



UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA

ÁREA DE LA ENERGÍA, LAS INDUSTRIAS Y LOS
RECURSOS NATURALES NO RENOVABLES



Instituto Superior Politécnico
José Antonio Echeverría

cujae

El Rol de la Prefabricación Abierta y el Pretensado y su potencial dentro del Sector de la Vivienda Social.

**Una Propuesta para la solución del Sistema Estructural Horizontal de la
Vivienda**



**TESIS EN OPCIÓN AL GRADO DE MAGÍSTER EN CONSTRUCCIÓN CIVIL Y
DESARROLLO SUSTENTABLE. MENCIÓN: “VIVIENDA DE INTERÉS SOCIAL”**

AUTOR: Ing. Bolívar Hernán Maza

DIRECTOR: Dr. Ing. Julio Alberto Hernández Caneiro

Loja. 2013

MSc. ING. Jorge Gahona Pacheco

COORDINADOR DEL PROGRAMA DE MAESTRIA

MAESTRÍA EN CONSTRUCCIÓN CIVIL. MENCIÓN "VIVIENDA DE INTERÉS SOCIAL"

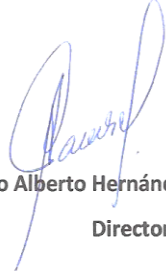
UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA

Estimado Colega:

Me dirijo a Ud. en mi condición de Director de la Tesis desarrollada por el Aspirante Ing. Bolívar Hernán Maza, con el interés de ofrecer mi consentimiento para autorizar la Presentación y Defensa del Trabajo titulado **"EL ROL DE LA PREFABRICACIÓN ABIERTA Y EL PRETENSADO Y SU POTENCIAL DENTRO DEL SECTOR DE LA VIVIENDA SOCIAL. UNA PROPUESTA PARA LA SOLUCIÓN DEL SISTEMA ESTRUCTURAL HORIZONTAL DE LA VIVIENDA"**

Luego de realizar una minuciosa revisión del documento final de la Tesis intuyo represente un instrumento técnico de inestimable valía para la Provincia de Loja y quizá el resto de Ecuador.

Refleja además el arduo trabajo desplegado por el Aspirante y su aptitud para incorporarse a temas de Investigación – Desarrollo (**I&D**), como resultado de la formación adquirida como cursante del Programa que acompañó durante dos años.



Dr. Ing. Julio Alberto Hernández Caneiro

Director de la Tesis

Febrero del 2013

AUTORÍA

Yo, Bolívar Hernán Maza declaro ser autor del presente trabajo de tesis y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos de posibles reclamos o acciones legales, por el contenido de la misma.

Adicionalmente acepto y autorizo a la Universidad Nacional de Loja, la publicación de mi tesis en el Repositorio Institucional-Biblioteca Virtual.

Autor: Ing. Bolívar Hernán Maza



Cédula: 1102295761

Fecha: Loja, 11-04-2013

Dedicatoria

Tomo palabras ejemplares de hombres referentes de la humanidad, “no más transferencia al tercer mundo de estilos de vida ni hábitos de consumo que arruinan el medio ambiente y la vida humana”; y estos modestos conocimientos adquiridos a lo largo de esta maestría, vayan para mi patria y a favor de mi pueblo.

*Dedico entonces este trabajo al Presidente Fidel
Alejandro Castro Ruz*

Agradecimiento

A toda mi familia que supo sostener mis fuerzas para culminar con esta modesta contribución, muy en especial a mi Esposa e hijos que me inspiraron siempre a lo largo de este camino y no me permitieron desmayar.

A todos mis colegas, que me ofrecieron la oportunidad de conocerles mejor.

A todo el equipo de docentes que ofrecieron lo mejor de sí para que cada uno de nosotros fuéramos mejores profesionales, al servicio de nuestra Ciudad y País.

A mi Tutor

TABLA DE CONTENIDO

EPÍGRAFE	DESCRIPCIÓN	Pág.
	Dedicatoria	
	Agradecimiento	
	Índice o Tabla de Contenido	
	RESUMEN/ABSTRACT	
INTRODUCCIÓN		
I.1	Antecedentes	1
I.2	Situación Problemática	1
I.3	Problema de Investigación	2
I.4	Objeto de la Investigación	3
I.5	Objetivo General	5
I.6	Objetivos Específicos	5
I.7	Premisas o Hipótesis	6
I.8	Estructura del Trabajo	6
CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO		
1.1	Estado del Arte	7
1.2	Metodología de la Investigación. Métodos y Técnicas empleadas.	12
1.3	Alcance de la Investigación	15
1.4	Resultados de la Investigación	16
1.5	Efectos e Impactos de la Investigación	17
1.6	Divulgación de los Resultados	17
CAPÍTULO 2: LA PREFABRICACIÓN Y EL PRETENSADO ENFOCADOS A LOS SISTEMAS ESTRUCTURALES DE LOSAS DE HORMIGÓN		
2.1	La Prefabricación como proceso de Industrialización de la Construcción	19
2.2	El Pretensado como alternativa de mejorar la aptitud de los elementos estructurales de hormigón	23
2.3	Sistemas Constructivos para losas de hormigón	30
2.4	Sistemas Constructivos Prefabricados registrados en Ecuador para la ejecución de Entrepisos y Cubiertas	33
2.4.1	Descripción del Sistema NOVALOSA	33
2.4.2	Descripción del Sistema hormi2	36
2.4.3	Descripción del Sistema PLYCEM	43
2.5	Experiencia Internacional en la solución de placas de hormigón mediante la Prefabricación	44
2.5.1	Losa Hueca Pretensada “Spiroll” (LS)	44
2.5.2	La Losa Nervada	48
2.6	Prefabricación Alternativa para la solución de placas de hormigón	52
2.6.1	Sistemas de Forjados Unidireccionales (Vigueta y Bovedilla)	53
2.6.2	Soluciones sustentables de Entrepisos y Cubiertas	58
(A)	Vigueta y Dovelas	58
(B)	Losa Cajón Pretensada	60
(C)	Prelosa PPCC	

CAPITULO 3: ESTUDIO DE LA PRELOSA PPCC. ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y TECNOLOGÍA DE PRODUCCIÓN

3.1	Introducción	63
3.2	Descripción de la prelosa PPCC	65
3.2.1	Dimensionamiento y propiedades geométrico - mecánicas de la sección transversal de la prelosa	67
3.2.2	Tipología de Armado	68
3.3	Pérdidas de tensión en el acero pretensado	70
3.3.1	Características geométricas de la sección transversal	72
3.3.2	Secciones a verificar	72
3.3.2.1	Determinación de la longitud de transferencia en la prelosa	74
3.3.2.2	Evaluación del momento flector originado por la carga concomitante en las secciones a verificar	76
3.3.3	Evaluación de la pérdida instantánea debida al Acortamiento Elástico del hormigón	77
3.3.4	Evaluación de la pérdida diferida debida a la Fluencia del hormigón	82
3.3.5	Evaluación de la pérdida diferida debida a la Retracción del hormigón	85
3.3.6	Evaluación de la pérdida diferida debida a la Relajación de esfuerzo	86
3.3.7	Coeficientes para estimar las pérdidas iniciales y diferidas	87
3.4	Comprobación de la Prelosa en el instante del destense	88
3.4.1	Tensiones límites impuestas al hormigón durante el destense	88
3.4.2	Evaluación de las tensiones normales	89
3.4.3	Aceptación o rechazo de la tipología	94
3.5	Principios generales de cálculo	95
3.5.1	Etapas de análisis de la prelosa	95
3.5.2	Estudio de la etapa de construcción de la carpeta	96
3.5.3	Estudio de la etapa de explotación de la losa	98
3.5.4	Enfoque del modelo a los Estados Límites	100
3.6	Análisis de la etapa de vaciado de la carpeta. Cálculo del Apuntalamiento	101
3.6.1	Determinación de la cantidad de puntales para asegurar el Estado Límite de Resistencia a Flexión	103
3.6.2	Determinación de la cantidad de puntales para asegurar el Estado Límite de Resistencia a Cortante	108
3.6.3	Determinación de la cantidad de puntales para asegurar el cumplimiento de las Tensiones Normales	109
3.6.4	Determinación de la cantidad de puntales para asegurar el cumplimiento de la Flecha	112
3.7	Análisis de la etapa de explotación. Cálculo de la Sobrecarga Máxima	116
3.7.1	Determinación de la sobrecarga impuesta para asegurar el Estado Límite de Resistencia a Flexión	117
3.7.2	Determinación de la sobrecarga impuesta para asegurar el Estado Límite de Resistencia a Cortante	121
3.7.3	Determinación de la sobrecarga impuesta para asegurar el cumplimiento de las Tensiones Normales	122
3.7.4	Determinación de la sobrecarga impuesta para asegurar el cumplimiento de la Flecha	123
3.8	Tecnología de producción de la prelosa	125
3.8.1	La planta para la ejecución de la prelosa PPCC . Secuencia tecnológica	125
3.8.2	Secuencia de operaciones en una Planta Típica de producción de la prelosa	131
3.8.3	Criterios generales para la concepción del patio de producción de un prototipo de Planta	131

3.9	Conclusiones Parciales del Capítulo	134
-----	-------------------------------------	-----

CAPÍTULO 4: VALIDACIÓN ECONÓMICA DEL PRODUCTO PPCC Y SU COMPETITIVIDAD EN EL MERCADO REGIONAL

4.1	Introducción	136
4.2	Evaluación de los Costos Directos de Materiales	137
4.2.1	Losa Maciza de 15cm	137
4.2.2	Losa Alivianada de 15cm	139
4.2.3	NOVALOSA de 15cm	140
4.2.4	PPCC	140
4.3	Conclusiones Parciales del Capítulo	142

CAPÍTULO 5: ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS Y CONCLUSIONES FINALES

5.1	Resultados Finales. Análisis	143
5.2	Información ofrecida por las Tablas de Selección	144
5.2.1	Cómo emplear las Tablas de Selección	144
5.3	Conclusiones Finales	152
5.4	Recomendaciones	154
	Bibliografía	

ANEXOS

ANEXO 1	ESTUDIO PARAMÉTRICO PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE LA PRELOSA
ANEXO 2	SELECCIÓN DE LA TIPOLOGÍA ÓPTIMA DE SECCIÓN TRANSVERSAL DE LA PRELOSA
ANEXO 3	PROPUESTAS DE ARMADO DE LA PRELOSA
ANEXO 4	EVALUACIÓN DE LAS PÉRDIDAS DE PRETENSADO
ANEXO 5	COMPROTAMIENTO DE LA PRELOSA. ELEMENTOS TEÓRICOS PARA EL ENSAYO FÍSICO DEL ELEMENTO

RESUMEN/

La investigación se adentra en una variante de elemento estructural para la solución de los sistemas de losas, tanto de entrepisos como de cubierta. Se trata de una propuesta que procura utilizar las bondades de la prefabricación y también del pretensado, sin descuidar su competitividad económica, pues el fin es ofrecer a los segmentos de menores ingresos la posibilidad de construir sus viviendas con el empleo de elementos estructuralmente aptos y que garanticen una durabilidad adecuada. A este elemento se le ha llamado **PPCC** y la intención fue ofrecer un Catálogo (Tablas de Selección) que permita decidir la mejor variante de losa a emplear en cada situación particular de carga y luces, sin que el usuario de la tecnología tenga que realizar cálculo estructural alguno.

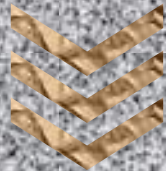
ABSTRACT/

The research deals with an interesting suggestion of structural element for the solution of the slabs systems, so much of floors as of cover. The new element take advantage or kindness of the Precast and Prestressed, without neglecting their economic competitiveness, because the goal is to offer to the segments of smaller revenues, the possibility to build its housings with the employment of a new structurally elements with resistance and durability appropriate. This element has been called **PPCC** and the purpose of the research is to offer a Catalog (Tables of Selection) that allows deciding the best slabs variant to use in each particular situation of load and span, without the user of the technology has to carry out structural calculation.

