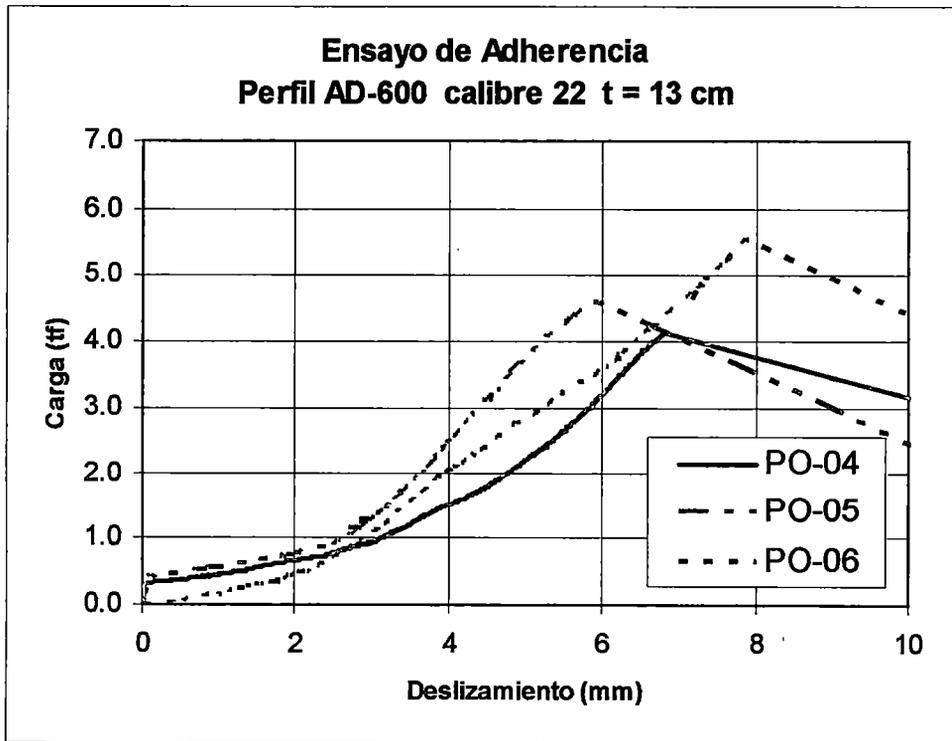


Figura 3.22 Ensayo de adherencia en perfil AD-600 calibre 22.

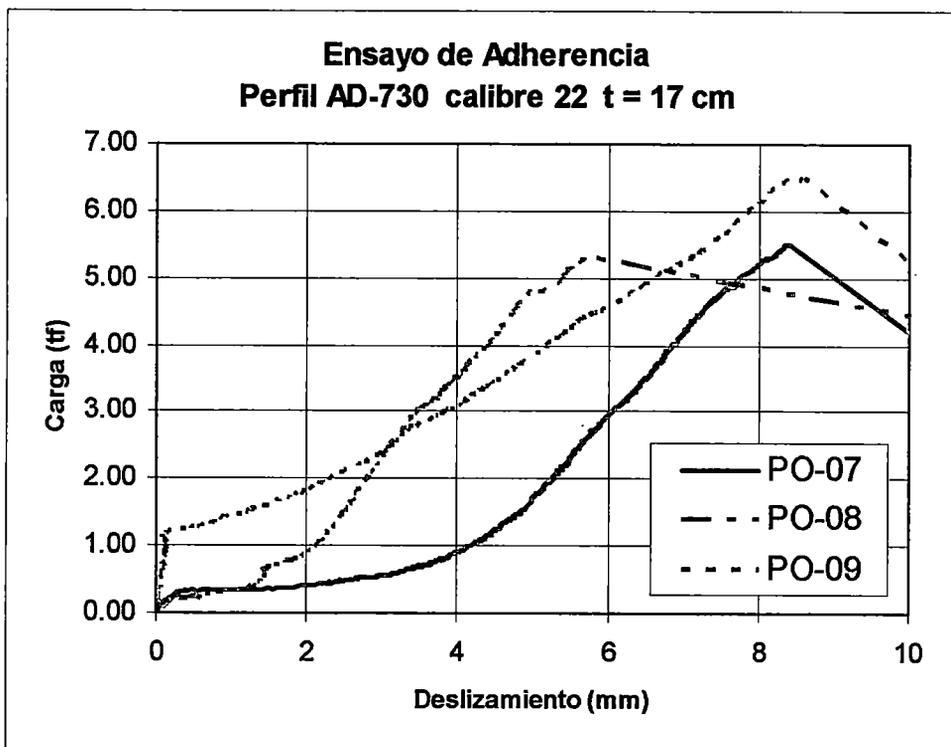


Figura 3.23 Ensayo de adherencia en perfil AD-730 calibre 22.

3.3. Prueba de los Materiales

3.3.1. Concreto

La resistencia a compresión del concreto se determinó mediante los ensayos de compresión axial, de las probetas extraídas durante cada vaciado, como se observa en la Foto 3.16. El ensayo de compresión se realizó en el Laboratorio de Estructuras del CISMID, siguiendo las especificaciones ASTM C39 "Método de Ensayo Normalizado para Resistencia a la Compresión de Especímenes Cilíndricos de Concreto" [9], como se muestra en la Foto 3.17.

En la Tabla 3.6 se muestran los resultados del ensayo de compresión axial a los 28 días de las probetas extraídas, y su correspondiente espécimen y tipo de ensayo.

Tabla 3.6 Resultados de los ensayos de compresión axial.

Tipo de ensayo	Especímenes	f'_c Kg/cm ²
Ensayo de flexión	L-001 L-006	271
Ensayo de flexión	L-007 L-009	256
Ensayo de flexión	L-010 L-012	270
Ensayo de flexión	L-013 L -018	240
Ensayo de flexión	L-019 L-024	247
Ensayo de flexión	L-025 L-030	256
Ensayo de flexión	L-031 L-036	267
Ensayo de flexión (apoyados en vigas de concreto)	L-037 L-042	252
Ensayo de adherencia	PO-01 PO-09	293



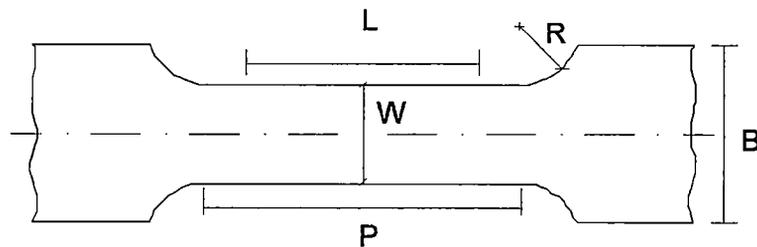
Foto 3.16 Extracción de probetas



Foto 3.17 Ensayo de compresión

3.3.2. Acero

Las muestras fueron extraídas de las bobinas de acero, con las cuales se fabrican las placas colaborantes que fueron usados para llevar a cabo esta investigación. La prueba de tracción se realizó en una máquina universal, mostrada en la Foto 3.18, en el Laboratorio de ensayo de Materiales de la Facultad de Ingeniería Civil; basándose en los Estándares Industriales Japoneses, "JIS Z2201-1998 Fabricación de muestras para ensayos de tracción de materiales metálicos", como se indica en la Figura 3.24 [12].



Ancho (W)	Longitud (L)	Longitud paralela (P)	Radio (R)	Ancho (B)
25 mm	50 mm	> 60 mm	> 15 mm	50 – 60 mm

Figura 3.24 Geometría de la muestra de acero para la prueba de tracción.

Con el objeto de medir las elongaciones se dispusieron *strain gages* en la parte central del espécimen, como se muestra en la Foto 3.19.

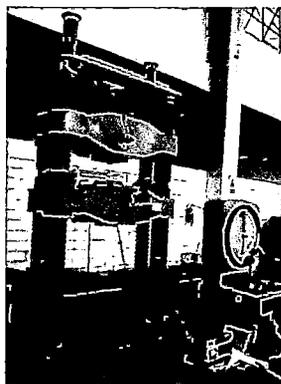


Foto 3.18 Máquina universal.

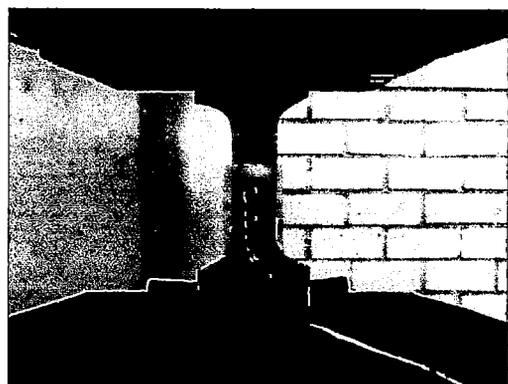


Foto 3.19 Ensayo de tracción.

Los resultados de los especímenes ensayados (Foto 3.20) son resumidos en la Tabla 3.7, de la cual se obtienen que el esfuerzo de fluencia, esfuerzo de rotura y elongación promedios del acero usado son 3558kg/cm², 4119kg/cm² y 26.5%, respectivamente. Considerando un módulo de elasticidad de 2.074x10⁶kg/cm².

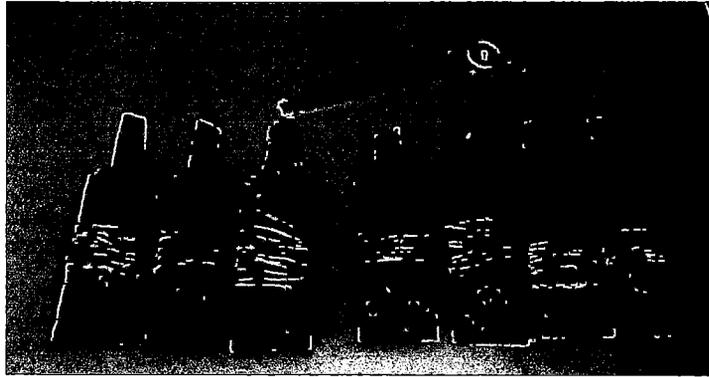


Foto 3.20 Muestras de acero después del ensayo.

Tabla 3.7 Resultados de los ensayos de tracción.

ID	Espesor mm	Esfuerzo rotura Kg/cm ²	Esfuerzo fluencia kg/cm ²	Elongación %
Muestra 1	0.749	4213	3413	26
Muestra 2	0.749	4160	3787	24
Muestra 3	0.749	3947	3467	26
Muestra 4	0.909	4044	3560	24
Muestra 5	0.909	4044	3560	26
Muestra 6	0.909	4308	3560	32

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Este capítulo está basado en el análisis de los resultados de los experimentos detallados en el capítulo anterior, y en la obtención de algunos parámetros útiles para el desarrollo de un modelo numérico para este tipo de losas.

4.1. Del Ensayo de Flexión

De los ensayos de flexión llevados a cabo en esta investigación, puede generalizarse un comportamiento típico ante un incremento gradual de la carga; el cual es representado gráficamente en la curva mostrada en la Figura 4.1.

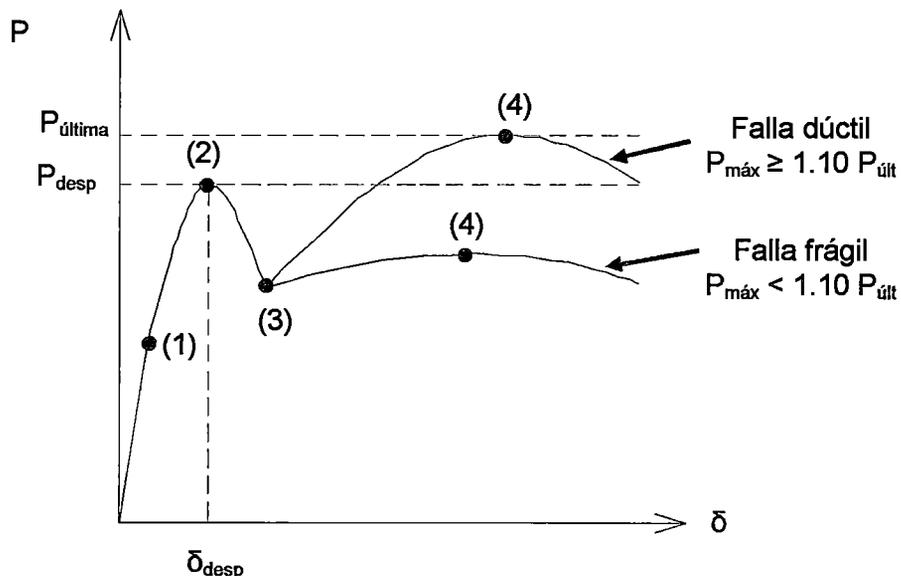


Figura 4.1 Comportamiento típico de las losas con placa colaborante.

A continuación se describen las etapas diferenciadas en los ensayos de flexión llevados a cabo en esta investigación:

1. Inicio del agrietamiento del concreto en la zona de tracción. Este agrietamiento del concreto en la zona de contacto con la placa colaborante es la que produce la disminución de la adherencia entre ambos.
2. Inicio del desprendimiento de la placa colaborante del concreto. Se inicia el deslizamiento entre el concreto y la placa colaborante, originando la pérdida irreversible de una conexión total entre ambos, dando paso a una conexión parcial hasta la pérdida total de la adherencia mecánica entre ambos.