**TECNOLOGIA DE
PRODUCCION
DEL SISTEMA IMS**



INTRODUCCIÓN



UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA

ÁREA DE LA ENERGÍA, LAS INDUSTRIAS Y LOS RECURSOS
NATURALES NO RENOVABLES

I.1) ANTECEDENTES

La satisfacción plena de las necesidades de vivienda continúa siendo una asignatura pendiente para los gobiernos en todos los confines del planeta, incluyendo a los países desarrollados, y a pesar del tiempo transcurrido en la búsqueda de su solución, como también del reconocimiento de algunas experiencias interesantes puestas en práctica en numerosos países, incluyendo al propio Ecuador, lo que hoy se observa es un incremento desmedido de esta necesidad, que agudiza cada vez más el panorama. Sin embargo, es muy frecuente que la solución a esta creciente escasez de vivienda se le enfoque con un carácter asistémico, ignorando el nexo entre las diferentes variables que intervienen en dicha solución, a saber: las de tipo económica, social, ecológico, psico-perceptual, tecnológico y, además, científico.

Esta investigación incursiona especialmente en la **variable tecnológica**, aprovechando las innovaciones que se derivan de los avances científicos que tienen lugar en el sector de la construcción, esencialmente aquellos que se relacionan con los procesos enfocados a su industrialización (**prefabricación**), unido a la introducción de precompresiones controladas al hormigón mediante la técnica del **pretensado** con el interés de mejorar la aptitud en cuanto a resistencia y durabilidad de los elementos estructurales que aquí se analizan. En tal sentido, estimulado por los temas abordados en la *Maestría en Construcción Civil y Desarrollo Sustentable. Mención “Vivienda de Interés Social”*, coordinada por la Honorable Universidad Nacional de Loja en unión estratégica con el Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría”, de La Habana, Cuba, y convencido del papel de la ciencia y la técnica al servicio de la colectividad, el autor, como profesional del sector de la construcción, decide atender de manera priorizada esta problemática, intentando concebir soluciones que abaraten sus costos y acorten sus períodos de ejecución.

I.2) SITUACIÓN PROBLÉMICA

En el Ecuador es limitado aun el empleo de la **prefabricación** y el **pretensado** dentro de los proyectos de vivienda, aunque se conoce de la experiencia en obras de otras características que enaltecen la ingeniería nacional. La prefabricación puede exigir una inversión inicial fuerte, mientras que el pretensado se ha concebido básicamente para obras de ingeniería de gran escala y envergadura, en las que tanto luces como cargas no aconsejan el empleo del hormigón armado.

Quizá estas dos razones hayan representado un freno para su introducción a escala de los proyectos de vivienda, desconociendo que es posible concebir un tipo de industrialización de los procesos que resulte viable desde el punto de vista económico, pero más importante aun, que los principios y fundamentos del pretensado pueden ser aplicados con creatividad sin requerir de los costosos equipos de tesado (gatos) que exige tradicionalmente la técnica, y que combinadas ambas (prefabricación y pretensado), se puedan concebir soluciones mediante elementos estructurales que eviten o atenúen el empleo de la madera en la construcción de entrepisos y cubiertas dentro de los programas de viviendas con criterios de sustentabilidad.

Tan siquiera los siguientes dos elementos pueden resultar estimulantes para considerar al **pretensado** en estos programas. En primer lugar, *el mercado fija en la actualidad precios unitarios del acero de alto límite elástico (requerido por el pretensado), muy similares a los del acero natural u ordinario para hormigón armado*; en segundo lugar, a igualdad de las condiciones básicas de diseño (carga, luz y condiciones de apoyo), *el empleo del pretensado puede llegar a reducir en cuatro veces el área de acero que se requeriría en las soluciones tradicionales de hormigón armado*. Siendo así, obvias razones de índole meramente económicas justificarían la

introducción de la técnica, especialmente en la actualidad cuando el precio del acero se ve incrementado a causa de los propios precios del petróleo en el mercado internacional.

En definitiva, la situación problemática de esta investigación se enmarca en:

“La búsqueda de nuevas tecnologías de construcción para la solución del elemento estructural de entepiso y cubierta, que permitan introducir algún grado de prefabricación y que a su vez consideren diseños que recurran al pretensado, aceptando el reto de la necesaria transferencia tecnológica que caracteriza al mundo moderno”

I.3) PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

La investigación se enfocó a la exploración de **nuevas soluciones de elementos estructurales para resolver los sistemas de entepiso y cubierta en vivienda**, que puedan coexistir con las que tradicionalmente se vienen empleando en el Ecuador, y en especial en la Ciudad de Loja. Las propuestas que se analizaron partieron de las siguientes premisas:

- ☞ Introducción de la semi prefabricación mediante Plantas de pequeño y mediano porte que no requieran de elevadas inversiones iniciales, y permitan a su vez optimizar el tiempo de ejecución de las obras.
- ☞ Reducción del empleo de madera en encofrados durante el proceso de ejecución de los entepisos y cubiertas en viviendas.
- ☞ Empleo del preesfuerzo para reducir los costos directos de acero y aumentar la durabilidad de los elementos que se analizan.

La solución al problema identificado exigió responder a las siguientes interrogantes generales, ya dentro del proceso de investigación:

- 1) ¿Se pueden seleccionar tipologías de sección para los elementos que se produzcan que permitan su intercambiabilidad entre el entepiso y la cubierta, pero que además puedan ser intercambiados de un tipo a otro de proyecto de vivienda con sólo respetar la modulación?
- 2) ¿Cómo introducir la tensión inicial que se requiere en el acero de alto límite elástico prescindiendo de los costosos gatos, y a la vez aplicar esta tensión sobre secciones que correspondan a elementos que puedan ser manipulados sin requerir de equipos de izaje?
- 3) ¿A qué diseño debe responder la **Planta de Prefabricado** que se proponga de manera que pueda asegurar un flujo de producción que haga posible amortizar su inversión al más breve tiempo, y que a la vez incluya lechos de tesado, equipos de introducción de tensión (gatos), aparatos de anclaje, equipos de corte, etc., que faciliten la producción de diferentes tipologías de elemento?

La respuesta a estas interrogantes representó el hilo conductor de las pesquisas.

I.4) OBJETO DE LA INVESTIGACIÓN

Luego de haber analizado diferentes tipologías de elementos para la solución estructural de entresijos y cubiertas, algunas de las cuales se describen más adelante dentro del Capítulo II, en la primera etapa del proceso de investigación se decidió centrar la atención en las dos soluciones que parecieron más pertinentes al contexto de la región.

Se trata de la losa **LCP**¹, y de la prelosa **PPCC**², ambas concebidas a partir de los principios de la **PREFABRICACIÓN ABIERTA** (defendiendo la intercambiabilidad del elemento entre los diferentes diseños de vivienda que se dan en la región, especialmente cuando ellos se trabajen a partir de un micromódulo de 250mm para el dimensionamiento de los espacios interiores), y recurriendo además al **PRETENSADO** mediante el empleo de aceros de alto límite elástico para su refuerzo. La sección transversal de ambas tipologías se ilustra en la **Figura I.1**.

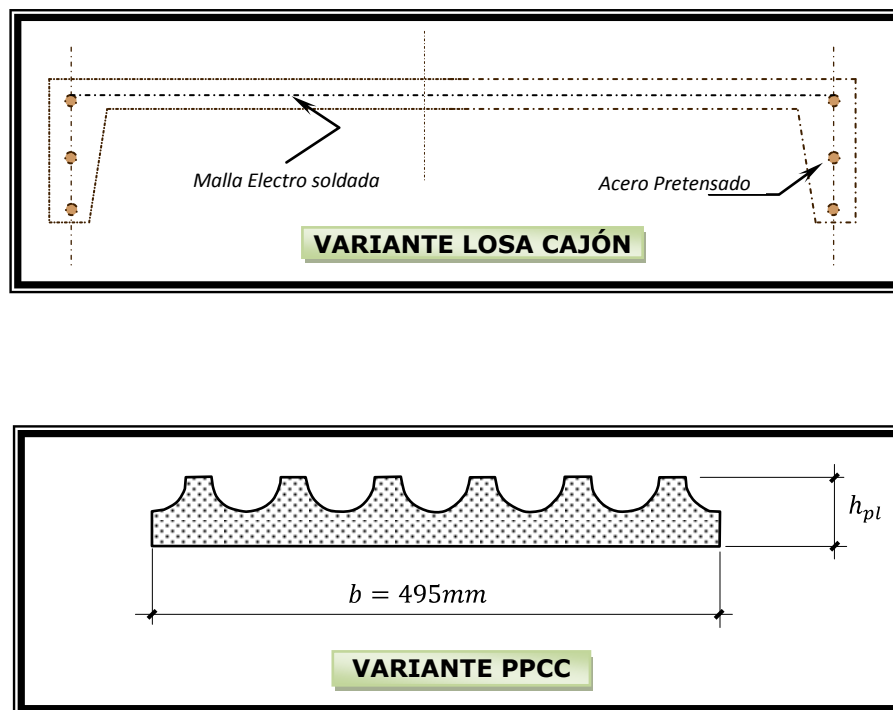


Fig. I.1. Tipología de la sección transversal de las variantes de losa que se seleccionan.

Ya dentro de la segunda etapa de la investigación, y tras la consulta a algunos Expertos en los temas de vivienda, se decide concentrar toda la atención a la variante **PPCC**, la que tuvo una buena aceptación durante la celebración de la **XXXIII JORNADAS SUDAMERICANAS DE INGENIERÍA ESTRUCTURAL** celebrada en Santiago de Chile, en mayo 2008, cuando el Autor presentara un Trabajo en este Evento que recibió el beneplácito de los Organizadores.

No se trata de que esta variante sustituya a las soluciones que tradicionalmente se han empleado en el Cantón de Loja, sino que coexista con ellas a partir del reconocimiento de sus

¹ LCP son las siglas de Losa Cajón Pretensada.

² PPCC resultan ser las siglas de Prelosa Pretensada con Carpeta Colaborante

fortalezas y debilidades, para contribuir modestamente a mejorar la eficiencia y eficacia de los programas de vivienda de interés social, incluso en aquellos que se orienten a asentamientos urbanos destinados a estratos sociales de mayores posibilidades económicas de la región.

En resumen, el estudio detallado de la tipología **PPCC** se convierte en el **OBJETO DE LA INVESTIGACIÓN**.

PREGUNTAS QUE CONDUJERON LA INVESTIGACIÓN

- a) *¿Están creadas las condiciones técnicas y humanas en la región de Loja para la introducción y expansión de la prefabricación a mediana escala?*
- b) *¿Qué alternativa resultaría más rentable desde un punto de vista financiero?*
 - ☞ *¿La concepción de una pequeña **Planta de Prefabricación** con posibilidades migratorias como para acercarla tanto cuanto sea posible a los asentamientos que se desean construir?, o*
 - ☞ *¿Una Planta estática situada en las proximidades de las canteras que suministrarían los áridos, en una zona que cuente ya con una adecuada red vial de acceso?*

Es cierto que esta última variante permite mejorar sistemáticamente las condiciones técnicas y humanas de la instalación (recuérdese que se debe contar siempre con bancos adecuados para la aplicación del pretensado), facilita la introducción de los avances científicos que se vayan experimentando, favorecería la estabilidad laboral del personal que se contrate, etc., pero la decisión mucho dependería de los costos de transporte, lo mismo de los materiales para la elaboración del hormigón y del propio acero hacia la Planta, como también de las piezas ya elaboradas hacia la obra.

- c) *¿Resulta posible concebir una solución mecánica sencilla y a la vez barata que haga posible estirar alambres de alto límite elástico para aprovechar las ventajas del preesfuerzo, sin requerir de los costosos gatos que tradicionalmente emplea esta técnica?*

La esencia del sistema que se investigó, y del que se tiene muy buena experiencia en Cuba, consiste en aplicar mediante un simple **aditamento mecánico diseñado a partir de un eje sin fin roscado en toda su longitud**, una tensión a los alambres de alto límite elástico que pueda mantenerse por medio de aparatos de anclaje, previo al vaciado del hormigón, evadiendo así el empleo de gatos de tesado que resultan inobjetablemente más caro en el mercado. Los aparatos de anclaje pueden ser recuperados.