3. Desprendimiento total de la losa de concreto de la placa colaborante. En este instante la losa deja de ser compuesta, convirtiéndose en la suma en paralelo de una lámina de acero que pudo o no haber iniciado su estado de fluencia y una losa de concreto parcialmente agrietada en la zona de tracción.
4. Resistencia última de la losa. Dependiendo del tipo de acero de la placa colaborante, si este ha alcanzado su estado de fluencia o no, este sistema puede tener una resistencia última mayor a la resistencia de desprendimiento (comportamiento dúctil) o no (comportamiento frágil).

A partir de las curvas carga-desplazamiento mostradas en el capítulo anterior, el comportamiento de las losas con placa colaborante puede ser clasificado como dúctil o frágil. Según el Eurocódigo 4, Sección 10.3.1, se describe el comportamiento dúctil si la carga de rotura es más del 10% a la carga que provoca el deslizamiento en el extremo. Si la carga máxima se alcanza con una flecha en el centro superior a $L/50$, se considerará como carga de rotura la que produce una flecha en el centro del vano de $L/50$; tal como se observa en la Figura 4.1. En caso contrario, el comportamiento se clasifica como frágil [10].

En la Tabla 4.1 y Tabla 4.2 se encuentran resumidos los resultados obtenidos en los ensayos de flexión en losas apoyadas sobre rodillos (simplemente apoyadas) y losas apoyadas en vigas de concreto, respectivamente; en las cuales se observa claramente que las losas con placa colaborante de perfil AD-900 tienen un comportamiento dúctil; a diferencia de las que tienen el perfil AD-730 y AD-600, que presentan un comportamiento no dúctil.

Particularmente, en el caso de las losas con placa colaborante de perfil AD-900 se puede notar que la resistencia en el estado último es 2.0 y 1.4 veces la resistencia al desprendimiento de la placa colaborante, para los espesores de calibre 22 (0.749mm) y calibre 20 (0.909mm), respectivamente. En el caso del perfil AD-730 y AD-600 se observa que la resistencia en el estado último varía en ambos casos desde 0.6 a 0.9 veces la resistencia al desprendimiento, tanto para el calibre 22 como para el calibre 20.

Tabla 4.1 Resultados del ensayo de flexión de losas simplemente apoyadas.

ID	Perfil	Calibre	Luz libre	Altura (cm)	Tipo de Falla	$P_{L/360}$ (tf)	$P_{despren.}$ (tf)	P_{rotura} (tf)
L-001	AD-900	22	2.76	10.05	Dúctil	1.000	1.050	2.275
L-002	AD-900	22	2.76	12.33	Dúctil	1.550	1.650	3.175
L-003	AD-900	22	2.76	13.40	Dúctil	2.025	2.000	3.800
L-004	AD-730	22	2.76	14.38	Frágil	1.050	2.100	1.475
L-005	AD-730	22	2.76	16.88	Frágil	1.450	2.275	2.050
L-006	AD-730	22	2.76	19.25	Frágil	2.775	3.325	3.025
L-007	AD-600	22	2.76	11.23	Frágil	1.325	2.000	1.550
L-008	AD-600	22	2.76	13.10	Frágil	2.250	2.350	1.800
L-009	AD-600	22	3.78	14.45	Frágil	1.500	2.125	1.800
L-010	AD-900	22	3.78	9.78	Dúctil	0.475	0.875	1.375
L-011	AD-900	22	3.78	12.40	Dúctil	0.975	1.225	2.425
L-012	AD-900	22	3.78	13.83	Dúctil	1.375	1.525	3.125
L-013	AD-730	22	3.78	14.15	Frágil	1.325	1.950	0.925
L-014	AD-730	22	3.78	17.03	Frágil	1.125	1.675	1.525
L-015	AD-730	22	3.78	19.03	Frágil	2.725	2.725	1.475
L-016	AD-600	22	3.78	11.23	Frágil	0.500	0.725	0.675
L-017	AD-600	22	3.78	12.65	Frágil	1.075	1.525	1.125
L-018	AD-600	22	3.78	15.20	Frágil	1.475	1.525	1.625
L-019	AD-900	20	2.76	10.25	Dúctil	1.650	2.225	2.750
L-020	AD-900	20	2.76	12.45	Dúctil	2.775	2.800	3.400
L-021	AD-900	20	2.76	14.28	Dúctil	3.650	3.675	5.075
L-022	AD-730	20	2.76	14.85	Frágil	3.375	3.475	3.150
L-023	AD-730	20	2.76	17.60	Frágil	1.750	3.375	3.200
L-024	AD-730	20	2.76	20.35	Frágil	3.500	4.925	4.525
L-025	AD-600	20	2.76	11.40	Frágil	2.000	2.775	2.075
L-026	AD-600	20	2.76	12.80	Frágil	2.400	2.500	2.500
L-027	AD-600	20	3.78	14.48	Frágil	1.975	2.650	2.625
L-028	AD-900	20	3.78	9.28	Dúctil	0.625	1.275	1.650
L-029	AD-900	20	3.78	12.03	Frágil	1.475	2.425	2.600
L-030	AD-900	20	3.78	14.10	Dúctil	2.275	2.650	3.700
L-031	AD-730	20	3.78	13.60	Frágil	1.475	3.050	1.625
L-032	AD-730	20	3.78	16.88	Frágil	2.000	2.250	1.650
L-033	AD-730	20	3.78	20.23	Frágil	2.025	2.950	2.450
L-034	AD-600	20	3.78	11.08	Frágil	0.775	1.525	0.775
L-035	AD-600	20	3.78	12.83	Frágil	1.275	1.750	0.975
L-036	AD-600	20	3.78	14.68	Frágil	1.875	2.125	1.450

Tabla 4.2 Resultados del ensayo de flexión de losas apoyadas en vigas de concreto.

ID	Perfil	Calibre	Luz libre	Altura (cm)	$P_{L/360}$ (tf)	$P_{despren.}$ (tf)	P_{rotura} (tf)
L-037	AD-900	22	3.93	10.27	0.575	1.525	2.975
L-038	AD-900	22	3.93	14.27	2.175	2.500	1.750
L-039	AD-730	22	3.93	13.77	1.225	1.400	1.750
L-040	AD-730	22	3.93	19.90	2.700	2.725	3.275
L-041	AD-600	22	3.93	11.00	0.875	1.475	1.400
L-042	AD-600	22	3.93	14.17	1.200	1.375	1.550

En el caso del perfil AD-900, sería impreciso afirmar que a menor cuantía (menor área de acero en la sección) la resistencia última es mayor; por lo contrario, los experimentos de los tres tipos de perfiles reflejan que cuando la cuantía es incrementada, la carga en la cual se produce el desprendimiento de la placa colaborante se incrementa considerablemente, lo cual también se puede comprobar viendo los parámetros de adherencia obtenidos mediante el método m-k, cuyos resultados son mostrados en la Sección 4.2. Con lo cual la resistencia última no dependería directamente de la cuantía, sino de la geometría del perfil (cantidad de nervaduras por unidad de ancho), si la placa colaborante alcanzó la fluencia o no, entre otros factores.

En los ensayos, además de la medición de las flechas verticales, fueron obtenidos también los desplazamientos horizontales en la placa colaborante y el concreto, con los cuales se obtuvieron los corrimientos longitudinales. En el caso de los ensayos de flexión de las losas simplemente apoyadas se obtuvieron valores de corrimiento longitudinal del orden de 24mm, mientras que en el caso de las placas colaborantes embebidas en las vigas de concreto se tuvieron corrimientos longitudinales del orden de 16mm.

Por otro lado; en la Sección CC.1.1, Condiciones de Serviciabilidad del código ASCE⁵ 7-05 "Cargas Mínimas de Diseño para Edificaciones y Otras Estructuras"; se presenta una deflexión límite de elementos horizontales para pisos bajo carga viva de 1/360 de la luz libre [2]. Analizando los resultados obtenidos en los ensayos de flexión para losas apoyadas sobre rodillos (caso crítico idealizado), se observa que las flechas centrales en el momento de la falla por adherencia

⁵ American Society of Civil Engineers (ASCE) *Sociedad Americana de Ingenieros Civiles*

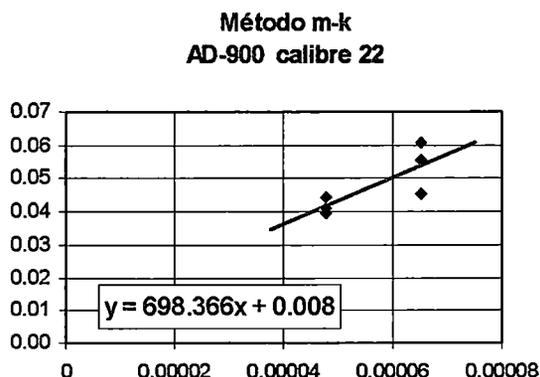
para especímenes con perfiles AD-730 son menores a dicho límite; cuando la deflexión central $L/360$ debería ocurrir antes del desprendimiento de la placa colaborante del concreto para asegurar la funcionalidad del sistema compuesto.

En las curvas carga-deflexión de las losas con vigas de concreto (caso real) podemos notar que la falla por adherencia ocurre mucho después de alcanzar la flecha central límite $L/360$. Este incremento de resistencia por el embebimiento de la placa colaborante en las vigas de concreto hace que las losas bajo esta condición de apoyos satisfagan el desplazamiento límite en condiciones de servicio.

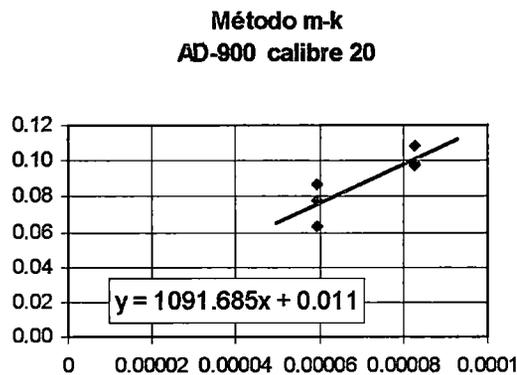
Como se explicó en las secciones anteriores, los ensayos de flexión para losas simplemente apoyada (apoyada en rodillos) son condiciones críticas ideales, en la que el único mecanismo resistente de adherencia es la superficie de la placa colaborante (muescas e interacción entre materiales) considerando la falla prematura de los conectores de corte u otros mecanismos de interferencia mecánica. Por lo que se comprueba experimentalmente que el embebimiento de la placa colaborante en las vigas de concreto, condición real, crea un mecanismo resistente al deslizamiento horizontal en los extremos incluso para losas de gran luz (3.93m); que permite que el desprendimiento de la placa colaborante ocurra sin sobrepasar dicha flecha límite, por lo que se afirma que este tipo de sistema compuesto (con los tres tipos de perfiles usados en la investigación) conserva su funcionalidad en condiciones límites de serviciabilidad.

4.2. Cálculo de los Parámetros m-k

Usando la metodología descrita en la Sección 2.4.1, fueron procesados los resultados obtenidos en los ensayos de flexión de losas simplemente apoyadas; para así poder construir las curvas mostradas en la Figura 4.2, Figura 4.3 y Figura 4.4, correspondientes a los perfiles AD-900, AD-730 y AD-600, respectivamente.

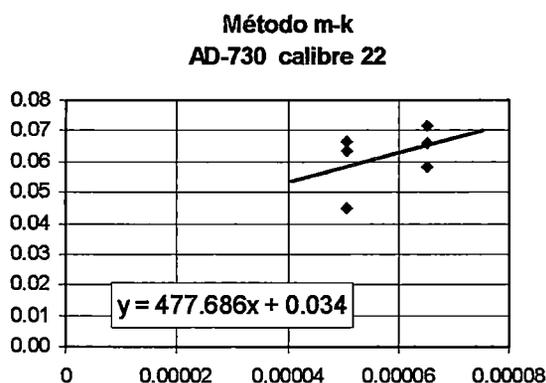


a) Perfil AD-900 calibre 22.

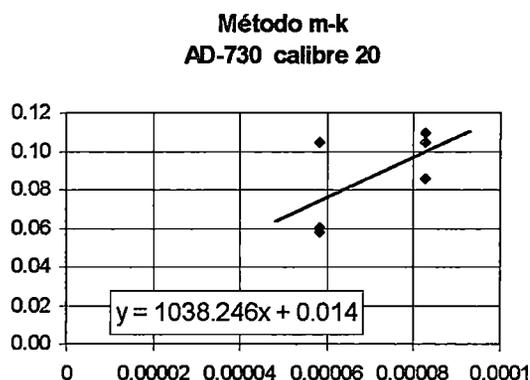


b) Perfil AD-900 calibre 20.

Figura 4.2 Regresión lineal para el cálculo de los parámetros m-k de los perfiles AD-900.

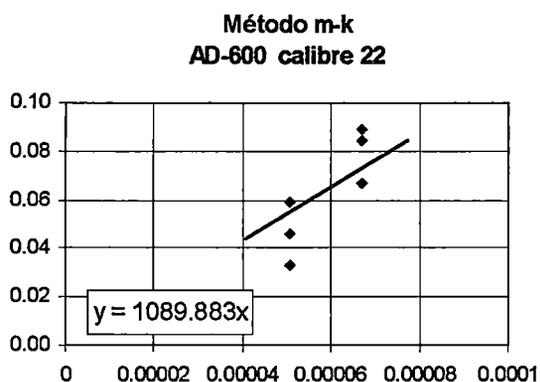


a) Perfil AD-730 calibre 22.

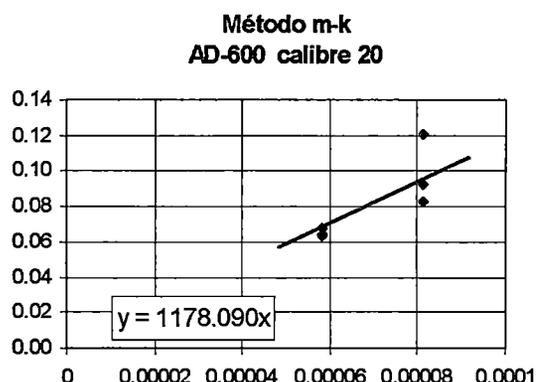


b) Perfil AD-730 calibre 20.

Figura 4.3 Regresión lineal para el cálculo de los parámetros m-k de los perfiles AD-730.



a) Perfil AD-600 calibre 22.



b) Perfil AD-600 calibre 20.

Figura 4.4 Regresión lineal para el cálculo de los parámetros m-k de los perfiles AD-600.

Usando las curvas mostradas anteriormente, las cuales fueron ajustadas por un método de regresión lineal, se encontraron los parámetros m-k de resistencia de adherencia al corte, los mismos que son mostrados en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3 Parámetros m-k para cada tipo de perfil.

Perfil	Calibre	m	k
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

4.3. Modelo Numérico

Basados en las hipótesis descritas en la Sección 2.6.3, han sido desarrollados modelos numéricos, los cuales han sido corroborados con los experimentos mostrados en la sección anterior.

En la Figura 2.16a se muestra la fórmula según la teoría de la viga elástica para la obtención de la flecha central bajo las condiciones de carga dadas en los ensayos, la misma que fue utilizada en las simulaciones numéricas bajo el incremento de las cargas con la elasticidad del concreto y una inercia efectiva equivalente. Estas simulaciones arrojaron valores teóricos con una buena aproximación respecto a las curvas experimentales de carga – desplazamiento. Sin embargo, se notó durante la computación de resultados que al incluirse un factor de ajuste para deformaciones inelásticas, ϕ_δ , se logra una mejor aproximación, estableciéndose así la Ecuación (4.1).

$$\delta_{inelástico} = \phi_\delta \cdot \delta_{elástico} = \phi_\delta \cdot \left(\frac{23}{1296} \cdot \frac{P \cdot L^3}{E_c \cdot I_e} \right) \quad (4.1)$$

Utilizando todos los datos experimentales obtenidos en los ensayos de flexión, se realizó un ajuste para obtener la mejor aproximación de los resultados teóricos, y así obtener el factor de ajuste más adecuado; con lo cual se obtuvo

un valor de 1.33 y se estableció la Ecuación (4.2) para recalculer los resultados teóricos bajo las condiciones de carga del ensayo.

$$\delta_{real} = 0.01331 \cdot \frac{P \cdot L^3}{E_c \cdot I_e} \quad (4.2)$$

Este factor de ajuste puede ser atribuido a diferentes hipótesis de aproximación, como la consideración de que una vez iniciado el agrietamiento en la zona en tracción el concreto no aporta resistencia alguna, o la consideración de un acero equivalente en una sola fibra horizontal de la sección para el equilibrio de fuerzas, o el método de cálculo para la obtención de la inercia efectiva, entre otros. Sin embargo, es prioridad de esta investigación obtener una herramienta útil y práctica para el diseño y/o verificación de este tipo de losas, basándose en resultados experimentales que nos muestran el real comportamiento de las cosas.

Por otro lado, se debe tener en cuenta que las condiciones de carga del ensayo no son las mismas que en la práctica o con las que se diseñan este tipo de losas; por lo cual, la fórmula con la que se obtiene la flecha central teórica en la Ecuación (4.1) puede ser modificada en orden de calcular las deflexiones inmediatas de diseño o verificar la deflexión bajo algún otro tipo de condición de cargas.

A continuación se muestran una confrontación gráfica entre los resultados experimentales, y resultados teóricos obtenidos con la inclusión del factor de ajuste mencionado anteriormente:

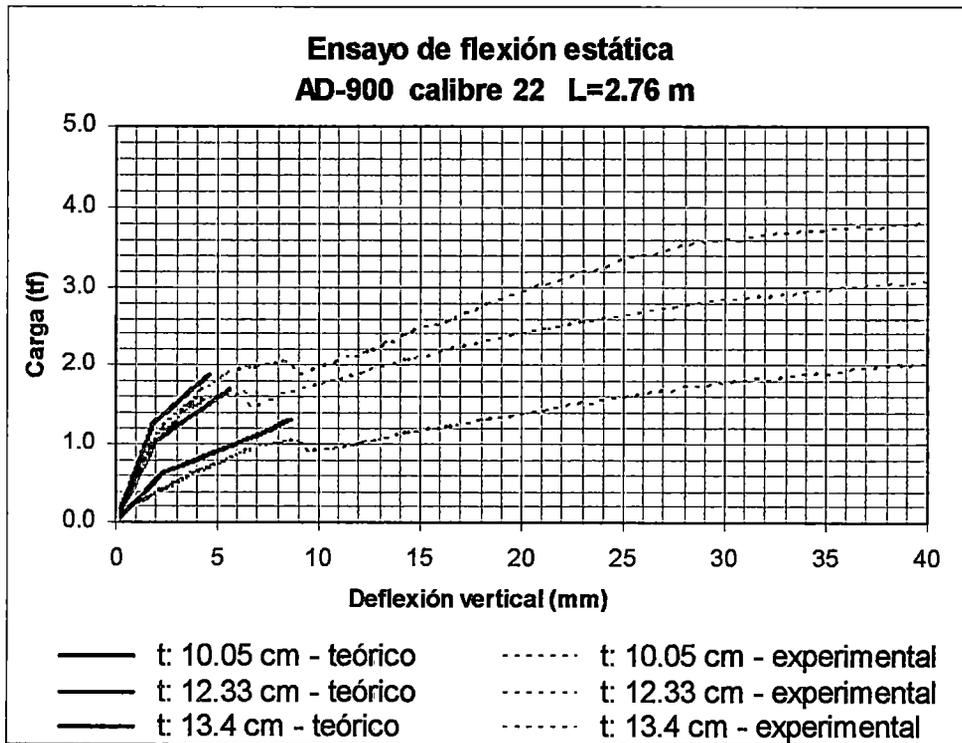


Figura 4.5 Resultados teóricos y experimentales en especímenes L-001, L-002 y L-003 de alturas 14.38, 16.88 y 19.25cm; respectivamente.

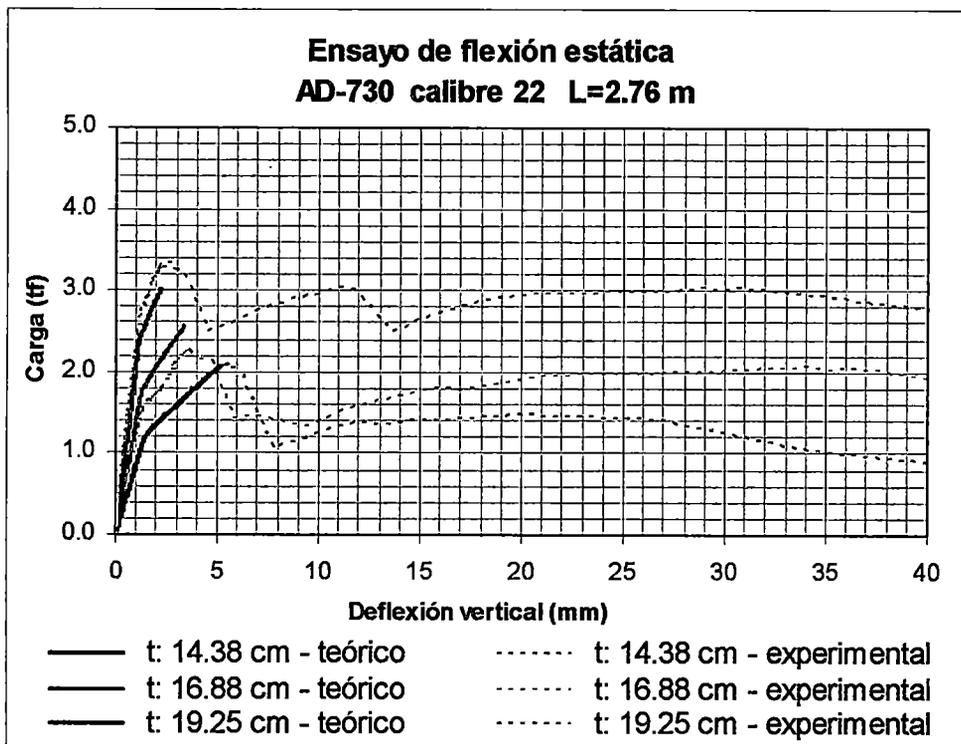


Figura 4.6 Resultados teóricos y experimentales en especímenes L-004, L-005 y L-006 de alturas 14.38, 16.88 y 19.25cm; respectivamente.

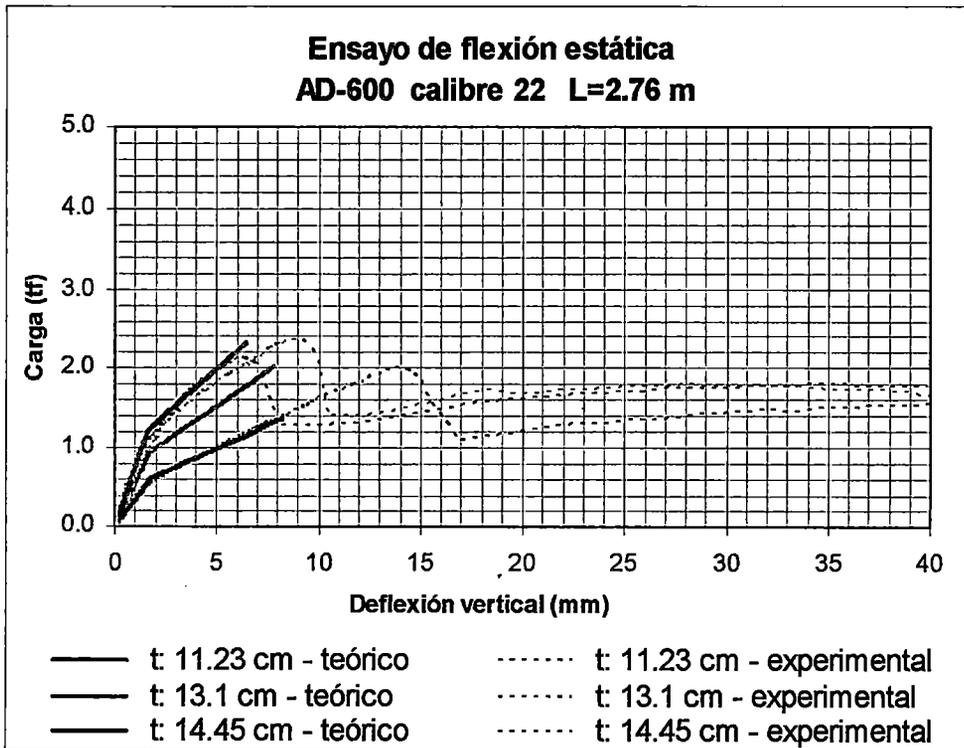


Figura 4.7 Resultados teóricos y experimentales en especímenes L-007, L-008 y L-009 de alturas 11.23, 13.10 y 14.45cm; respectivamente.

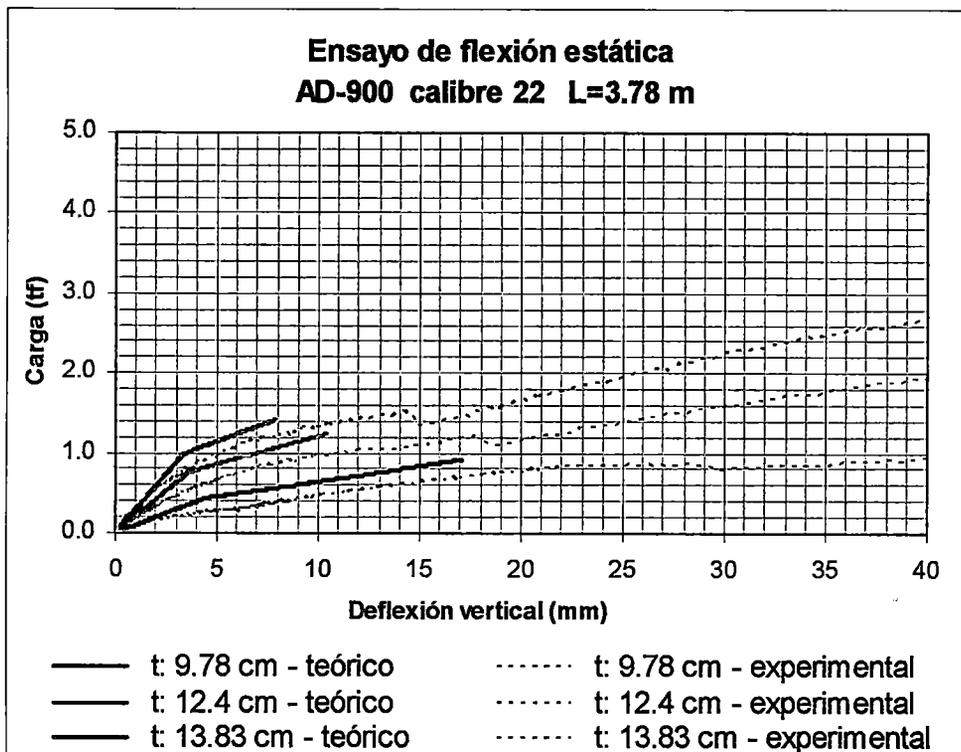


Figura 4.8 Resultados teóricos y experimentales en especímenes L-010, L-011 y L-012 de alturas 9.78, 12.40 y 13.83cm; respectivamente.