Esta tensión, transferida luego que el hormigón ha sido vaciado y endurecido lo suficiente como para alcanzar una resistencia que garantice la adherencia, y mantener así estirado el alambre, somete al hormigón a una fuerza de compresión que evita que se agriete cuando esté sometido a cargas de tracción o de flexión, dado que los esfuerzos de tracción que estas cargas generan pueden llegar a anularse o atenuarse por la compresión previa que el preesfuerzo le transfirió a la pieza.

No se debe perder de vista que el acero de alto límite elástico utilizado en pretensado tiene hoy un costo del mismo orden que el del acero ordinario, y presenta una resistencia tres veces mayor, con lo cual se ahorra acero y recursos financieros.

- d) *¿Cuáles han de ser las dimensiones de la losa PPCC para garantizar con la mejor economía un comportamiento estructural eficiente, y un peso que asegure su manipulación sin el concurso de equipos de izaje?*

La solución general se sustenta en el principio de las secciones compuestas. Consiste en una prelosa pretensada sobre la que luego se vierte hormigón in situ para completar su sección resistente. Las dimensiones de la prelosa deben ser suficientemente reducidas como para asegurar un peso que permita luego manipularlas sin requerir equipos de izaje, pero además, una vez colocadas sobre los elementos principales del sistema estructural horizontal, servirán de encofrado para el vaciado de la carpeta y eliminaría prácticamente el empleo de madera, salvo en aquellas situaciones que requieran apuntalamientos temporales durante la etapa de ejecución de la carpeta.

- e) *¿Cuál será la viabilidad social, técnica, económica y ambiental de la producción masiva del elemento seleccionado para su empleo en los programas de vivienda de interés social para la región de Loja?*

I.5) OBJETIVO GENERAL

Investigar, discutir y analizar las fortalezas y debilidades de la prelosa pretensada con carpeta colaborante **PPCC**, como tipología estructural para los sistemas de entrepiso y cubierta dentro de los programas de vivienda de interés social, especialmente para la Ciudad de Loja, centrando el estudio al:

- ☞ Análisis estructural de la variante
- ☞ Diseño de la Planta de Producción para fabricarlas.

I.6) OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Estudiar y caracterizar sistemas estructurales que se emplean nacional e internacionalmente en la solución de entrepisos y cubiertas en viviendas, básicamente aquellos que se conciben a partir de la prefabricación en plantas industriales de mediano y pequeño porte.
2. Realizar un estudio paramétrico mediante el cual se pueda definir las dimensiones del elemento estructural que se estudia (**PPCC**) de manera que resulta un elemento estructuralmente apto, y cuyo peso permita sea manipulado prescindiendo de equipos especiales de izaje.
3. Partiendo de una propuesta inicial de refuerzo para este elemento, decidir cuáles de las tipologías de acero que se propongan (en cantidad y posición), aseguran las bases de diseño de los estados límite de resistencia y servicio, lo mismo durante la etapa de vaciado de la carpeta, como durante la explotación de la losa que resulte de su empleo.
4. Ofrecer un Catálogo de Selección de la prelosa **PPCC** que permita, mediante el empleo de Tablas que han de construirse como resultado fundamental del Trabajo, decidir la

variante más aconsejable para las diferentes condiciones de carga y luces que puedan presentarse.

5. Ofrecer criterios generales para la concepción de la Planta de Producción de este elemento y evaluar su rendimiento, con el apego a los principios fundamentales de la industrialización, incluyendo el diseño de sus espacios para asegurar un volumen de producción previamente acordado.
6. Evaluar el costo de producción del m² de losa ejecutada con el elemento **PPCC** y compararlo con el de las soluciones que más se emplean en la Ciudad de Loja.

I.7) PREMISAS O HIPÓTESIS

A pesar de la limitada experiencia que actualmente se tiene en la Ciudad de Loja en cuanto al empleo de la prefabricación en el sector de la construcción, especialmente en el sector de la vivienda, como también con el uso del preesfuerzo para mejorar los índices de costos y la durabilidad de los elementos de hormigón, la investigación parte del siguiente presupuesto:

“Es posible en el contexto regional y nacional aplicar los principios de la prefabricación y el pretensado a la ejecución de un novedoso elemento estructural que mejore la efectividad de los programas de viviendas con criterios técnicos bien fundamentados y probados internacionalmente”

I.8) ESTRUCTURA DEL TRABAJO

- ☞ Dedicatoria
- ☞ Agradecimiento
- ☞ Índice o Tabla de Contenido
- ☞ RESUMEN/ABSTRACT (Español e Inglés)

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO

CAPÍTULO 2: LA PREFABRICACIÓN Y EL PRETENSADO ENFOCADOS A LOS SISTEMAS ESTRUCTURALES DE LOSAS DE HORMIGÓN

CAPÍTULO 3: ESTUDIO DE LA PRELOSA PPCC. ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y TECNOLOGÍA DE PRODUCCIÓN

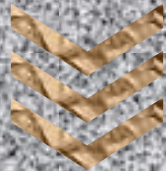
CAPÍTULO 4: VALIDACIÓN ECONÓMICA DEL PRODUCTO PPCC Y SU COMPETITIVIDAD EN EL MERCADO REGIONAL

CAPÍTULO 5: ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS Y CONCLUSIONES FINALES

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

CAPÍTULO I



MARCO TEÓRICO



UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA

ÁREA DE LA ENERGÍA, LAS INDUSTRIAS Y LOS RECURSOS
NATURALES NO RENOVABLES

1.1 ESTADO DEL ARTE

El déficit de vivienda en el país continúa siendo en la actualidad muy alto, agudizándose cada vez más por el recrudescimiento de las economías familiares y la acumulación de un número cada vez mayor de insatisfacciones. Cifras oficiales confirman que son ya alrededor de 1 200 000 las viviendas que se requieren hoy para encontrar respuesta a esta problemática social, sin ignorar que esa cifra crece a razón de otras 60 000 por año.

Se reconoce que este problema está influenciado fundamentalmente por el alto costo de la construcción, traducido luego en un precio para la superficie unitaria construida bajo los patrones y estereotipos que tradicionalmente se han impuesto, que desborda las posibilidades reales de la inmensa mayoría de las familias ecuatorianas, especialmente aquellas que no llegan a ser beneficiadas por crédito alguno.

Ante la imposibilidad económica de las personas de menos recursos para construir su vivienda, unido a la inevitable emigración del campo hacia las ciudades, comienza a apreciarse una tendencia a la autoconstrucción que en la mayoría de los casos da la espalda a soluciones técnicamente viables, resultan ser de dudosa seguridad estructural y funcional, recurren al empleo de materiales sin las debidas prescripciones facultativas o de precario control, con un impacto ambiental pocas veces deseable, pudiendo llegar incluso a afectar el necesario equilibrio ecológico, y por demás, con soluciones inconsistentes para las redes técnicas, cuyas soluciones van más allá de la que corresponde al problema individual del inmueble.

Esta realidad justifica investigar nuevas alternativas para la construcción de viviendas que ofrezcan una respuesta de proyecto razonable, segura, funcional, técnicamente viable, y que en la medida de lo posible abaraten los costos y acorten los plazos de ejecución.

La **PREFABRICACIÓN** a pequeña escala, especialmente de los sistemas estructurales de la vivienda, lo mismo vertical que horizontal, parece ser una alternativa razonable para el Ecuador, pues su empleo en otros países así lo ha demostrado. Como técnica, la prefabricación es la forma de industrializar la construcción, heredándose así todas las ventajas y fortalezas de los procesos industrializados, a saber: humanización de las labores de ejecución, especialización de la mano de obra, incremento del control y mejora de la calidad del producto que se ofrece, y reducción de los plazos de ejecución dada la posibilidad de crear un stock de piezas ya fabricadas que sólo deben ser luego ensambladas en obra.

La documentación técnica revisada por el autor reconoce que la prefabricación requiere de una inversión inicial que no debe ignorarse, de cara a la construcción de una Planta “fabril” en la que se produzcan tales elementos. La existencia de una red vial que facilite tanto el suministro de los materiales hacia la Planta (cemento, áridos, acero, etc.), como el traslado de los elementos elaborados desde la Planta hacia la región de emplazamiento de la obra, unido a la necesidad de contar con equipos de transportación e izaje adecuados, son algunas premisas para el éxito del proceso, y cuando no confluyen adecuadamente se convierten en razones que pueden frenar su introducción.

Sin embargo, la propia revisión bibliográfica que se desarrollara refiere las bondades que puede ofrecer en numerosas ocasiones, no ya una Planta para la prefabricación a gran escala de elementos de considerable porte, sino de un tipo de industrialización del proceso que pueda ser ejecutado en una Planta local con un diseño, y bajo una concepción, que asegure un volumen de producción capaz de fabricar suficiente cantidad de piezas que pueda responder a la demanda local que se tenga, y empleando equipamientos e instrumental que pueda ser concebido por los propios especialistas locales, o adquiridos internacionalmente a costos razonables.

A continuación se expone una apretada síntesis de los criterios que ofrecen algunos de los autores que fueron revisados durante la profusa investigación bibliográfica que se realizara como antesala de esta investigación. Se ha decidido exponer sólo aquellas reflexiones que constituyen el “*leit motiv*” de la investigación, a saber: la conveniencia de intensificar los niveles de empleo de la **prefabricación** y el **pretensado** en la concepción de los proyectos de viviendas en el Ecuador, y particularmente en la provincia de Loja, sin descuidar su incidencia en la variable medioambiental como única alternativa de defender, fundamentalmente, lo que resulte sustentable para el entorno.

Maspons (1972)¹ refiere: “*La manufactura trajo aparejada la especialización del trabajo y con ello de los obreros, y representó un nuevo aumento de la productividad del trabajo. Es precisamente a partir de la evolución de la producción manufacturera con la introducción de la máquina herramienta, que se produce un vuelco en los esquemas organizativos de la producción, y es entonces que comienza el proceso conocido por industrialización de la producción..... La industrialización de la producción es, al mismo tiempo, mecanizar, producir en fábricas con los principios de la cadena fabril, producir grandes cantidades..... Puede entonces concluirse que la real industrialización de la producción de construcciones sólo se logrará poniendo en función de esta todos los adelantos de la Ciencia y la Técnica actuales.*”

Fernández García (1999)² señala que “*cuando se hacen reflexiones sobre economía de la construcción de viviendas se llega a racionalizaciones drásticas en los procesos de producción, las innovaciones de la construcción motivan a retomar la riqueza y sabiduría ancestral y dar paso a las piezas prefabricadas utilizadas en la subestructura como elementos portantes de carga, creando una tendencia a la solución económica habitacional*”. Considera que al construir viviendas en forma seriada y con el mayor número de componentes pre fabricados, el tiempo empleado es hasta el 67% menor con respecto a métodos tradicionales de construcción y uso de materiales. Y el tiempo es un recurso bien estimado.

Nilson (1999)³ manifiesta que una de las razones para los altos costos de vivienda es la elevada mano de obra in situ, considerada como parte de los procesos tradicionales de construcción. La industrialización se puede lograr produciendo en masa unidades repetitivas y estandarizadas como: columnas, vigas, **elementos de entepiso, de cubierta**, etc. Las ventajas más llamativas de la construcción prefabricada las resume de la manera siguiente: “*menor mano de obra por unidad ejecutada, uso de la mano de obra local no especializada, tiempos de construcción más cortos, mejor control de calidad.....mejor si los elementos prefabricados se refuerzan mediante el empleo del*

¹ Maspons, G., R., et. al. “**Prefabricación**” Ed. ENPES. La Habana. Cuba. **1972**. (pág. 1-5)

² Fernández G., David. “**Manual del Constructor; Sistema prefabricado para la construcción**”. Primera Edición. Málaga. España. Ediciones Daly S.L. Nuevas Bibliotecas de la Construcción. **1999**.

³ Nilson, Arthur H. “**Diseño de Estructuras de Concreto**” 12ma Ed. Mc Graw Hill. ISBN: 959-600-953-X. **1999** (pág. 14,15, 16, 29)

pretensado, técnica que consiste en aplicar un esfuerzo previo al acero antes de la fundición del hormigón, para luego de transcurrido un tiempo (quizá tres días) liberar las cuñas tensoras para que la pieza así diseñada se vea sometida a una compresión en algo más del 90% de su sección”.

Este mismo autor sostiene que la experiencia con estructuras prefabricadas demuestra que el costo no se incrementa y contribuye a mantener la integridad estructural en caso de cargas extraordinarias. Lo que significa que al aplicar carga a un elemento estructural pretensado, aun cuando el efecto de la tracción que origine la carga exterior haya vencido el efecto de la precompresión inicial, se sigue comportando la pieza como un elemento estructural de hormigón armado, ofreciendo alta seguridad y confianza en estructuras de aquel tipo.

Herrera (2000)⁴ sostiene que bajo condiciones adecuadas de diseño y construcción, es completamente factible utilizar en entresijos, total o parcialmente, piezas prefabricadas, dando mayor velocidad al proceso constructivo y disminuyendo los costos, pudiendo emplearse, además, elementos de cierres portantes y a la vez arquitectónicos. Los elementos de cierre portantes y de arquitectura se refiere a bloques que pueden ser estructuralmente resistentes a las cargas gravitatorias y ecológicas (viento y sismo), con la finalidad de ahorrar los revestimientos y estructuras verticales de hormigón armado, y consiguiendo así viviendas a bajo costo. Sugiere que la manipulación prevista de las piezas prefabricadas, por su peso y dimensiones, sea preferentemente manual en el caso de los programas de vivienda, evitando así equipos mecánicos; el tipo de junta de las piezas puede ser a tope, es decir, sin mortero entre ellas, mientras que las losas conformadas por plaquetas y viguetas actúan como un cuerpo estructural monolítico en el sentido horizontal y vertical, montada sobre paredes de mampostería estructural. En relación al empleo del pretensado, el mismo autor plantea *“tradicionalmente la técnica del pretensado se utiliza para salvar grandes luces a través de vigas, principalmente en la construcción de puentes..... Cuba, Bolivia, Paraguay son los países que han introducido el pretensado en la industria de la construcción de vivienda social”.*

Hernández Caneiro (2004)⁵ señala que la factibilidad de producción en masa de plaquetas, viguetas de H^oP^o para la construcción de losas de entresijo, cubierta y gradas, en tipologías de vivienda de interés social en la ciudad de Loja, se puede lograr a través de la industrialización en plantas de prefabricado. Sostiene que es viable el máximo aprovechamiento de la industrialización de la construcción, poniendo a disposición de la inversión a la mayor brevedad las piezas que se requieran, facilitando el control de calidad en los materiales y del proceso de construcción, logrando así, con la especialización de las labores, un incremento de la calidad global de la pieza. Define al H^oP^o como *“la imposición de compresiones al hormigón mediante la transferencia de tensiones controladas por el estiramiento o tesado de tendones de acero de alta resistencia; creando artificialmente en la sección, antes de la aplicación de las cargas exteriores o simultáneamente con ellas, un estado de tensiones que superpuesto a las tensiones debida a dichas cargas, originen un estado de tensiones que permanezca, para todos los estados de cargas, dentro de los límites que el hormigón pueda resistir indefinidamente”.* Referirse a la técnica del pretensado exige estirar al acero de refuerzo, lo mismo antes de hormigonar la pieza (pretesado), que a posteriori (postesado).

⁴ Herrera, V., A.M **“Manual de Construcción de Mampostería de Concreto”**. 2da Ed. Editorial ICPC. Medellín. Colombia. 2000. (pág. 14, 17)

⁵ Hernández, C., J.A **“Métodos Avanzados para el diseño del hormigón armado y pretensado”**. Monografía para el Módulo de Estructuras. Maestría en Construcción Civil y Desarrollo Sustentable. Mención Vivienda de Interés Social. Loja. Ecuador. 2004

En cuanto a la sostenibilidad medioambiental de los proyectos de construcción no debe ignorarse que son, en esencia, invasivos. La construcción exige de productos generalmente artificiales a los que se llega extrayendo de la naturaleza la materia prima, cuyo procesamiento demanda importantes volúmenes de energía, muchas veces generada a partir de los combustibles fósiles, cuyas emanaciones a la atmósfera está llegando a alarmar justificadamente a una parte importante de la humanidad. La ciencia y la tecnología propias del sector de la construcción deben enfrentar esta realidad con propuestas que disminuyan los volúmenes de hormigón, acero y madera, por sólo citar tres materiales, aun cuando sean cada vez más ambiciosos los programas de desarrollo de la infraestructura. La revisión bibliográfica confirmó que son profusas las investigaciones en esta dirección, y que numerosos autores la ubican en lugar prioritario.

En general se percibe un ambiente muy distante en la construcción de viviendas al interpretar los nuevos paradigmas de desarrollo. Hay quienes contribuyen eficazmente a la sostenibilidad de los asentamientos humanos considerando que el proceso de construcción y explotación de la vivienda no debe sobrepasar la capacidad de la biosfera para asimilar los efectos generados, otros desatienden el problema y contribuyen, quizá involuntariamente, a arruinar el medioambiente.

Acevedo (2001)⁶ señala que la producción y uso de cemento Pórtland afecta negativamente al medio ambiente, sobre todo si se tiene en cuenta que:

- Utiliza minerales no renovables
- Emite polvo a la atmósfera
- Produce desechos sólidos y líquidos
- La producción de una tonelada de cemento implica la emisión de 0.95 toneladas de CO₂, y con ello el efecto invernadero, de ahí la importancia de optimizar la cantidad de cemento en los elementos, lo que pudiera lograrse mediante la reducción de sus secciones resistentes, meta alcanzable con la introducción de la técnica del pretensado.

Conesa (1997)⁷ sostiene que la Evaluación del Impacto ambiental (EIA) es adaptativo si se incorpora en el estudio del proyecto, resulta agilizada por la información contenida en el plan; y si la sinergia del proceso de protección ambiental mediante la EIA es considerada como parte del plan del proyecto general.

Ante esta panorámica internacional resulta conveniente reflexionar acerca de la utilidad de considerar los cambios necesarios para llegar a introducir los conceptos de la prefabricación y el pretensado a la elaboración de elementos estructurales que dinamicen y hagan más efectivas las acciones contenidas en los programas de vivienda para el Ecuador, lo mismo los actuales, con las modificaciones que ello implicaría, que los prospectivos, enfocados ya como sistema. El autor considera que así como el país, la provincia de Loja está en condiciones de dar el cambio, abandonando los esquemas anquilosados de la construcción tradicional, que ha demostrado su ineficacia en la rápida y efectiva solución al completamiento del parque habitacional,

⁶ Acevedo, C. J. **“Materiales y Metodologías Alternativas”**. Monografía para el Posgrado en Estructuras y Materiales. Universidad Mayor de San Andrés. La Paz. Bolivia. 2001 (pág. 4-5)

⁷ Conesa Fdez. Vítora, V. **“Guía Metodológica para la Evaluación del Impacto Ambiental”**. 3ra Edición. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid. 1997. (pág. 28)



especialmente dentro de los programas de vivienda enfocados a los segmentos más necesitados de la sociedad ecuatoriana.

Heredia (1995)⁸ define al Cambio como “la acción y efecto de cambiar, “cambiar” es trocar o sustituir una cosa por otra, o mudar, variar, transformar. Cuando algo cambia, lo percibimos según la velocidad con que se realice tal transformación en relación con el tiempo que dura el cambio.....La aceleración de cambio es uno de los factores o fuerzas sociales de mayor importancia y menos entendidas. Conforme aumenta el ritmo de cambio, la longitud de la vida de los problemas-situaciones disminuye y así los problemas quedan sin vigencia a causa de la aceleración de los cambios y de igual forma aumentan en su complejidad. Se llega a la paradoja de que se tarda más en resolver un problema que este en desaparecer. Para muchos problemas, cuando se encuentra su solución, ya él no existe. El avance del conocimiento humano y de la tecnología son, respectivamente, motor y acelerador del cambio. En el pasado, el cambio ha tenido menor aceleración de lo que tiene en el presente y tendrá en el futuro. Cada vez en menos tiempo se produce un cambio mayor”.

Por tal razón esta investigación defiende el cambio hacia piezas estructurales prefabricadas, y cuando sea posible, además pretensadas, para la solución del sistema horizontal de entrepiso y cubierta, lo que permitiría hablar de la construcción en serie de viviendas con sólo respetar las reglas de esta técnica de industrialización:

- ☞ Normalización
- ☞ Tipificación
- ☞ Modulación

⁸ Heredia Scasso, R. “Dirección Integrada de Proyecto DIP” 2da Edición. Madrid. España. 1995

1.2 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN. MÉTODOS Y TÉCNICAS EMPLEADAS

En su praxis social el hombre se enfrenta a una serie de problemas que no puede resolver con los conocimientos ordinarios, como tampoco con el sentido común, y para solucionarlos se apoya en un conocimiento que le permita ir construyendo un sistema de ideas organizadas racionalmente y que incluye todo el bagaje teórico y práctico que le antecede. Por medio de él, transcendido el fenómeno, se identifican sus causas y las leyes que lo rigen.

Esta forma de la conciencia social que ha venido formándose históricamente y que constituye un sistema ordenado cuya veracidad se comprueba y se puntualiza constantemente en el curso de la práctica social, es lo que se ha denominado **ciencia**. Mientras tanto, el conocimiento científico se va estructurando cuando se hace ciencia mediante los trabajos de Investigación-Desarrollo (I&D) que pueden conducir a un producto final que mejore la calidad de vida de las personas.

El **conocimiento científico** es el resultado de una tarea de investigación en la cual se utilizan métodos generales y específicos con el objetivo de hallar estructuras generales o leyes de la realidad que permitan interpretar mejor los fenómenos que se estudian, y que redunde en resultados más fiables que cualquier otro modelo no científico que quiera explicar el mundo. El conocimiento científico se caracteriza por:

- ☞ Ser de tipo especial, con sus medios específicos, métodos y criterios. Trata de encontrar nuevos hechos y resultados y tiende a explicarlos mediante hipótesis, leyes y teorías ya existentes, o bien desarrollando para ello nuevas representaciones teóricas. Es sistemático.
- ☞ Con ayuda de las nuevas representaciones teóricas, conceptos y leyes se pueden predecir hechos y fenómenos aún no conocidos, así como explicar los hechos y fenómenos ya conocidos.
- ☞ Se controlan sus hipótesis con la ayuda de instrumentos y equipos especiales, los cuales han sido contruidos sobre la base de determinados principios teóricos.
- ☞ Debido a la sistematicidad, fundamentación y controlabilidad de las deducciones de la ciencia, esta se distingue por su mayor confiabilidad y verificabilidad.
- ☞ La confiabilidad y verificabilidad de los conocimientos científicos se garantizan mediante métodos especiales y generales de investigación.