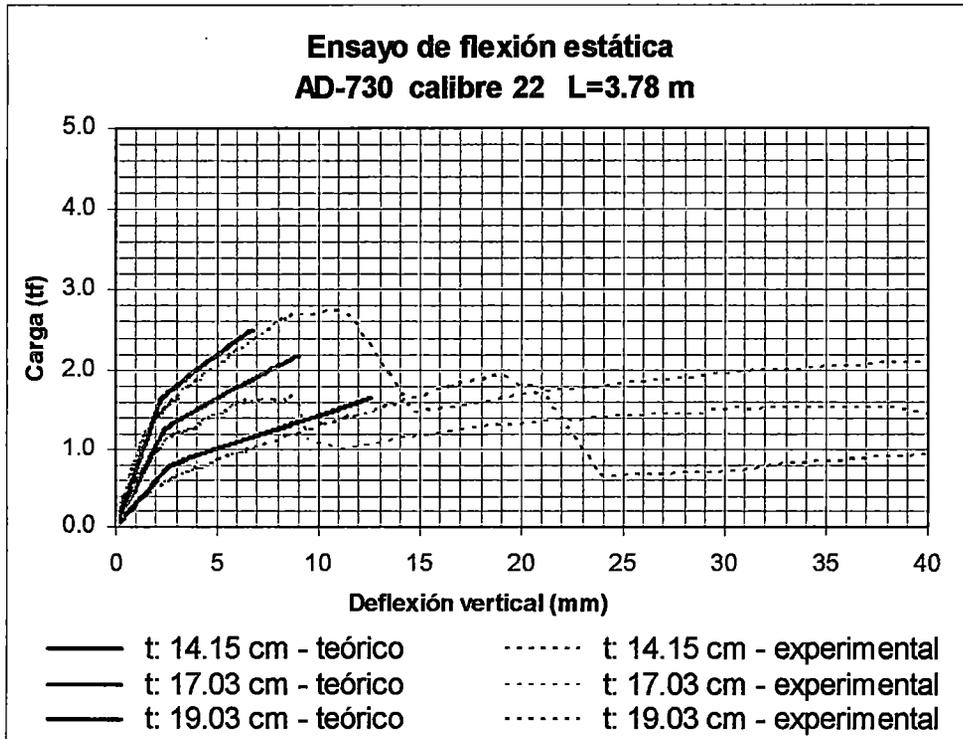


Figura 4.9 Resultados teóricos y experimentales en especímenes L-013, L-014 y L-015 de alturas 14.15, 17.03 y 19.03cm; respectivamente.

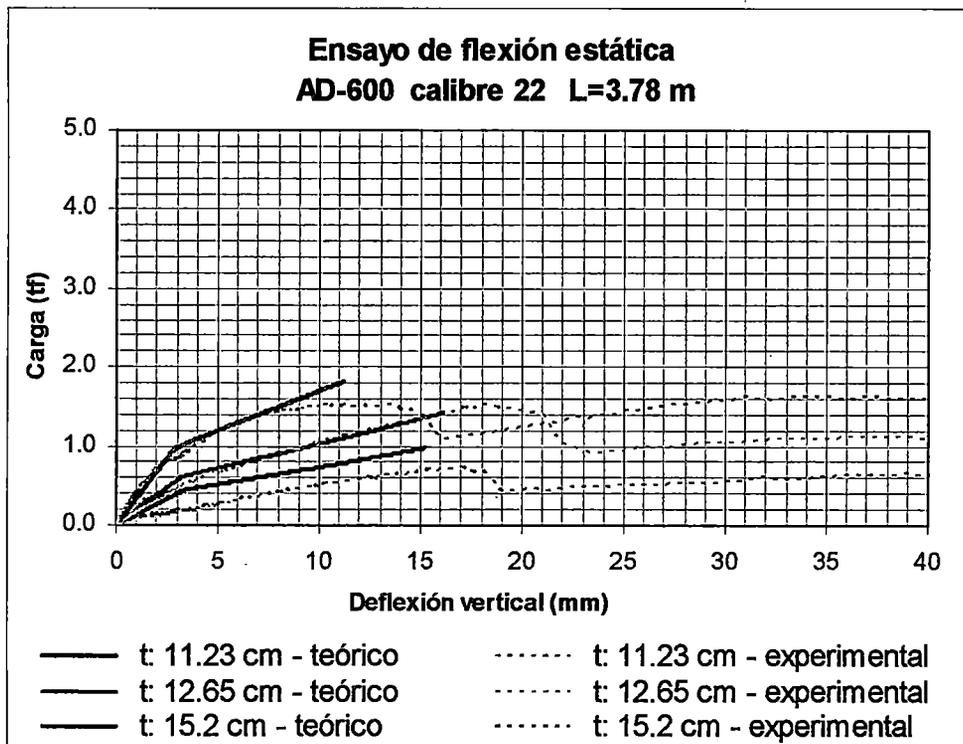


Figura 4.10 Resultados teóricos y experimentales en especímenes L-016, L-017 y L-018 de alturas 11.23, 12.65 y 15.20cm; respectivamente.

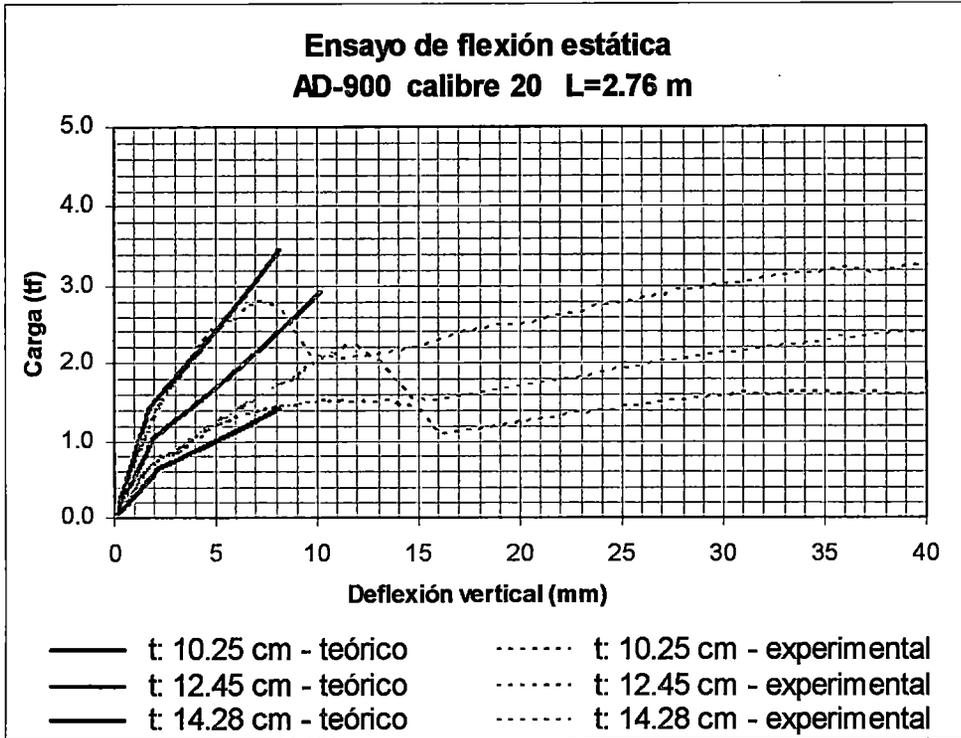


Figura 4.11 Resultados teóricos y experimentales en especímenes L-019, L-020 y L-021 de alturas 10.25, 12.45 y 14.28cm; respectivamente.

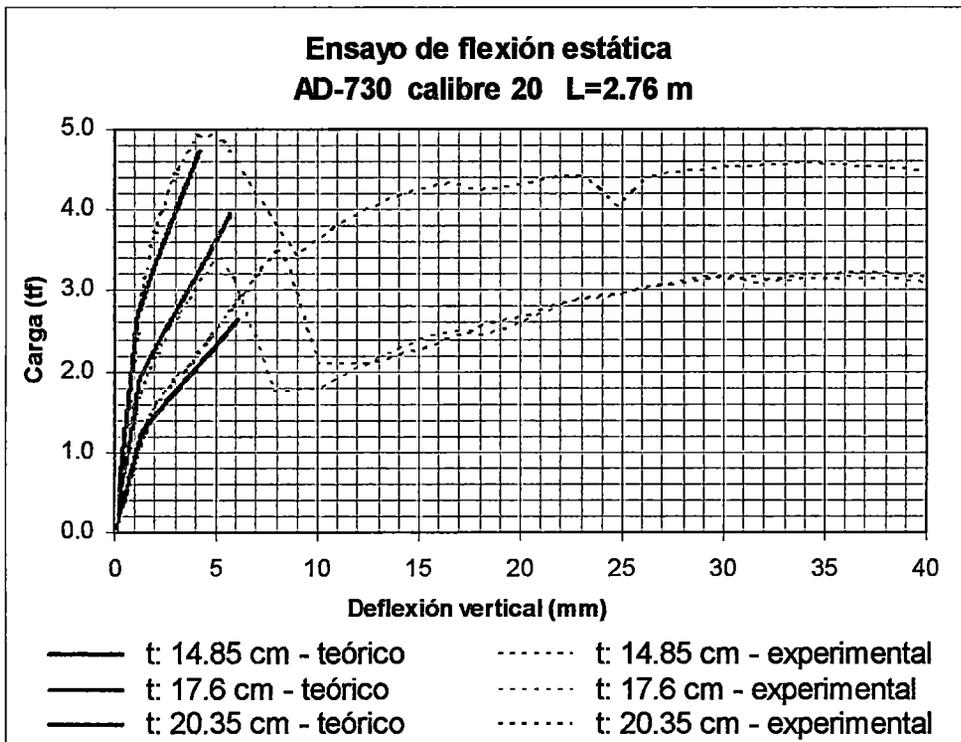


Figura 4.12 Resultados teóricos y experimentales en especímenes L-022, L-023 y L-024 de alturas 14.85, 17.60 y 20.35cm; respectivamente.

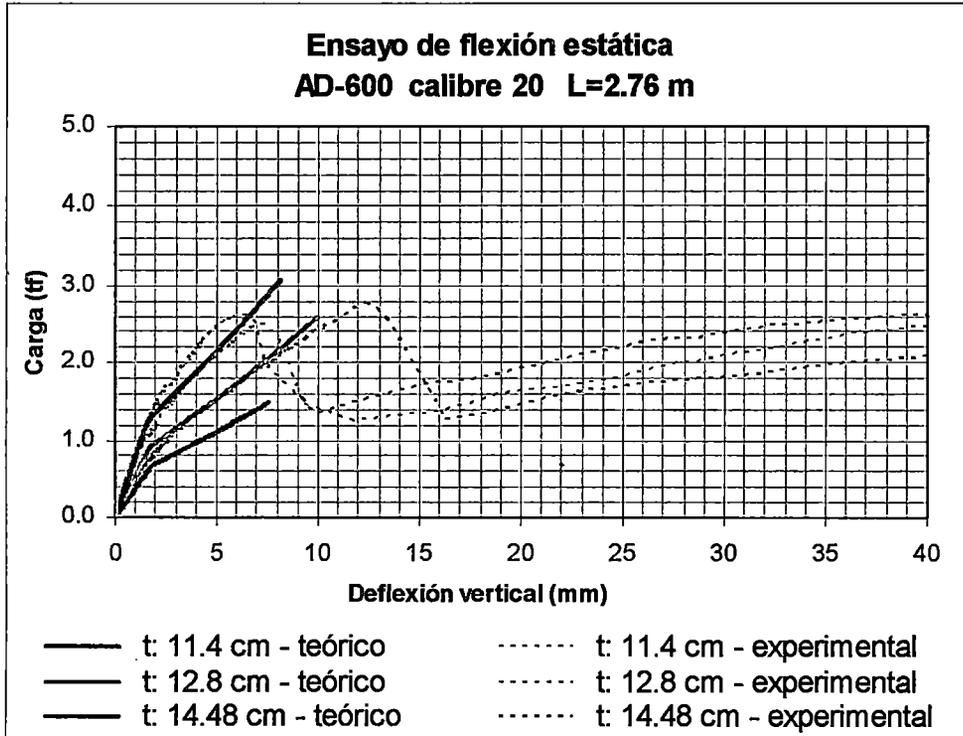


Figura 4.13 Resultados teóricos y experimentales en especímenes L-025, L-026 y L-027 de alturas 11.40, 12.80 y 14.48cm; respectivamente.

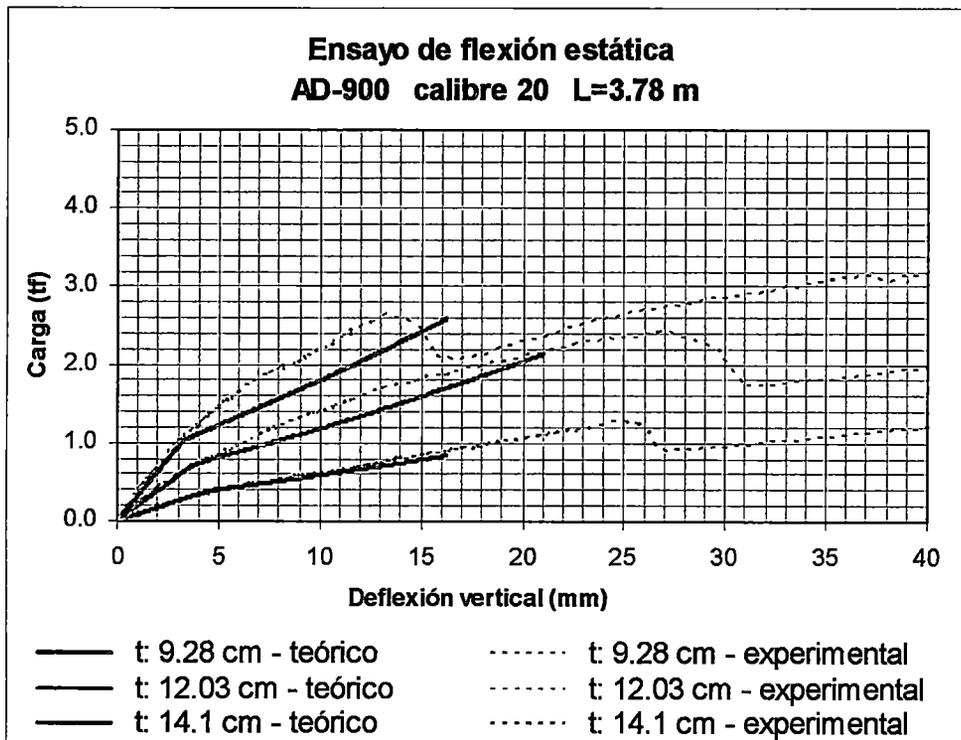


Figura 4.14 Resultados teóricos y experimentales en especímenes L-028, L-029 y L-030 de alturas 9.28, 12.03 y 14.10cm; respectivamente.

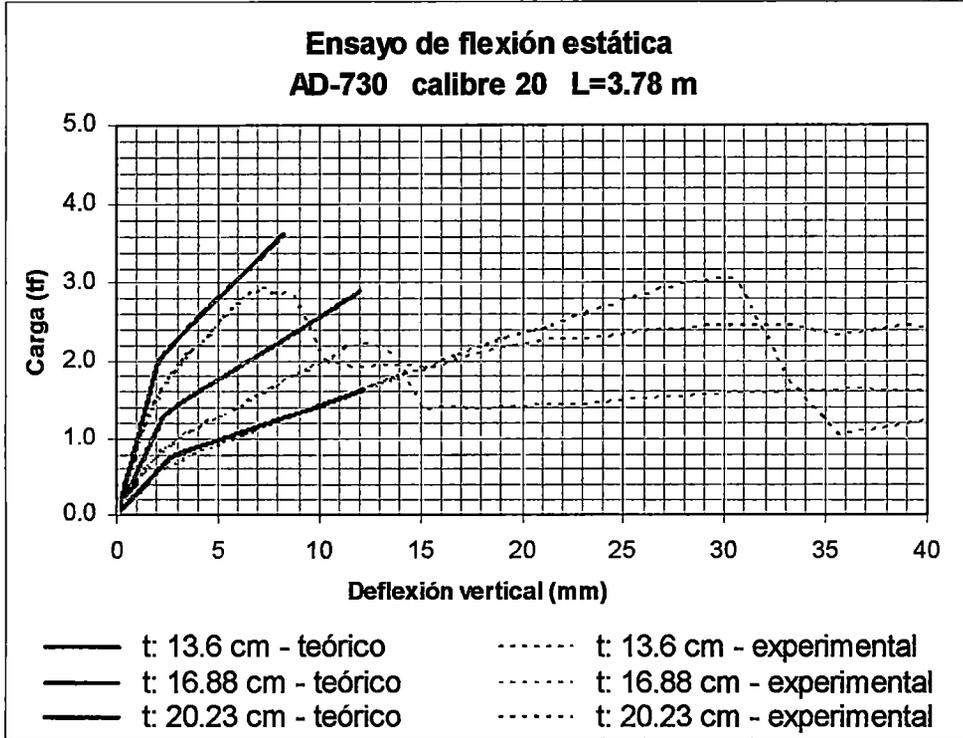


Figura 4.15 Resultados teóricos y experimentales en especímenes L-031, L-032 y L-033 de alturas 13.60, 16.88 y 20.23cm; respectivamente.

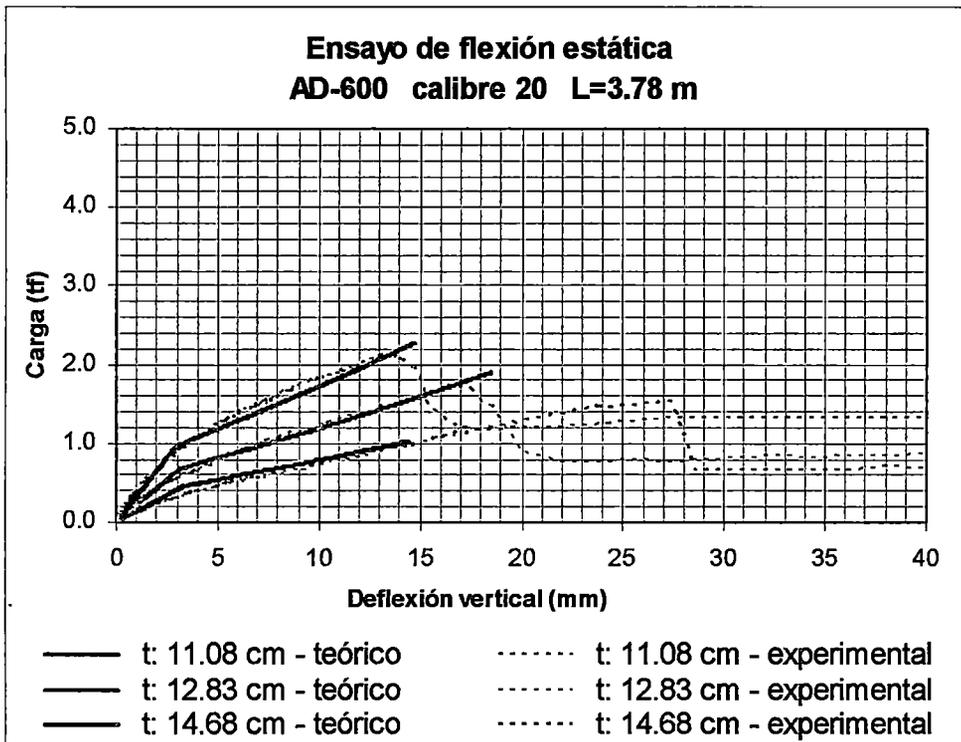


Figura 4.16 Resultados teóricos y experimentales en especímenes L-034, L-035 y L-036 de alturas 11.08, 12.83 y 14.68cm; respectivamente.

4.4. Del Ensayo de Adherencia

En las curvas mostradas en la Sección 3.2.3 se observa un comportamiento similar en los especímenes de un mismo tipo de perfil, por lo cual es aceptable la consideración de un esfuerzo rasante admisible último para cada perfil.

Por otro lado, debido a la adecuación del mecano de soporte para este tipo de experimentos, la probeta de concreto se elevó un máximo de 5mm por la carga aplicada en tracción, con lo cual el espécimen no tuvo contacto con la base en la última parte del ensayo. Por ello, se tuvo en consideración el peso de la probeta de concreto al momento de hacer equilibrio de las fuerzas verticales actuantes sobre el espécimen que originaban el deslizamiento del concreto y placa colaborante. En este experimento no se aplicaron cargas horizontales, con la finalidad de evitar las fuerzas de fricción que pudieron haberse originado; y obtener así, sólo la carga máxima resistente dada por la adherencia. En la Tabla 4.4 se resumen los resultados obtenidos en los ensayos de *pull-out*.

Tabla 4.4 Resultados del ensayo de adherencia.

Perfil	Calibre	Ancho cm	Largo cm	Espesor de losa cm	Carga máxima tf	Peso del concreto tf	Esfuerzo admissible rasante Kgf/cm ²
AD-900	22	15.0	30	12	2.070	0.021	2.32
AD-900	22	15.0	30	12	1.730	0.021	1.95
AD-900	22	15.0	30	12	2.130	0.021	2.39
AD-600	22	22.7	45	13	4.140	0.046	2.05
AD-600	22	22.7	45	13	4.610	0.048	2.28
AD-600	22	22.7	45	13	5.550	0.047	2.74
AD-730	22	31.7	60	17	5.500	0.122	1.48
AD-730	22	31.7	60	17	5.340	0.123	1.44
AD-730	22	31.7	60	17	6.520	0.124	1.75

Utilizando la Ecuación (2.50) de la Sección 2.6.3, se obtuvieron los esfuerzos máximos teóricos dados por una falla por adherencia al corte. Para lograr esto, se asume que la luz rasante de la losa es equivalente a la altura de la probeta de *pull-out*, ya que a lo largo de esta longitud es la única zona donde se desarrolla el corte bajo las condiciones de carga del ensayo, tal como se muestra en la Figura 2.16 c.

En la Tabla 4.5 se muestran los resultados teóricos obtenidos y los resultados experimentales promedios.

Tabla 4.5 Resultados teórico calculados por el modelo matemático.

Perfil	t cm	V_e tf	z cm	Esfuerzo límite de adherencia	
				Teórico	Experimental
				Kg/cm ²	Kg/cm ²
AD-900	12	2133	8.61	2.72	2.36
AD-600	13	2067	8.50	2.67	2.51
AD-730	17	1645	12.00	1.57	1.55

Comparando los resultados experimentales con los teóricos se observa que estos últimos son mayores, esto se atribuye a que en el modelo numérico basado en los parámetros m-k considera también la fricción, ya que existen cargas normales a la superficie (sobrecarga) y esta reacción (fricción) no es producida en los ensayos de adherencia.

4.5. Mecanismo Resistente al Deslizamiento Longitudinal dado por el Embebimiento de la Placa Colaborante en las Vigas de Concreto

La determinación de la resistencia de adherencia al corte en losas con placa colaborante se llevó a cabo mediante los ensayos de flexión de las losas apoyadas simplemente con ausencia de conectores de corte, los cuales han sido descritos en el capítulo anterior. Sin embargo en las construcciones reales no se presenta este sistema bajo dichas condiciones, de lo contrario existen otros mecanismos además de las muescas que aportan a la resistencia frente al deslizamiento longitudinal.

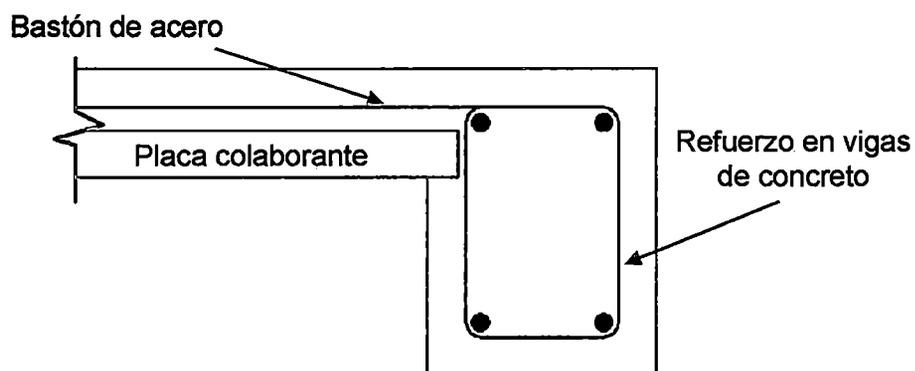


Figura 4.17 Detalle de refuerzo de losas compuestas apoyadas en vigas de concreto.

Además del uso de la placa colaborante sobre entresijos metálicos, donde es imprescindible el uso de conectores de corte, existe una alternativa no convencional para usar la placa colaborante en entresijos de concreto, la cual consiste en embeber la placa colaborante sobre las vigas de concreto utilizando bastones de acero que salen del refuerzo de la viga de concreto hacia la losa compuesta, como se muestra en la Figura 4.17.

En ese sentido, fueron ensayados losas apoyadas en vigas de concreto de 20 x 30cm con el objetivo de estudiar los mecanismos resistentes al deslizamiento longitudinal, donde la placa colaborante es embebida en la vigas de concreto unos 40mm a cada lado, según las recomendaciones de los fabricantes.