El método investigativo que primó a lo largo de esta investigación fue el **Hipotético-Deductivo**, fundamentado en un **diseño no experimental con enfoque cualitativo de tipo transversal**, en el que las variables independientes no pueden ser manipuladas por el investigador al no poseer influencia sobre ellas. La **Figura 1.1** ilustra la variable dependiente como objeto central de la investigación (definir la solución óptima para el elemento estructural de entepiso o cubierta a emplearse en viviendas), y también las variables independientes que se han considerado (técnica de ejecución de tales elementos, y tipo de diseño, cada una con dos niveles). En esencia se trata de una investigación

sistemática y empírica porque ya las variables independientes se suceden (lo mismo las soluciones prefabricadas que in situ, como los diseños en hormigón armado que en pretensado, se dan actualmente en el diseño de losas de entrepiso y cubierta)

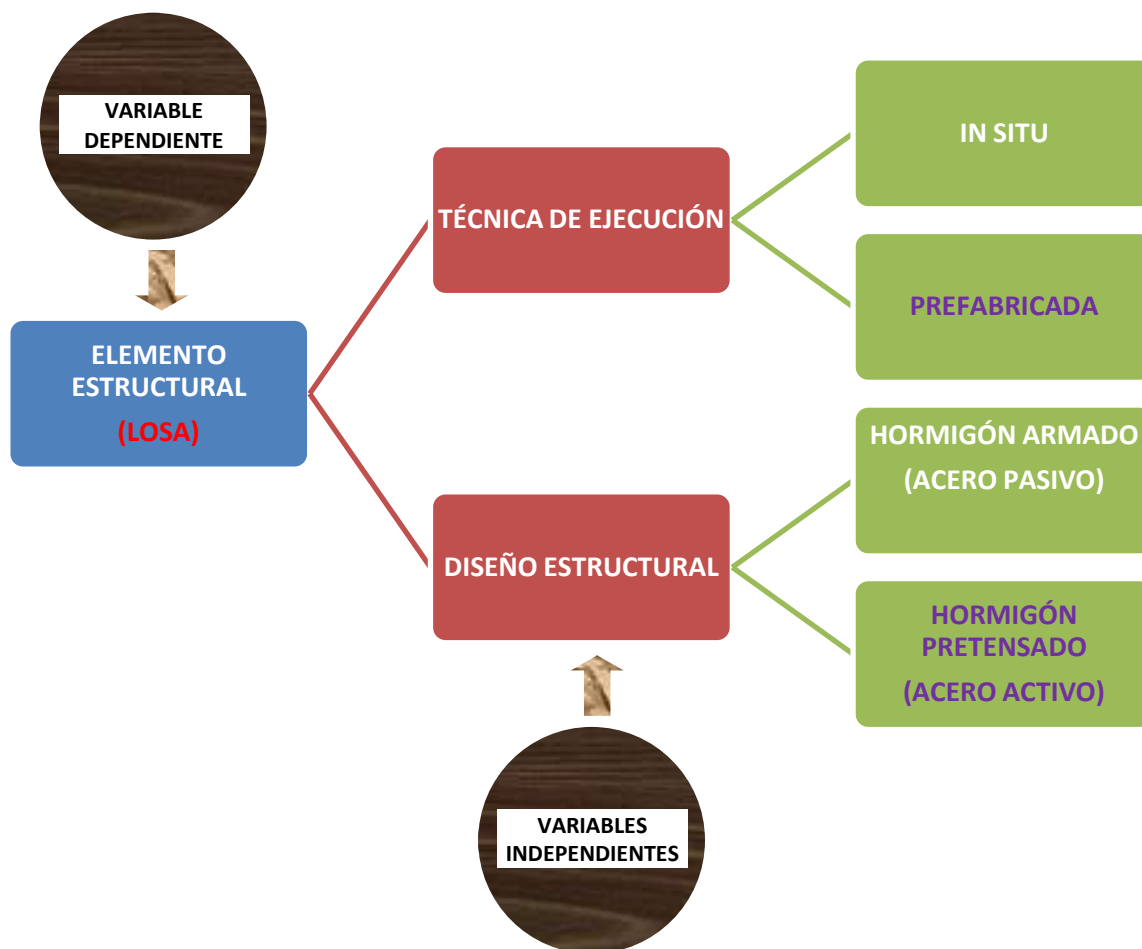


Fig. 1.1 Identificación de las Variables Independientes de la Investigación

Además, se trata de un diseño de **tipo transversal** porque se basó en el análisis de la situación problemática en un momento y en un tiempo dado, precisamente la actual situación de la provincia de Loja, con el propósito de describir las variables independientes y analizar su incidencia e interrelación en el momento actual. Queriendo ofrecer mayor precisión a la clasificación del tipo de diseño seguido, habría que agregar que es de tipo **transversal exploratorio** porque la intención fue comenzar a conocer cómo en el contexto actual del Ecuador, y en particular de la provincia de Loja, se manifiesta la respuesta que se da a la construcción de los entrepisos y las cubiertas en los programas de vivienda que se han desarrollado hasta la fecha, resumiéndose en el Capítulo II de la Tesis las experiencias de la región.

TÉCNICAS EMPLEADAS

Ya para garantizar el cumplimiento del Objetivo General de la Tesis, lo mismo que de sus Objetivos Específicos, se acompañó el método **Hipotético-Deductivo** con la lógica dialéctica para profundizar en el Objeto de Estudio, combinándolo con los métodos:

- Histórico- Tendencial.
- Lógico.
- Dialéctico.

La conjugación de todos ellos condujo a técnicas propias de las investigaciones dentro del campo de la ingeniería estructural, que se expresan mediante los siguiente presupuestos:

- ☞ Análisis y síntesis de todo el material bibliográfico y la información técnica que pudo recopilarse afín a los intereses de la investigación. Fueron revisados numerosos Artículos publicados en revistas técnicas, trabajos presentados en eventos, libros, monografías, apuntes de los cursos recibidos dentro de la Maestría, etc.
- ☞ La técnica de inducción – deducción permitió verificar las hipótesis que se formularon al inicio mismo de la investigación, lo que luego se refrenda en la Conclusiones Finales del Trabajo. Este método fue aplicado también para verificar la competitividad real de la variante **PPCC** a partir de su relación costo – beneficio.
- ☞ Respetando los principios de la Modelación Física, intrínseca a la ingeniería estructural (incluyó la modelación geométrica del elemento en estudio, de sus condiciones de contorno, de las cargas que sobre él actúan y del material), fue posible interpretar el comportamiento del elemento estructural **PPCC** mediante su modelo, el que luego de resolverse analíticamente a partir de la solución del sistema formado por las *Ecuaciones de Equilibrio*, las *Ecuaciones de Compatibilidad de las Deformaciones* y las *Ecuaciones Constitutivas del Material*, tal como lo define el Reglamento Ecuatoriano para el Cálculo de Estructuras de Hormigón, permitió llegar al dimensionamiento de la prelosa, compatible con los Estados Límites de Servicio y de Resistencia.
- ☞ Finalmente, la interpretación de los resultados alcanzados y luego de una abstracción fundamentada en la lógica del conocimiento, permitió generalizar los resultados obtenidos a la diversidad de tipologías de refuerzo para la prelosa **PPCC**. Esta generalización se apoyó en un proceso de algoritmización lógica que fue instrumentada mediante un Libro Electrónico en EXCEL.

1.3 ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN

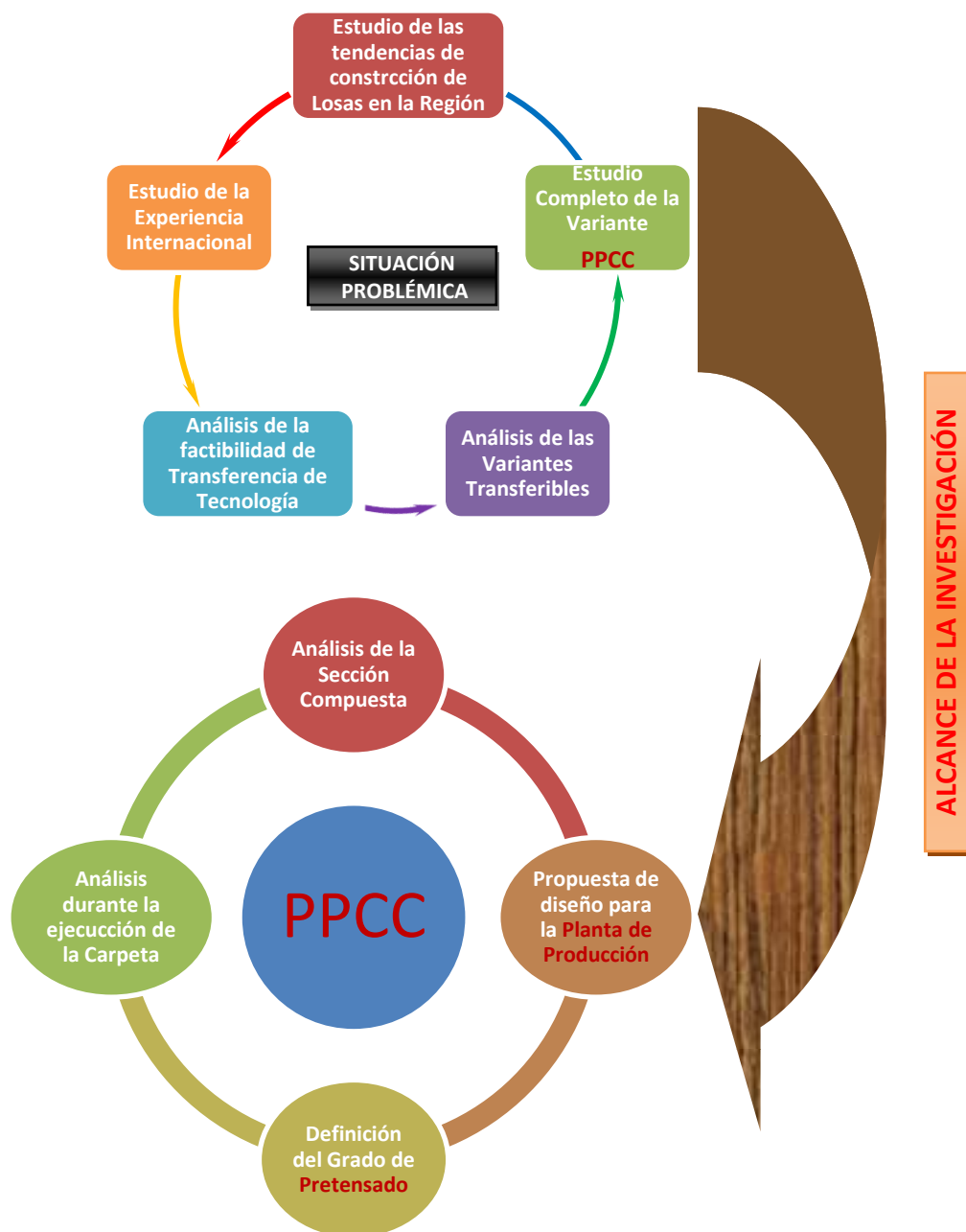


Fig. 1.2 Establecimiento del Campo y el Alcance de la Investigación

La **Figura 1.2** define el campo de investigación que rodea a la situación problemática que se identificara, y resalta su **ALCANCE**, el que queda redactado de la manera siguiente:

Profundización en el estudio de la prelosa PPCC como pieza estructural para resolver los sistemas de entepiso y cubierta, con el interés de incorporarla al surtido de elementos vinculados a los programas de viviendas. El estudio incluye:

- a) Definición de las dimensiones de la sección transversal de la prelosa que asegure su manipulación hasta luces de 4.50m sin el requerimiento de equipos de izaje.*
- b) Compatibilización del refuerzo pretensado que se requiere para garantizar las bases de diseño tanto de los estados límites de servicio como de resistencia, y con el menor grado de apuntalamiento durante el vaciado in situ de la carpeta de hormigón.*
- c) Diseño de la Planta que produciría la prelosa a partir de las restricciones que se impongan.*
- d) Evaluación económica de la variante PPCC a partir de la unidad de superficie de losa construida con esta solución.*

1.4 RESULTADOS ALCANZADOS

Los resultados alcanzados se resumen a continuación:

- 1) Libro electrónico elaborado en EXCEL que permite evaluar de manera automatizada la capacidad resistente de cada variante, tanto durante el vaciado de la carpeta (permite decidir cuándo es necesario apuntalar), como durante la etapa de explotación de la sección compuesta completada por la carpeta.
- 2) Ayudas de diseño mediante un Juego de Tablas de fácil empleo, que permiten una rápida selección de la tipología para las situaciones más generales y frecuentes que pueden darse en los proyectos de viviendas.
- 3) Propuesta de diseño de los espacios de producción y el equipamiento necesario para el montaje de una Planta de producción estática capaz de fabricar la prelosa para un rendimiento de 180 viviendas de 60m² de superficie de cubierta, cada 11 meses.

1.5 EFECTOS E IMPACTOS DE LA INVESTIGACIÓN

EFFECTO TECNOLÓGICO: Se ofrece un producto que recurre a dos de las técnicas más empleadas internacionalmente en la actualidad para mejorar la efectividad de los programas de construcción de viviendas: la prefabricación (en realidad semiprefabricación) y el pretensado. Al momento este efecto puede resultar novedoso para el medio, aunque no fue la novedad el sentido de esta investigación.