Para el estudio de la contribución de resistencia al deslizamiento longitudinal dada por embebimiento de la placa colaborante, se ha llevado a cabo una comparación entre el tipo simplemente apoyado y el tipo apoyado en vigas de concreto. Se han utilizado los resultados de los especímenes L-037 al L-042, los cuales tienen una luz libre de 3.93m y una placa colaborante de calibre 22 (0.749mm). En el caso de las losas simplemente apoyadas se han obtenido la resistencia producto de simulaciones realizadas con el modelo numérico calibrado con los experimentos, el mismo que ha sido desarrollado y descrito en la Sección 2.6.3. Estos resultados son resumidos en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6 Comparación de cortantes resistentes de losas apoyadas en vigas de concreto y simplemente apoyadas.

ID	Perfil	Altura cm	Apoyado en vigas de concreto		Simplemente apoyado	
			P _{máx} tf	V _n tf	P _{máx} tf	V _n tf
L-037	AD-900	10.27	1.525	0.763	0.940	0.470
L-038	AD-900	14.27	2.500	1.250	1.412	0.706
L-039	AD-730	13.77	1.400	0.700	1.641	0.821
L-040	AD-730	19.90	2.725	1.363	2.641	1.321
L-041	AD-600	11.00	1.475	0.738	1.124	0.562
L-042	AD-600	14.17	1.375	0.688	1.594	0.797

Otra forma de analizar este incremento de resistencia es aprovechar los resultados de los experimentos en especímenes similares a los apoyados en vigas de concreto. De esta forma tenemos las losas con placa colaborante de calibre 22 con luces de 3.78m identificadas como L-010, L-012, L-013, L-015, L-016 y L-018; los cuales pueden ser comparados con las losas apoyadas en vigas de concreto identificadas como L-037, L-038, L-039, L-040, L-041 y L-042; respectivamente. Los resultados son mostrados en la Tabla 4.7.

Tabla 4.7 Comparación de cortantes resistentes de losas apoyadas en vigas de concreto y simplemente apoyadas.

ID Especímen (similar)	Perfil	t cm	P _{máx} tf	V _n tf
L-010 (L-037)	AD-900	9.78	0.875	0.438
L-012 (L-038)	AD-900	13.83	1.525	0.763
L-013 (L-039)	AD-730	14.15	1.950	0.975
L-015 (L-040)	AD-730	19.03	2.725	1.363
L-016 (L-041)	AD-600	11.23	0.725	0.363
L-018 (L-042)	AD-600	15.20	1.525	0.763

Los resultados obtenidos mediante el modelo numérico son muy cercanos a los resultados experimentales de losas simplemente apoyadas, de características similares a las losas apoyadas en vigas de concreto.

En la Figura 4.18, Figura 4.19 y Figura 4.20 son mostradas las curvas de carga-flecha central, obtenidas en los experimentos realizados, losas apoyadas de en vigas de concreto con luz de 3.93m y losas simplemente apoyadas con luz de 3.78m.

De los resultados mostrados anteriormente se comprueba también experimentalmente que el embebimiento de la placa colaborante en las vigas de concreto, como se presentan en las condiciones reales, incrementa la resistencia al desprendimiento de manera significativa. Este incremento de la capacidad resistente al corte longitudinal para losas con perfiles AD-900 y AD-600 es del 60% y 30% respectivamente. Mientras que en el caso de losas con perfil AD-730 no hay un incremento significativo de la resistencia al corte longitudinal.

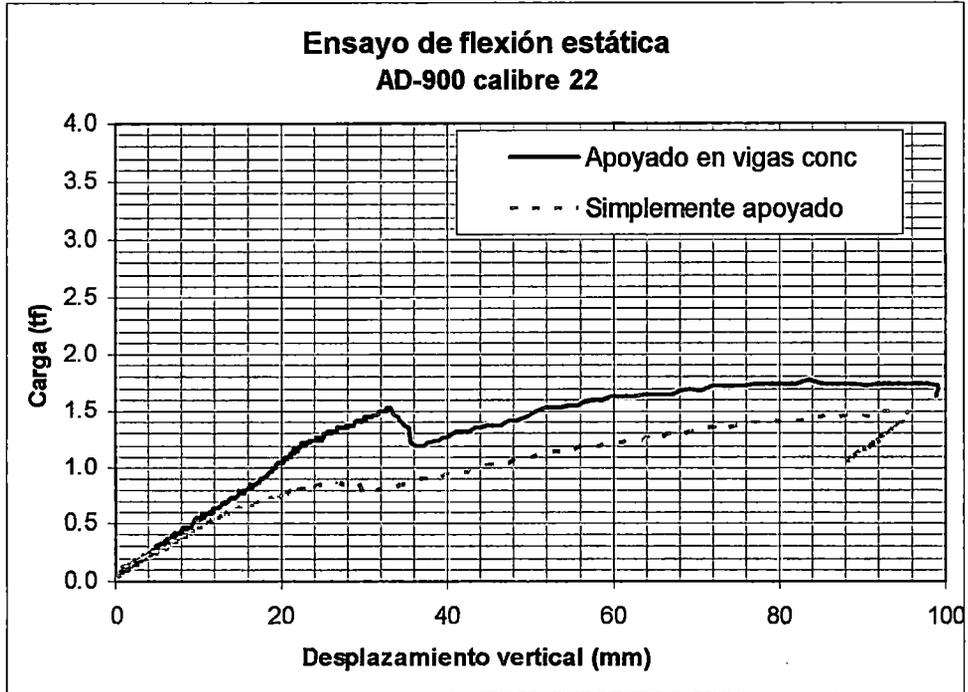


Figura 4.18 Comparación experimental entre losa apoyada en vigas de concreto L-037 y losa simplemente apoyada L-010.

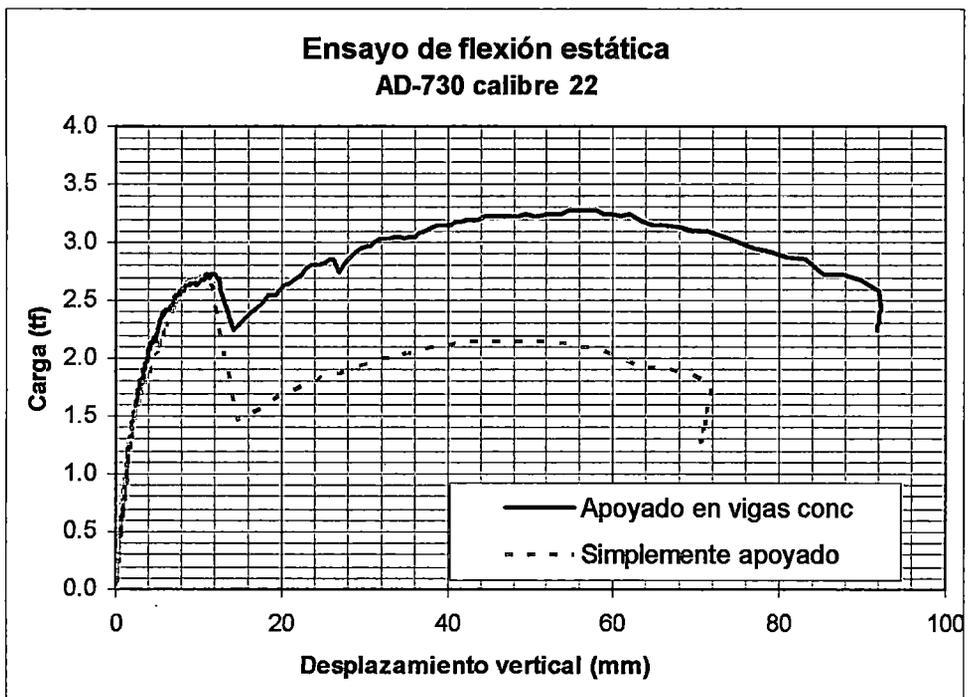


Figura 4.19 Comparación experimental entre losa apoyada en vigas de concreto L-040 y losa simplemente apoyada L-016.

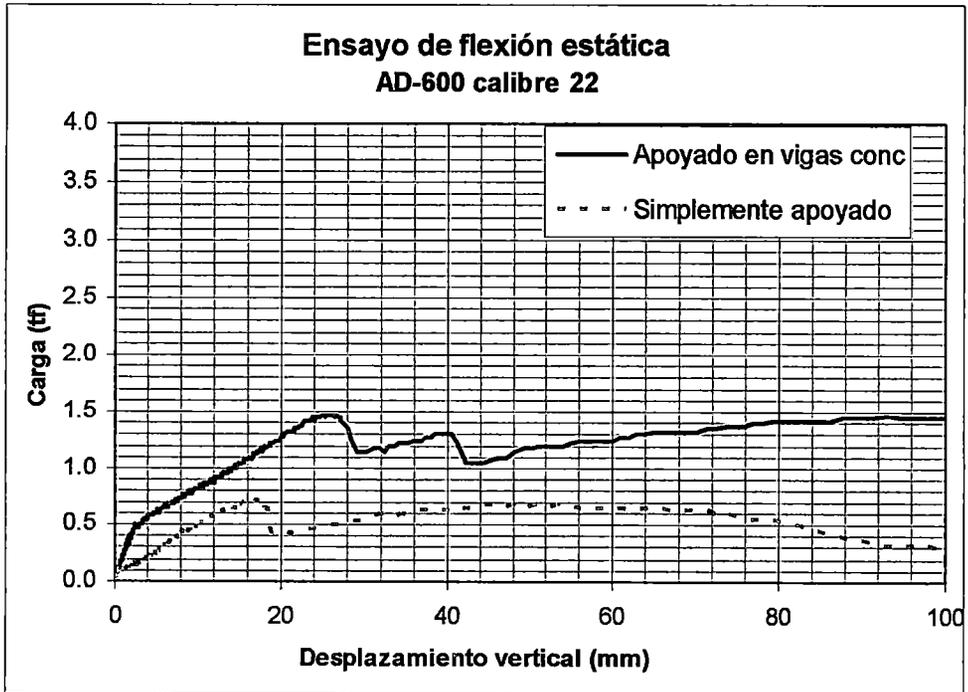


Figura 4.20 Comparación experimental entre losa apoyada en vigas de concreto L-041 y losa simplemente apoyada L-015.

CONCLUSIONES

1. En este estudio experimental se han llevado a cabo un total de 42 ensayos de flexión en 36 losas simplemente apoyados y 6 losas apoyados en vigas de concreto. Complementariamente a estos ensayos, han sido sometidos a ensayos de *pull-out* o ensayo de adherencia 9 probetas reducidas de concreto con placa colaborante.
2. Esta investigación estudia tres tipos de perfiles de placa colaborante, denominadas AD-900, AD-730 y AD-600; en dos espesores: calibre 22 y calibre 20. Para conformar losas de 2.76, 3.78 y 3.93m de luz libre, con alturas de losas que van desde los 9.28 hasta 20.35cm, sometidos a ensayos de flexión; y probetas reducidas de 30, 45 y 60 de altura, con anchos de 15, 22.7 y 31.7cm sometidos a ensayos de *pull-out*.
3. Del ensayo de flexión, tanto en losas simplemente apoyadas y apoyadas en vigas de concreto, se puede generalizar un comportamiento ante un incremento progresivo de la carga: inicio del agrietamiento del concreto en la zona de tracción, inicio del desprendimiento de la placa colaborante del concreto, desprendimiento total de la losa de concreto de la placa colaborante y resistencia última de la losa.
4. En las curvas experimentales de carga-flecha central se puede observar un comportamiento dúctil para todas las losas con perfiles AD-900. Las losas con perfiles AD-730 y AD-600 presentan un comportamiento no dúctil (frágil).
5. En los ensayos de flexión y ensayos de *pull-out* se ha observado que a medida que la cuantía se incrementa, la resistencia de adherencia al corte se incrementa considerablemente.
6. La resistencia última de las losas con perfil AD-900 son 2.0 y 1.4 veces la resistencia de desprendimiento de la placa colaborante, para el calibre 22 y calibre 20, respectivamente. Las losas con perfiles AD-730 y AD-600 tienen una resistencia última que varía en ambos casos desde 0.6 a 0.9 veces la resistencia de desprendimiento, tanto para el calibre 22 y calibre 20.
7. Las losas con perfiles AD-900 y AD-600 apoyadas sobre rodillos (condiciones críticas ideales) sometidas a ensayos de flexión aseguran flechas centrales menores a la deflexión límite $L/360$ hasta su capacidad máxima como sistema compuesto (hasta la falla por desprendimiento); mientras que las losas con perfiles AD-730 presentan en algunos casos

deflexiones centrales menores al límite $L/360$ cuando ocurre el desprendimiento. Sin embargo, en todos los ensayos de losas de gran luz libre (3.93m) apoyadas en vigas de concreto (condiciones reales), se ha comprobado que la falla por adherencia ocurre después de alcanzar la deflexión límite, con lo cual este sistema conserva su funcionalidad para deflexiones límites de serviciabilidad.

8. El deslizamiento último presentado en las losas simplemente apoyadas son como máximo 24mm, en el caso de las losas apoyadas en vigas de concreto son como máximo 16mm; valores menores a los recomendados por los fabricantes de placa colaborante (50mm) a usar en los traslapes y en el embebimiento en vigas.
9. El modelo numérico desarrollado en esta investigación, basado en hipótesis simples, logra aproximaciones satisfactorias; por lo cual es aceptable para verificaciones y diseño, además de ser una herramienta útil de predicción del comportamiento de este tipo de losas.
10. Los ensayos de *pull-out* en probetas reducidas de concreto y placa colaborante, son una forma rápida, sencilla y económica para determinar los límites de esfuerzo rasante para este tipo de sistemas compuestos. Este tipo de ensayos proporcionan valores muy similares a los obtenidos en ensayos más elaborados, como son los ensayos de flexión, que demandan mayor tiempo y recursos.
11. El embebimiento de la placa colaborante en las vigas de concreto incrementa la resistencia frente al deslizamiento de losas de gran luz. Este incremento es significativo en losas con perfiles AD-900 y AD-600, siendo el incremento del orden del 60% y 30% respectivamente; mientras que en el caso de las losas con perfiles AD-730 el incremento no es significativo.
12. Finalmente, se ha observado durante el desarrollo de esta investigación la importancia que tienen los estudios experimentales, especialmente para este tipo de sistemas estructurales que poseen un gran número de variables; cuya principal falla (falla por adherencia) es determinada de manera sencilla mediante parámetros experimentales (m , k) y el esfuerzo límite de adherencia, obtenidos en los ensayos de flexión y ensayos *pull-out*, respectivamente. Brindando así, parámetros indispensables para el diseño, sin los cuales no sería posible el conocimiento de la capacidad real de este tipo de losas.

RECOMENDACIONES

1. La implementación de parámetros experimentales tan importantes como la resistencia de adherencia al corte en el diseño de este tipo de losas es fundamental para asegurar la funcionalidad del sistema compuesto; por lo cual, deben incluirse en las verificaciones y el diseño de este sistema estructural.
2. En el proceso de fabricación de la placa colaborante se debe tener un estricto control de calidad durante su formado, para así lograr la geometría del perfil esperada, la forma y profundidad requerida en las muescas.
3. Los ensayos de *pull-out* en probetas reducidas de concreto con placa colaborante han demostrado ser una manera rápida, sencilla y económica para determinar los límites de esfuerzos rasantes, por lo cual se propone la implementación de este tipo de ensayos por cierto lote de producción de la placa colaborante para asegurar que las muescas cumplan las exigencias requeridas, pues se trata del ente más importante que determina la adherencia en este tipo de sistemas compuestos.
4. Existen factores, además de la carga por gravedad, que pueden producir el desprendimiento prematuro de la placa colaborante; como una deficiente limpieza en la superficie de la placa colaborante antes del vaciado, deflexiones prematuras en la placa colaborante por un mal almacenamiento, izaje y colocación, en general por un mal proceso constructivo. Además de lo mencionado, pueden alcanzarse vibraciones excesivas debido a una vibración forzada u otro tipo de movimiento que produzcan que la placa colaborante se desprenda una vez fraguado el concreto, por lo que es conveniente un estudio más profundo teniendo en cuenta a la vibración como agente perjudicial que provoque el desprendimiento de la placa colaborante.
5. Esta investigación tiene como objetivo principal el estudio de la adherencia mecánica de la placa colaborante producida por las muescas, ente fundamental que proporciona la resistencia de adherencia al corte; y la influencia del embebimiento de la placa colaborante en las vigas de concreto. Sin embargo, existen otros mecanismos resistentes que influyen en el comportamiento de este tipo de losas, como son los conectores de corte, por lo cual un siguiente paso sería la influencia de conectores de corte en la resistencia de las losas con placa colaborante.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] American Concrete Institute. "ACI 318-05 Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary", ACI standard, Farmington Hills, Michigan.
- [2] American Society of Civil Engineering. "ASCE 7-05 Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures", ASCE Standard, New York.
- [3] American Society for Testing and Materials, "ASTM A325 - 09: Standard Specification for Structural Bolts, Steel, Heat Treated, 120/105 ksi Minimum Tensile Strength". ASTM standard, West Conshohocken, Pennsylvania.
- [4] American Society for Testing and Materials, "ASTM A36/A36M - 08: Standard Specification for Carbon Structural Steel". ASTM standard, West Conshohocken, Pennsylvania.
- [5] American Society for Testing and Materials, "ASTM A611 - 97: Standard Specification for Structural Steel (SS), Sheet, Carbon, Cold-Rolled". ASTM standard, West Conshohocken, Pennsylvania.
- [6] 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.
- [7] American Society for Testing and Materials, "ASTM B633 - 07: Standard Specification for Electrodeposited Coatings of Zinc on Iron and Steel". ASTM standard, West Conshohocken, Pennsylvania.
- [8] 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.
- [9] American Society for Testing and Materials, "ASTM C39/C39M - 05e2: Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens". ASTM standard, West Conshohocken, Pennsylvania.
- [10] Comité Europeo de Normalización, "Eurocódigo 4: Diseño de estructuras compuestas de acero y hormigón, Reglas Generales y Reglas para Edificación" (EN 1994-1-1:2004).
- [11] Ferrer, M. "Estudio numérico experimental de la interacción entre la chapa de acero y el hormigón. Para la mejora resistente de las losas mixtas frente

- al deslizamiento longitudinal”, Universidad Politécnica de Cataluña, España 2005.
- [12] Japanese Industrial Standards Committee, “JIS Z2201-1998 Making of sample in tensile test of metal material”.
- [13] Monfort, J. “Estructuras Mixtas para Edificación Según Criterios del Eurocódigo 4”, Editorial Universidad Politécnica de Valencia, 2002.
- [14] Nilson, A. y Winter, G. “Diseño de Estructuras de Concreto”, McGraw-Hill/Interamericana S.A., 11ª Edición, Colombia 1994.
- [15] Park, R. y Paulay, T. “Reinforced Concrete Structures”, John Wiley and Sons, Inc., New York 1975.
- [16] Salmon, C. y Johnson, J. “Steel Structures. Design behavior”, Prentice Hall, 4ª Edición, New Jersey 1996.
- [17] Sandia National Laboratories. “Construction Standard Specification. Steel Deck”, División 5 – Metales, Sandia Corporation, 2006.
- [18] Shen, G. “Performance Evaluation of New Corrugated-type Embossments for Composite Deck”, Facultad de la Universidad Del estado de Virginia, 2001.
- [19] Steel Deck Institute. “Designing with Steel Form Deck”, SDI Publications, Illinois, 2003.

ANEXO A. CÁLCULO DE LAS PROPIEDADES GEOMÉTRICAS DE LAS LOSAS CON PLACA COLABORANTE

A.1. Cálculo de las Propiedades Geométricas de la Placa Colaborante

Aprovechando la geometría regular de la placa colaborante se toma un ancho unitario repetitivo, C_s , para facilitar el cálculo de sus propiedades geométricas, tal como se muestra en la Figura A.1.

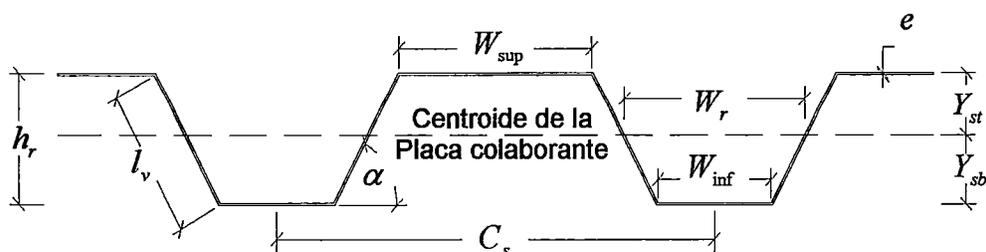


Figura A.1 Perfil típico de la placa colaborante

A partir del ancho unitario considerado se presentan a continuación las fórmulas para el cálculo de la geometría de la placa colaborante:

$$W_r = \frac{(C_s + W_{inf} - W_{sup})}{2} \quad (A.1)$$

$$l_v = \sqrt{\left(\frac{C_s - W_{inf} - W_{sup}}{2}\right)^2 + h_r^2} \quad (A.2)$$

$$\alpha = \arcsen\left(\frac{h_r}{l_v}\right) \quad (A.3)$$

$$Y_{sb} = \frac{(W_{sup} + l_v) \cdot h_r}{(W_{sup} + 2 \cdot l_v + W_{inf})} \quad (A.4)$$

$$Y_{st} = h_r - Y_{inf} \quad (A.5)$$

$$I'_{sd} = \left[\left(\frac{W_{sup} \cdot e^3}{12} + W_{sup} \cdot e \cdot Y_{st}^2 \right) + \left(\frac{W_{inf} \cdot e^3}{12} + W_{inf} \cdot e \cdot Y_{sb}^2 \right) + \left(\frac{l_v \cdot e \cdot (l_v^2 + e^2) - (l_v^2 - e^2) \cdot \cos(2 \cdot \alpha)}{12} + \frac{l_v \cdot e \cdot (Y_{st} - Y_{sb})^2}{2} \right) \right] \cdot \frac{1}{C_s} \quad (A.6)$$

$$I_{sd} = \frac{b}{C_s} \cdot I'_{sd} \quad (A.7)$$

$$S_{sup\ sd} = \frac{I_{sd}}{Y_{st}} \quad (A.8)$$

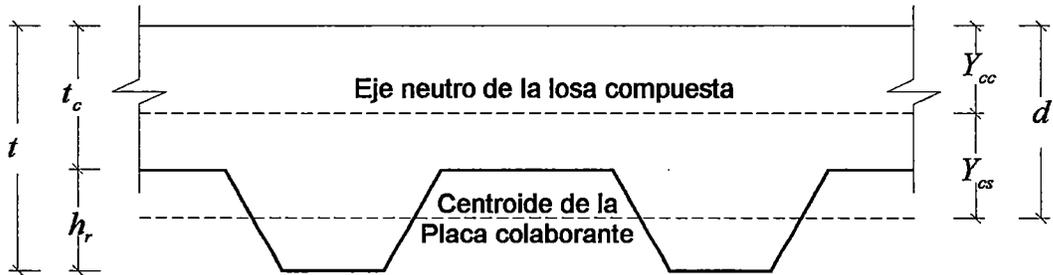
$$S_{inf\ sd} = \frac{I_{sd}}{Y_{sb}} \quad (A.9)$$

Donde:

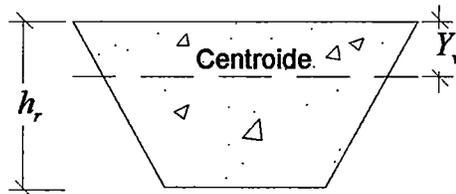
- b : Ancho de la losa compuesta.
- e : Espesor de la lámina de acero (calibre).
- C_s : Distancia entre eje de valles (ancho unitario repetitivo).
- h_r : Altura de la placa colaborante.
- I'_{sd} : Inercia de la placa colaborante por ancho unitario.
- I_{sd} : Inercia de la placa colaborante.
- l_v : Longitud del plano inclinado del valle.
- $S_{inf\ sd}$: Módulo de sección elástica a tracción de la placa colaborante.
- $S_{sup\ sd}$: Módulo de sección elástica a compresión de la placa colaborante.
- W_{sup} : Ancho de borde superior.
- W_{inf} : Ancho de base del valle.
- W_r : Ancho medio de valle
- Y_{sb} : Distancia del centroide al borde inferior de la placa colaborante.
- Y_{st} : Distancia del centroide al tope superior de la placa colaborante.
- α : Inclinación del valle

A.2. Cálculo de las Propiedades Geométricas de la Losa Compuesta

Considerando el mismo ancho unitario repetitivo, C_s , mostrado en la Figura A.2, se deducen algunas fórmulas útiles para el cálculo de las propiedades geométricas de la losa compuesta, las cuales son mostradas mas adelante.



a) Sección típica de la losa compuesta.



b) Sección de concreto de un valle.

Figura A.2 Sección de la losa compuesta.

En el caso de considerar un estado elástico no-agrietado de la losa compuesta se deducen las siguientes fórmulas:

$$Y_v = \frac{(2 \cdot W_r + W_{\text{inf}}) \cdot h_r}{6 \cdot W_r} \quad (\text{A.10})$$

$$I_v = \frac{(W_r + W_{\text{inf}}) \cdot h_r^3}{6} - Y_v^2 \cdot W_r \cdot h_r \quad (\text{A.11})$$

$$Y_{cc1} = \frac{\frac{b \cdot t_c^2}{2} + n \cdot A_s \cdot d + W_r \cdot h_r \cdot \frac{b}{C_s} \cdot (Y_v + t_c)}{b \cdot t_c + n \cdot A_s + W_r \cdot h_r \cdot \frac{b}{C_s}} \quad (\text{A.12})$$

$$I_{nagr} = \left[\frac{b \cdot t_c^3}{12} + b \cdot t_c \cdot \left(Y_{cc} - \frac{t_c}{2} \right)^2 \right] + \left[n \cdot I_{sd} + n \cdot A_s \cdot Y_{cs}^2 \right] + \left[\left(I_v + W_r \cdot h_r \cdot (Y_v + t_c - Y_{cc})^2 \right) \cdot \frac{b}{C_s} \right] \quad (A.13)$$

Donde: $n = \frac{E_{sd}}{E_c}$

$$S_{sup\ nagr} = \frac{I_{nagr}}{Y_{cc1}} \quad (A.14)$$

$$S_{inf\ nagr} = \frac{I_{nagr}}{d - Y_{cc1}} \quad (A.15)$$

Donde:

- d : Peralte de la losa compuesta.
- I_v : Inercia del concreto en un valle.
- I_{nagr} : Inercia de la losa compuesta en el estado elástico no-agrietado.
- $S_{inf\ nagr}$: Módulo de sección compuesta a tracción de la losa en el estado elástico no agrietado.
- $S_{sup\ nagr}$: Módulo de sección compuesta a compresión de la losa en el estado elástico no agrietado.
- t : Altura de la losa compuesta.
- t_c : Altura de la sección de concreto por encima de la placa colaborante.
- Y_{cc1} : Distancia del eje neutro elástico al borde superior de concreto para el estado elástico no agrietado.
- Y_v : Distancia del centroide del concreto en un valle al nivel superior de la placa colaborante.