EFFECTO SOCIAL: La productividad que se alcanza con la introducción de la prelosa **PPCC** puede contribuir a disminuir los períodos de construcción de las viviendas, y mejorar la calidad y durabilidad de las losas de entrepiso y cubierta a causa de la inclusión del pretensado, lo que resulta muy favorable especialmente para la cubierta, sometida a la constante agresividad del medio ambiente y a eventos naturales como la lluvia, la nieve, los cambios de temperatura, etc.

EFFECTO ECOLÓGICO: Minimización del empleo de la madera con la prelosa PPCC, especialmente en un tipo de elemento estructural que tanto lo requiere: las losas.

EFFECTO ECONÓMICO: Luego de la inversión inicial que se requiere para construir la Planta de Prefabricación (su amortización es relativamente rápida), se trata de un elemento que mejora los índices técnico-económicos durante la construcción de losas de hormigón. Esta afirmación queda confirmada durante el análisis que se expone el Capítulo IV de la Tesis.

1.6 DIVULGACIÓN DE LOS RESULTADOS

El investigador ha participado ya como autor en cuatro Eventos Internacionales como vía de divulgación de los resultados alcanzados. Se citan a continuación las referencias de estos Eventos:



XXXII JORNADAS SULAMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUCTURAL

País/Ciudad: Brasil/Campinas

Sede: UNIVERSIDAD ESTADUAL DE CAMPINAS.

Trabajo Presentado: “Elementos Prefabricados en la Vivienda de Interés Social”

Fecha: 22-26 de mayo de 2006

ISBN: RE-G 0382



13 CONVENCION CIENTIFICA DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

País/Ciudad: Cuba/La Habana

Sede: INSTITUTO SUPERIOR POLITÉCNICO “JOSÉ A. HECHEVERRÍA” _CUJAE.

Trabajo Presentado: “Impacto Microbiológico en el Hormigón”

Fecha: 28 Nov.-1 Dic. de 2007

ISBN: 1261.248-x

☞ **XXXIII JORNADAS SUDAMERICANAS DE INGENIERÍA ESTRUCTURAL.**

País/Ciudad: Chile/Santiago

Sede: UNIVERSIDAD CENTRAL DE CHILE.

Trabajo Presentado: “PPCC_A&C. Una Variante Estructural para sistemas de losas al servicio de los programas de vivienda”

Fecha: 26-30 Mayo de 2008

ISBN: ESTO5_307

☞ **14 CONVENCION CIENTIFICA DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA**

País/Ciudad: Cuba/La Habana

Sede: INSTITUTO SUPERIOR POLITÉCNICO “JOSÉ A. HECHEVERRÍA” _CUJAE.

Trabajo Presentado: “Evaluación técnico económica de la prelosa de hormigón pretensado y su viabilidad como solución de entrepiso en los programas de vivienda en el Ecuador.”

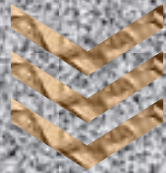
Fecha: 2 - 5 Dic. de 2008

ISBN: ¿?

CAPÍTULO II



LA PREFABRICACIÓN Y EL PRETENSADO ENFOCADOS A LOS SISTEMAS ESTRUCTURALES DE LOSAS DE HORMIGÓN



UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA

ÁREA DE LA ENERGÍA, LAS INDUSTRIAS Y LOS RECURSOS
NATURALES NO RENOVABLES



2.1 LA PREFABRICACIÓN COMO PROCESO DE INDUSTRIALIZACIÓN DE LA CONSTRUCCIÓN^(R: 1, 2, 3)

Industrializar la producción significa mecanizar un proceso, producir en fábricas con los principios de la “cadena fabril”, producir en grandes cantidades. La construcción como sector de la esfera productiva presenta características particulares tales, que pueden llegar a dificultar la introducción de los procesos de industrialización, en igualdad de condiciones con otros sectores productivos. Por ejemplo, se consiguen producciones de cientos de modelos de automóviles en un ciclo muy corto de su realización y se puede evaluar rápidamente los resultados de cuáles modelos son los de mayor aceptación en el mercado; sin embargo, para experimentar en la construcción, determinar su calidad, y a la vez aumentar la productividad puede requerirse varios años, lo que ha traído como consecuencia que se haya atrasado su desarrollo.

Industrializar la construcción significa aplicar métodos afines a la industria, es decir, establecer una cadena de producción análoga a la concebida hace ya más de un siglo por Henry Ford para desarrollar precisamente la industria automovilística: exige definitivamente:

1. Mecanizar
2. Producir en grandes cantidades de forma seriada.
3. Producir en condiciones fabriles.

Esto se puede lograr en fábricas centralizadas, en fábricas de pequeño porte, o incluso a pie de obra.

La manera de industrializar la construcción es precisamente la **prefabricación**. La prefabricación es una técnica de construcción que se puede definir como: *Producción en un lugar de la obra ó fuera de ella de los elementos componentes de una estructura, que después serán izados y colocados en su lugar definitivo de manera que conformen una estructura completa.*

Dicho en otras palabras, prefabricar implica reducir todo el proceso de ejecución de una obra a una operación de montaje mecánico de elementos que se han elaborado previamente en una Planta.

El concepto de **prefabricación** es anterior, incluso, a la aparición del hormigón, material que fuera patentado por Monnier en 1867, aunque su advenimiento incrementó las posibilidades de aplicación de este revolucionario concepto. Ya en fecha tan temprana como 1891 una empresa francesa prefabrica vigas de hormigón armado, y en 1904 se ejecuta en Francia el primer edificio de grandes paneles prefabricados. El desastre que causara la Segunda Guerra Mundial, y muy especialmente la destrucción ocasionada en la infraestructura construida hasta entonces, contribuyó a un impetuoso desarrollo de la prefabricación en Europa con el interés de hallar la más pronta respuesta a la falta de viviendas y de otros espacios necesarios para el desenvolvimiento de la actividad humana.



Definitivamente la prefabricación representa una revolución dentro de los esquemas clásicos de organización de la ejecución de una obra, ya que significa la introducción de nuevos métodos y procedimientos técnicos que conducen a un considerable ahorro de fuerza de trabajo, de materiales en general, y una reducción apreciable de los plazos de ejecución, además de las mejoras sociales que trae aparejadas producto del cambio de las condiciones de trabajo que se hacen más humanas para el obrero.

Puede afirmarse que la prefabricación como técnica de construcción:

1. Mejora la organización del trabajo.
2. Permite aumentar la mecanización de las labores.
1. Posibilita la introducción de métodos afines a la producción industrial.
1. Incrementa la productividad del trabajo.
2. Brinda la posibilidad de reducir los costos de ejecución.

Como todo proceso productivo presenta Fortalezas y Debilidades. A continuación se resumen las principales de cada una de ellas.

DEBILIDADES	<ul style="list-style-type: none">☞ La fragmentación de la estructura multiplica la cantidad de uniones y compromete su ventajoso monolitismo de cara a la redistribución de esfuerzos.☞ La solución de las juntas no siempre es fácil.☞ Cuando se trata de una fragmentación que conduce a elementos de gran porte, se requiere el uso de costosos equipos de izaje. (Esta debilidad se combate recurriendo a la prefabricación ligera mediante elementos que por su peso puedan ser manipulados).☞ Exige un análisis estructural más preciso, reconociendo los diferentes estados de carga por los que pasa el elemento (transporte, izaje, proceso de ejecución, estado definitivo de carga, etc.).☞ Requiere una inversión inicial elevada para la adquisición de la Planta de Prefabricado, y su amortización requiere un periodo que puede resultar largo.
-------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

En realidad muchas de estas debilidades y otras que pudieran señalarse están motivadas por las actuales limitaciones de la técnica, y los profesionales del sector vienen trabajando incansablemente para revertirlas tanto cuanto sea posible, por ejemplo introduciendo el pretensado para disminuir dimensiones de sección en piezas de grandes luces con lo cual se logra reducir el peso de tales elementos.



FORTALEZAS

ECONÓMICAS

- ☞ Uso repetido de los moldes.
- ☞ Economía parcial ó total de madera.
- ☞ Reducción del tiempo de ejecución de la obra.
- ☞ Reducción de la mano de obra.
- ☞ Reducción del consumo de cemento y en general de hormigón (a más de ventaja económica, resulta más viable ecológicamente)
- ☞ Se puede lograr un aumento de la producción y calidad de los elementos.

TECNOLÓGICAS

- ☞ Posibilidad de producir grandes cantidades de piezas mediante la normalización y tipificación.
- ☞ Permite obtener una organización del trabajo de tipo industrial (cadena de montaje)
- ☞ Mejora la calificación de la mano de obra.
- ☞ Evita las interrupciones durante el hormigonado.
- ☞ Se puede producir independientemente de las inclemencias del tiempo.
- ☞ Permite el uso de secciones estructuralmente más racionales.
- ☞ Brinda la posibilidad de lograr menos juntas de dilatación.
- ☞ Impulsa el uso del pretensado.
- ☞ Asegura una mayor calidad y durabilidad en los elementos que se producen.
- ☞ Facilita el ensayo de los elementos antes de su colocación.

La prefabricación, atendiendo a su formato, se puede implementar y desarrollar mediante dos estrategias diferentes: **PREFABRICACIÓN CERRADA** y **PREFABRICACIÓN ABIERTA**.

Con el auge del desarrollo industrial y aprovechando los criterios desarrollados por Henry Ford para su cadena de montaje, la prefabricación presupone la especialización del trabajo, la tipificación de componentes, la especialización de la mano de obra en un tipo particular de actividad dentro de todo el proceso, la mayor garantía de la calidad del producto terminado, etc., alcanzando éxitos notables con altos volúmenes de producción y grandes incrementos en la productividad del trabajo.

Los pioneros de la **prefabricación**, entusiasmados por estos resultados y posibilidades, concibieron la idea de aplicar los mismos principios de la producción industrial a la construcción. Fue así que surgió la idea de tomar un proyecto, despiezarlo en elementos componentes, con dimensiones que permitieran su ulterior producción en una fábrica, luego su transportación al lugar de la obra, y finalmente su ensamblaje definitivo.



A esta forma de prefabricación, donde el surtido de elementos componentes se obtiene a partir de la descomposición de un proyecto preconcebido, se le llamó **PREFABRICACIÓN CERRADA**. Si bien este tipo de prefabricación respecto de la construcción tradicional (“in situ”) reporta una reducción considerable de los plazos de ejecución y a la vez un aumento considerable de la productividad del trabajo, presenta una serie de limitaciones, entre las que se destacan:

- ☞ Mínima intercambiabilidad de elementos (los elementos responden al sistema que fue fragmentado).
- ☞ El proceso de diseño se torna rígido al no existir flexibilidad.
- ☞ Las soluciones funcionales y la expresión arquitectónica quedan congeladas.
- ☞ Las urbanizaciones resultan monótonas.

Producto de estas limitaciones, técnicos e ingenieros del sector de la construcción se dieron a la tarea de investigar nuevas concepciones, y como resultado se llegó al criterio de que era necesario desarrollar un sistema de prefabricación que permitiera dar respuesta, simultáneamente, a diferentes programas arquitectónicos con un mínimo de elementos. A esta nueva forma de prefabricación, que parte no ya de fragmentar una estructura en un número finito de elementos, sino de concebir un surtido de elementos tipificados cuya intercambiabilidad permita obtener diversas soluciones para un mismo programa arquitectónico, y hasta para diferentes programas, se le conoce como **PREFABRICACIÓN ABIERTA**, o también como prefabricación por catálogos ó por componentes.

Según lo anterior, la principal diferencia entre la prefabricación cerrada y la abierta es de concepción. En tanto que la primera se fundamenta en una obra ya concebida para llegar a los elementos necesarios, la segunda lo hace de un surtido de elementos convenientemente estudiados formal y dimensionalmente, que no responden a un proyecto particular y con los cuales se puede llegar a diferentes soluciones plásticas de una obra determinada, e incluso obras de diverso destino. Con esta nueva concepción se han desarrollado diversos sistemas catalogados, por ejemplo, en entresijos y cubiertas para diferentes luces y cargas aplicables a diferentes programas arquitectónicos. Lo mismo ocurre con otros elementos estructurales como: columnas, vigas, paneles de carga, etc. Así mismo se pueden catalogar los elementos no estructurales como: paneles de fachada, paneles divisorios, escaleras, cabinas sanitarias, etc.

Las ventajas de la **PREFABRICACIÓN ABIERTA** en relación con su predecesora, la cerrada, radican en:

- ☞ Los elementos tienen un mayor grado de intercambiabilidad.
- ☞ Se flexibiliza el proceso de diseño arquitectónico.
- ☞ Se logran soluciones funcionales y expresiones formales mejor recibidas.
- ☞ Se amplía el radio de acción de las plantas productoras.
- ☞ Se evita la monotonía de las urbanizaciones.

Siendo así, la prefabricación abierta constituyó un salto cualitativamente superior en el camino del desarrollo de la industrialización de la construcción, y esta investigación defiende a la

PREFABRICACIÓN ABIERTA como una alternativa de transferencia tecnológica viable y pertinente para el desarrollo de los programas de vivienda en el Ecuador, y lo hace a partir de algunas soluciones para los sistemas estructurales de entrepiso y cubierta que serán descritas en este mismo Capítulo.

2.2 EL PRETENSADO COMO ALTERNATIVA DE MEJORAR LA APTITUD DE LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE HORMIGÓN ^(R: 4, 5,6)

El pretensado es un procedimiento eminentemente intuitivo que permite mejorar el comportamiento y la capacidad resistente de la estructura a la que se aplique la técnica. Su esencia consiste en imponer tensiones controladas, en general de igual dirección pero de sentido contrario, a las que son originadas por las cargas exteriores.

Aquí se atenderá la técnica del pretensado aplicada a estructuras de hormigón y, por definición, se trata de la imposición de compresiones al hormigón mediante la transferencia de tensiones controladas e inducidas por el estiramiento o tesado de tendones¹ de acero de alta resistencia. En esencia, el pretensado consiste en introducir artificialmente en la sección unos esfuerzos de compresión que, superpuestos a las tensiones que originan las cargas exteriores, den lugar a un estado de esfuerzos totales que permanezcan dentro de los límites de esfuerzos que el hormigón puede resistir indefinidamente (lo mismo de compresión que de tracción). La **Figura 2.1** ilustra una composición de los esfuerzos producidos por una carga exterior de tracción, y de la precompresión provocada por el pretensado.

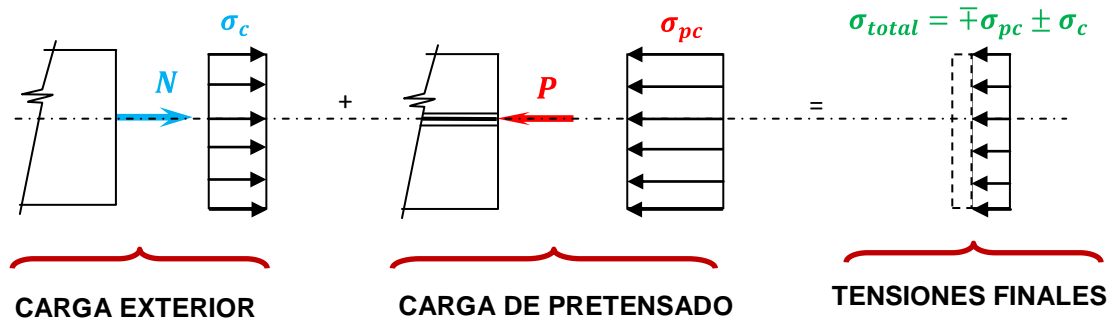


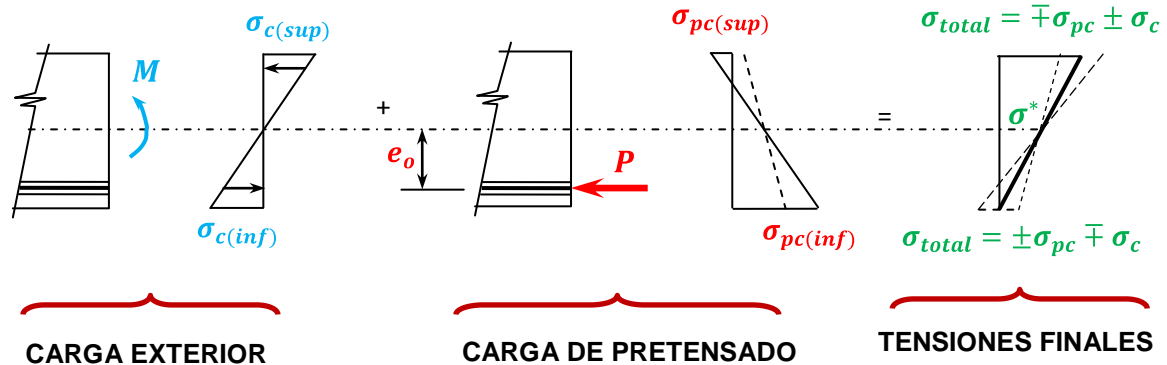
Fig. 2.1 Carga Axial de Tracción + Pretensado

Obsérvese cómo la indeseable tracción que tiene lugar en el hormigón producto de la acción de la carga exterior, puede llegar a anularse totalmente si se llegara a introducir un pretensado que lo asegure, o incluso garantizar una compresión controlada bajo la combinación de ambas acciones, lo que resultaría muy conveniente tratándose de una material artificial (el hormigón)

¹ Tendón será el término genérico que se emplee para tratar a la armadura pretensada, pueden estar constituido por alambres, cordones, torones o barras.

que por su origen pétreo presenta una débil resistencia a los esfuerzos de tracción, no así a los de compresión.

En el caso de la *flexión* se trata de compensar con el pretensado, fundamentalmente, las tracciones que producen las cargas externas en la sección de hormigón (pues resultan ser las más perjudiciales), y es mejor hacerlo sin llegar a incrementar sensiblemente las compresiones, idea que queda ilustrada en la **Figura 2.2** mediante el empleo de un pretensado excéntrico.



Son muy diversas las maneras de clasificar a la técnica del pretensado, atendiendo a una cualquiera de las siguientes razones:

- Instante en que se tesa la armadura respecto del momento de hormigonado.
- Ubicación del tendón respecto de la sección transversal del elemento.
- Condiciones de adherencia del tendón.
- Posición del refuerzo respecto del centroide de la sección de hormigón.
- Magnitud de las tensiones resultantes a nivel de la fibra de mínima compresión o potencial tracción, durante el Estado en Carga.

En realidad a los fines de esta investigación conviene profundizar exclusivamente en la clasificación que responde a la primera de las razones, sin embargo la **Tabla 2.1** hace una breve descripción de la clasificación que puede seguirse para las restantes cuatro razones.

Tabla 2.1 Clasificación del Pretensado

RAZÓN	CLASIFICACIÓN	DESCRIPCIÓN
(b)	INTERIOR	Caso en el que el tendón se dispone durante todo su trazado en el interior de la sección de hormigón
	EXTERIOR	Caso en el que el tendón se ubica por fuera de la sección de hormigón, pero manteniéndose dentro de su altura o canto
(c)	ADHERENTE	Caso en el que el tendón se mantiene adherido al hormigón que lo envuelve
	NO ADHERENTE	Caso en el que el tendón no llega a adherirse al hormigón, bien porque se utilicen protecciones voluntarias de la armadura que impidan su adherencia con el hormigón, o también cuando los tendones se ubican fuera de la sección de hormigón
(d)	CENTRADO	Corresponde al caso en que los aceros estén localizados en la sección de modo que la resultante de todas las fuerzas pasen por el centroide de la sección de hormigón
	EXCÉNTRICO	Cuando la resultante de las fuerzas en los acero no llega a coincidir con el centroide de la sección
(e)	U (Un Crack o No Fisurado)	Cuando la tensión (f_t) a nivel de la fibra de mínima compresión (tracción) bajo cargas de servicio no sobrepasa el valor de $(0.7\sqrt{f'_c})$
	T (Tensil: Transición entre No Fisurado y Fisurado)	Cuando la tensión (f_t) a nivel de la fibra de mínima compresión (tracción) bajo cargas de servicio se ubica en el intervalo $(0.7\sqrt{f'_c} \leq f_t \leq \sqrt{f'_c})$
	C (Crack o Fisurado)	Cuando la tensión (f_t) a nivel de la fibra de mínima compresión (tracción) bajo cargas de servicio sobrepasa el valor de $(\sqrt{f'_c})$

Atendiendo al instante de tesar la armadura respecto del momento de hormigonado, o sea, si se realiza anterior o posterior al endurecimiento del hormigón, se distinguen dos procedimientos diferentes: **PRETESADO** u hormigón con armadura pretesa y **POSTESADO** u hormigón con armadura postesa. A continuación se detallarán cada uno de ellos.

LA TÉCNICA DEL POSTESADO

En este caso se procede a fabricar la pieza de hormigón dejando orificios longitudinales o conductos que sigan el perfil de cada unidad de acero, según las exigencias de proyecto. Luego de endurecido el hormigón se colocan los aceros por el interior de tales conductos y mediante los medios adecuados (gatos de tesado) se procede al estiramiento de cada uno hasta alcanzar la fuerza deseada. Una vez concluida la operación de tesado se procede a anclar los tendones e inyectar el conducto hasta que cubra todos los espacios vacíos, especialmente si el pretensado es adherente.

En la **Figura 2.3** se ilustra esquemáticamente el proceso anteriormente descrito para el caso de una pieza con cable centrado. El tesado puede efectuarse por uno o ambos extremos de la pieza y de esta manera se definen anclajes activos (situados en el extremo desde donde se estira), o anclajes pasivos. Los conductos pueden ser tubos flexibles de acero, plástico o mediante el uso de mangueras inflables que se extraen luego, dejando un orificio cuyas paredes son el propio hormigón de la pieza. El anclaje de los tendones, si es en los extremos, se logra mediante ciertos dispositivos que dependen del sistema utilizado, generalmente protegidos mediante patentes y

suministrados por el fabricante del sistema en cuestión. La mayoría de ellos se fundamenta en el principio de cuña. En cuanto al hormigón de la pieza, este sufrirá un acortamiento en el instante mismo de la transferencia de la fuerza de compresión acumulada en cada acero una vez que sea anclado. En resumen, el acero ha sido estirado luego del endurecimiento del hormigón y de ahí su nombre de postesado.

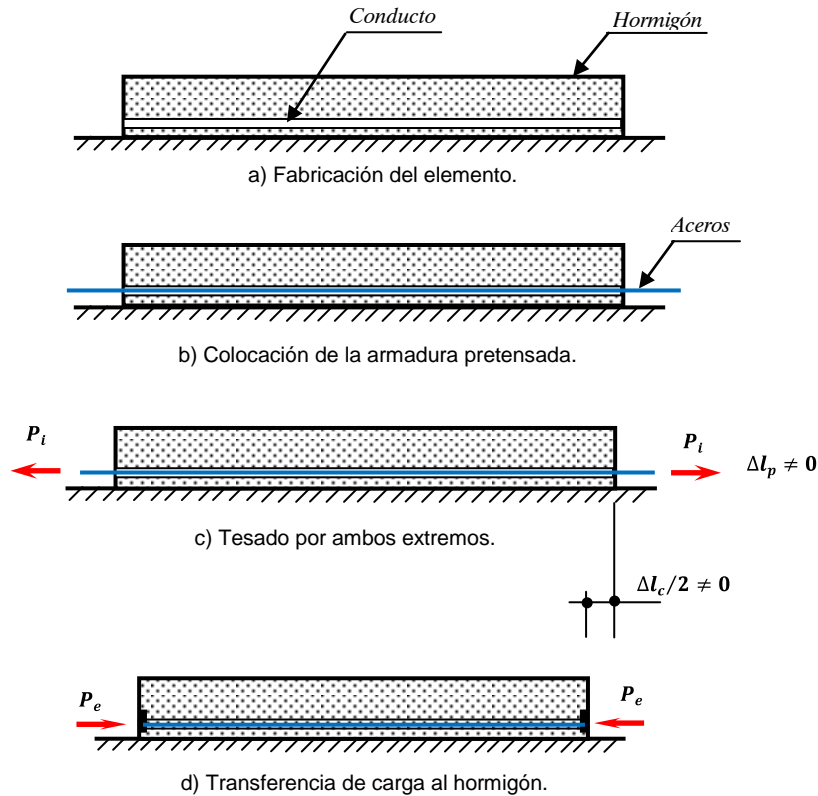


Fig. 2.3 Proceso cronológico para la ejecución de una pieza postesada.