De la misma forma, es posible considerar un estado elástico agrietado de la losa compuesta, del cual se deducen las siguientes fórmulas:

$$Y_{cc2} = d \cdot \left(\sqrt{(n \cdot \rho)^2 + 2 \cdot (n \cdot \rho)} - (n \cdot \rho) \right) \quad (\text{A.16})$$

$$I_{agr} = \left[\frac{b \cdot Y_{cc}^3}{3} \right] + \left[n \cdot I_{sd} + n \cdot A_s \cdot Y_{cs}^2 \right] \quad (\text{A.17})$$

$$S_{sup agr} = \frac{I_{agr}}{Y_{cc2}} \quad (\text{A.18})$$

$$S_{inf agr} = \frac{I_{agr}}{d - Y_{cc2}} \quad (\text{A.19})$$

Donde:

- I_{agr} : Inercia de la losa compuesta en el estado elástico agrietado.
- $S_{inf agr}$: Módulo de sección compuesta a tracción de la losa en el estado elástico agrietado
- $S_{sup agr}$: Módulo de sección compuesta a compresión de la losa en el estado elástico agrietado.
- Y_{cc2} : Distancia del eje neutro elástico al borde superior de concreto para el estado elástico agrietado.

Una manera práctica para estimar rápidamente el módulo de la sección elástica superior e inferior de la losa compuesta podría ser considerando la siguiente fórmula:

$$I_e = \frac{I_{n-agr} + I_{agr}}{2} \quad (\text{A.20})$$

En el caso de requerir una estimación más cercana de la inercia equivalente podría usarse la Ecuación (2.51) de la Sección 2.6.3.

$$Y_{cc} = \frac{Y_{cc1} + Y_{cc2}}{2} \quad (\text{A.21})$$

$$S_{\text{sup}} = \frac{I_e}{Y_{cc}} \quad (\text{A.22})$$

$$S_{\text{inf}} = \frac{I_e}{d - Y_{cc}} \quad (\text{A.23})$$

Donde:

I_e : Inercia equivalente de la losa compuesta.

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

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

Y_{cc} : Distancia del eje neutro elástico al borde superior de concreto.

ANEXO B. PANEL FOTOGRÁFICO



Foto B.1 Estado inicial de la losa de $t=9.78\text{cm}$, $L=3.78\text{m}$ y perfil AD-900 calibre 22.

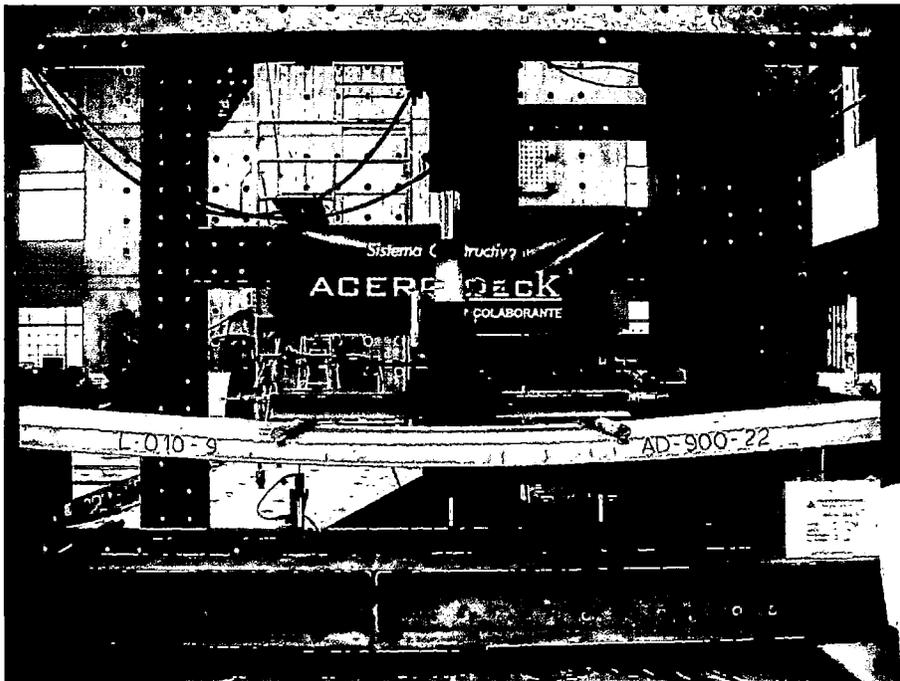


Foto B.2 Estado final de la losa de $t=9.78\text{cm}$, $L=3.78\text{m}$ y perfil AD-900 calibre 22.

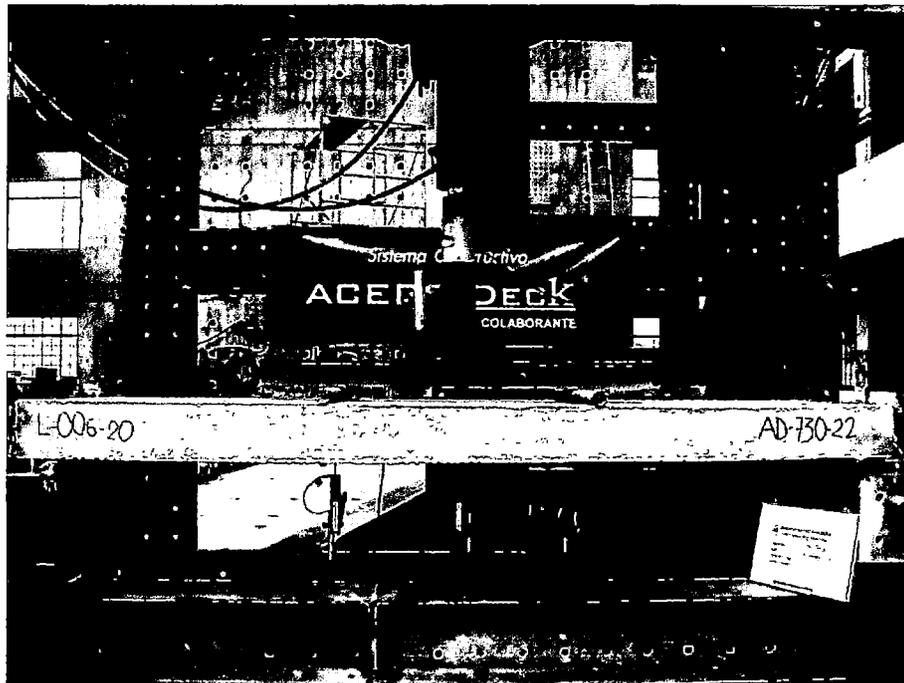


Foto B.3 Estado inicial de la losa de $t=19.25\text{cm}$, $L=2.76\text{m}$ y perfil AD-730 calibre 22.



Foto B.4 Estado final de la losa de $t=19.25\text{cm}$, $L=2.76\text{m}$ y perfil AD-730 calibre 22.



Foto B.5 Fluencia en la placa colaborante de perfil AD-730.



Foto B.6 Deslizamiento de la placa colaborante.



Foto B.7 Estado inicial de la losa de $t=11.23\text{cm}$, $L=2.76\text{m}$ y perfil AD-600 calibre 22.



Foto B.8 Estado final de la losa de $t=11.23\text{cm}$, $L=2.76\text{m}$ y perfil AD-600 calibre 22.



Foto B.9 Medición manual de las deformaciones obtenidas al final de los ensayos.

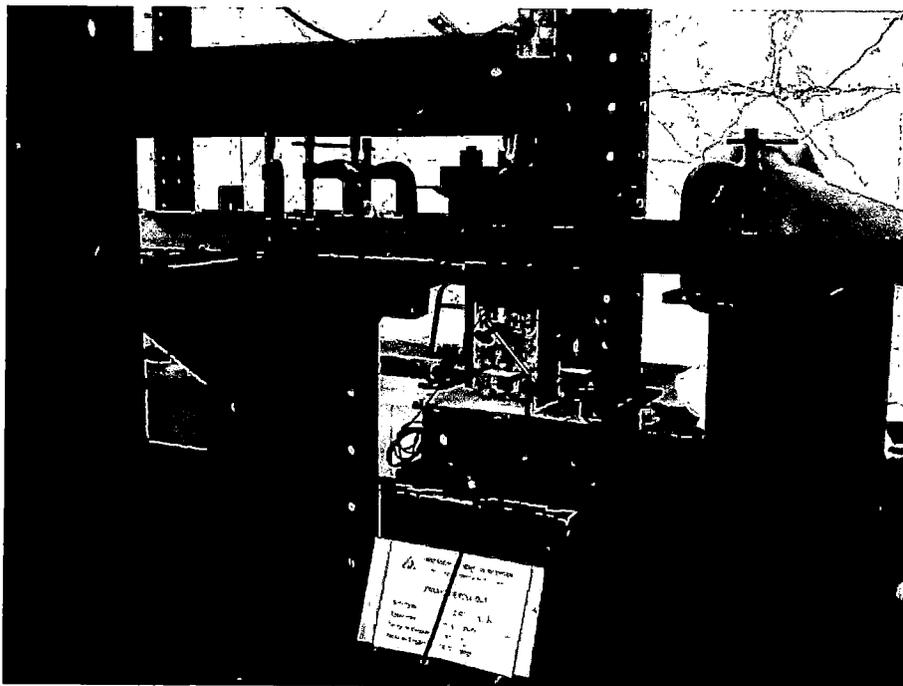


Foto B.10 Estado inicial de la probeta de 30x15x12cm y perfil AD-900 calibre 22.

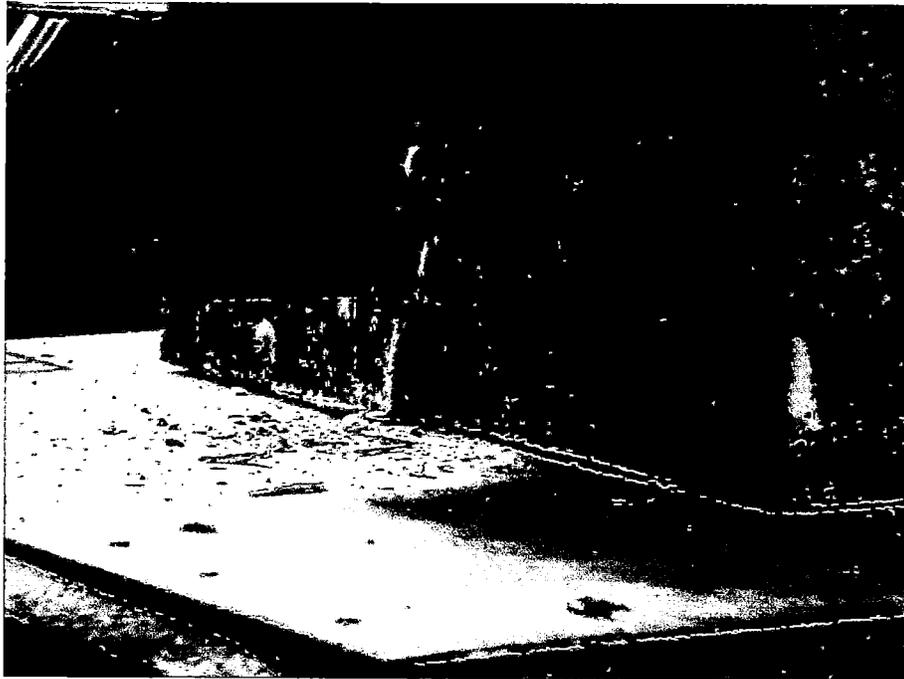


Foto B.11 Estado final de la probeta de 30x15x12cm y perfil AD-900 calibre 22.



Foto B.12 Estado de muescas al final del ensayo de *pull-out*. Perfil AD-900 calibre 22.



Foto B.13 Estado inicial de la probeta de 60x31.7x17cm y perfil AD-730 calibre 22.



Foto B.14 Estado final de la probeta de 60x31.7x17cm y perfil AD-730 calibre 22.



Foto B.15 Estado de muescas al final del ensayo de *pull-out*. Perfil AD-730 calibre 22.



Foto B.16 Estado inicial de la probeta de 45x22.7x13cm y perfil AD-600 calibre 22.



Foto B.17 Estado final de la probeta de 45x22.7x13cm y perfil AD-600 calibre 22.



Foto B.18 Estado de las muescas al final del ensayo de *pull-out*. Perfil AD-600 calibre 22