Durante la etapa inicial (**Figura 2.3a**) se conforma el molde, se disponen las armaduras pasivas (transversal y eventualmente longitudinal), los conductos o vainas, y finalmente se hormigona la pieza. Una vez endurecido el hormigón y alcanzada cierta resistencia inicial (etapa b) se retira el molde y se coloca el acero pretensado, enhebrando los conductos que se definan por el proyecto.

Una vez que se haya alcanzado la resistencia a compresión mínima especificada del hormigón, (etapa c) se estiran los tendones, bien por sus dos extremos, o también definiendo un anclaje pasivo (fijo) y estirándolo sólo por el otro extremo. Por último (etapa d), alcanzada la tensión de tesado, se ancla el acero, se corta debidamente, y se transfiere así la fuerza de compresión al hormigón. Si fuera el caso, se procede a inyectar los conductos con una lechada de cemento que cumpla las prescripciones reglamentadas. Al transferirse el pretensado, el elemento puede llegar a adoptar determinada contraflecha si el pretensado resultante es excéntrico, o un acortamiento uniforme si es perfectamente centrado.

Este procedimiento posee varias variantes entre las que sobresalen:

- ☞ **Postesado adherente:** Vainas inyectadas con lechada de cemento (ha sido y continúa siendo la variante más extendida).
- ☞ **Postesado no adherente** (las vainas no llegan a inyectarse). Es sólo de interés para algunas aplicaciones prácticas.
- ☞ **Postesado con tendones no adheridos** pero preservándolos de la corrosión al inyectar a las vainas con grasa soluble en agua.
- ☞ **Postesado no adherido** con trazado exterior del acero.

La **Figura 2.4** muestra un esquema de cada uno de estos casos.



Fig. 2.4 Variantes más frecuentes del hormigón postesado.

El **POSTESADO** posee debilidades y fortalezas que no deben desconocerse:

DEBILIDADES:

- a) Se limitan las posibilidades de industrializar el proceso, pues aun cuando la ejecución de la pieza de hormigón puede realizarse completamente en fábrica, la colocación de los tendones y su estiramiento exigen un proceso menos industrializado, lo que recientemente se viene mejorando bajo algunas patentes.
- b) La inyección de los conductos mejor lograda no llega a reproducir el mismo nivel de adherencia de la técnica que se sigue con el pretensado.
- c) La posibilidad de utilizar trazados curvos incrementan las pérdidas por fricción durante el tesado.

FORTALEZAS:

- a) El trazado de los tendones se puede ajustar más a las isóneas de las tracciones que originan las cargas externas a lo largo del elemento, lo que exige un ejercicio interesante de ingeniería. Los trazados de las armaduras postesas pueden cortarse antes de llegar a los apoyos para garantizar esta ventaja, pero hay más, esta posibilidad puede redundar en mejores índices técnico económicos.

- b) La transferencia de la fuerza se hace sobre un hormigón de mayor edad y por tanto de mayor resistencia, contribuyendo a disminuir las pérdidas de tensión.
- c) Cuando el trazado de los aceros deja de ser recto, lo que resulta muy frecuente con esta técnica, aparece una componente vertical que se opone ventajosamente al esfuerzo de corte originado por las cargas externas, permitiéndose un incremento de los espaciamientos de la armadura pasiva transversal, con el consecuente ahorro de acero.
- d) Muy útil para segmentar piezas de gran porte en dovelas, las que luego pueden ser unidas en la obra.
- e) Aplicable a estructuras hiperestáticas o continuas, en las que incluso pueden existir cambios de curvatura de su directriz.

LA TÉCNICA DEL PRETENSADO

En este caso el método se invierte y ahora el acero es estirado antes de que se proceda al hormigonado de la pieza. El pretensado es generalmente elaborado en plantas de prefabricado aprovechando al máximo las posibilidades de la industrialización. La **Figura 2.5** ofrece una secuencia esquematizada de esta técnica.

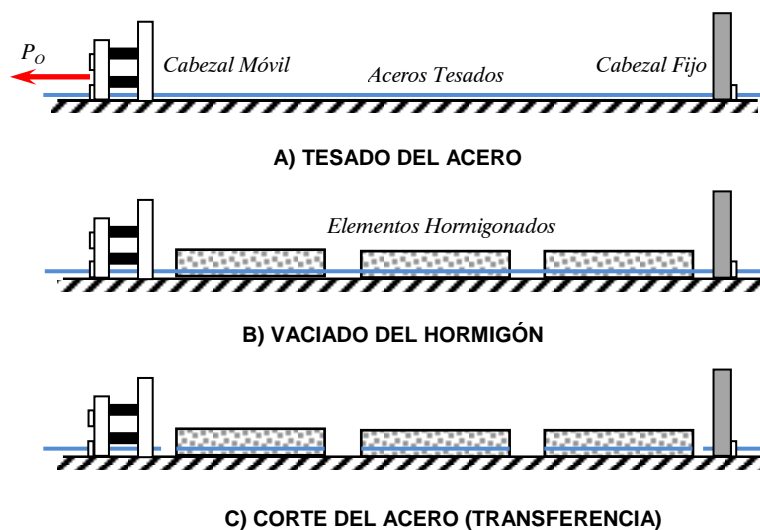


Fig. 2.5 Proceso cronológico para la ejecución de una pieza pretensada.

La descripción de una Planta genérica para hacer pretensado puede ser la siguiente: consiste en un apoyo o cabezal fijo ubicado en uno de los extremos del banco o lecho de vaciado, al que se ancla el acero; mientras que en el otro extremo se sitúa un cabezal móvil al que también queda anclado el acero. Es precisamente a este cabezal al que se le aplica la fuerza de estiramiento mediante grandes gatos. De esta forma se logra que todos los aceros estén sometidos a una fuerza de tracción previamente establecida por el calculista. Luego de concluido el proceso de



tesado de los aceros, se colocan los encofrados y se vierte el hormigón, o se coloca el hormigón mediante máquinas deslizantes que conforman ellas mismas el molde.

El acero se mantiene estirado hasta que el hormigón endurece y alcanza la resistencia requerida para la transferencia. Posteriormente se procede a cortarlo mediante cuchillas especiales que pueden hasta llegar a cortar al hormigón. La adherencia y el agarre entre el hormigón y el acero mantienen el alambre traccionado y al hormigón comprimido.

En resumen, el acero es tesado antes de que el hormigón sea colocado, de ahí el nombre de pretesado. Como el postesado, la técnica posee debilidades y fortalezas que deben ser reconocidas. Algunas de las principales se indican a continuación:

DEBILIDADES:

- a) Se imponen esfuerzos de compresión a hormigones de escasa edad, provocando en consecuencia mayores pérdidas de tensión del acero por acortamiento instantáneo del hormigón, y por el incremento de las deformaciones diferidas.
- b) Resulta difícil resolver la variabilidad del área de acero a todo lo largo de la pieza, atentando contra la mayor economía del elemento.
- c) Resulta igualmente difícil modificar el trazado de los tendones, tendiendo más a trazados rectos que pueden conducir a excesos del preesfuerzo en aquellas secciones poco activadas por la carga exterior. No obstante, existe la posibilidad de modificar en algo este trazado.

FORTALEZAS:

- a) Se aprovechan al máximo las ventajas de la industrialización de la construcción, poniendo a disposición de la obra, a la mayor brevedad, las piezas que se requieran.
- b) Se facilitan las actividades de control de la calidad, lo mismo de los materiales que del proceso de ejecución.
- c) Un curado eficiente, especialmente térmico en ambiente húmedo, puede llegar a reducir las pérdidas de tensión y a acortar el tiempo de transferencia (existen Plantas que pueden transferir el pretensado a escasas 18hrs).
- d) La especialización de las labores de ejecución redunda favorablemente en un incremento de la calidad global de la pieza.

Un esquema típico de tiempo por actividades para una Planta patrón dedicada a la elaboración de piezas pretesadas se indica en la **Tabla 2.2**, admitiendo que algunas actividades se realicen en tiempos simultáneos.

Tabla 2.2 Patrones de tiempo por actividad para una Planta de Pretensado de primera generación.

ACTIVIDAD	Tiempo (hr)
Limpieza del plano de hormigonado.	0.5
Colocación y ajuste de los moldes.	3.0
Aplicación de productos que facilitan el desencofre.	
Colocación de la armadura (incluye la armadura pasiva si ha lugar)	
Tesado y anclaje de la armadura activa.	
Colocación y compactación del hormigón.	1.5
Tiempo de espera.	2.0
Curado a vapor (calefacción) si ha lugar.	6.0
Destesado y corte de la armadura.	0.5
Traslado de las piezas al almacén o a la obra.	2.0
Tiempo Total	15.5

Descrita la técnica del pretensado, y a pesar de la limitada experiencia que se tiene en la Ciudad de Loja con el empleo del pretensado, el autor deja constancia del beneficio que puede representar para la región la introducción del **PRETESADO** que, como técnica, es la que va a considerar esta investigación, por la pertinencia que tiene en la concepción de los elementos estructurales para la ejecución de entresijos y cubiertas en viviendas de interés social.

2.3 SISTEMAS CONSTRUCTIVOS PARA LOSAS DE HORMIGÓN^(R: 7).

La cubierta y el entresijo pueden clasificar como las partes cardinales de la vivienda, ya que involucran elementos generalmente más costosos debido a que predomina en ellos el trabajo a flexión, pero además es la cubierta el elemento más expuesto al intemperismo y responsable, a su vez, del confort interior de la edificación.

Procurando analizar los elementos tecnológicos y estructurales de las losas o placas con el fin de introducir algunas propuestas que puedan mejorar sus índices técnico – económicos, se ofrece a continuación una clasificación de ellas atendiendo al tipo de material que se emplee en su ejecución, y una breve descripción de las funciones principales de las losas de entresijo.

Atendiendo al tipo de material, las losas o placas pueden clasificarse de la manera siguiente:

- ☞ Losas o placas en **hormigón armado** (reforzadas con armadura pasiva): Son las más comunes que se construyen y utilizan como refuerzo barras de acero corrugado o mallas de acero electro soldadas.
- ☞ Losas o placas en **hormigón pretensado** (reforzadas con armadura activa): Son las que utilizan cables estirados y anclados, que le transmiten a la placa compresión. Este tipo de losa se emplea poco en nuestro medio y sólo la utilizan las grandes empresas



constructoras que tienen equipos con los cuales estiran los cables. Cada vez más se emplea esta solución internacionalmente, y es especial mediante el pretensado no adherente.

- ☞ Losa o placa **apoyada en madera**: Son las ejecutadas sobre un entarimado de madera, completadas en la parte superior con una carpeta de hormigón reforzado.
- ☞ Losa o placa **con lámina de acero**: Son las que se funden sobre una lámina de acero delgada que conforma, simultáneamente, la formaleta y el refuerzo inferior de la carpeta de hormigón que se vacía encima de ella. Tiene un uso creciente en el medio constructivo nacional (NOVALOSA).
- ☞ Losas o placas **con otro material**: Son placas generalmente prefabricadas realizadas en materiales especiales como arcilla cocida, plástico reforzado, láminas plegadas de fibrocemento, perfiles metálicos etc.

En particular, las losas o placas de entrepiso cumplen las siguientes funciones:

- ☞ **Función arquitectónica**: Separa los espacios verticales formando los diferentes pisos de una construcción; para que esta función se cumpla de una manera adecuada, la losa debe garantizar el aislamiento acústico, térmico y a la vez impedir la visión directa entre dos espacios contiguos, es decir, que no deje ver las cosas de un lado a otro.
- ☞ **Función estructural**: Las losas o placas deben ser capaces de sostener las cargas de servicio como el mobiliario y las personas, lo mismo que su propio peso y el de los acabados como pisos y revoques. Además forman un diafragma rígido intermedio que permite trasladar las cargas horizontales, fundamentalmente las cargas ecológicas de Viento y Sismo, a los elementos que conforman el sistema estructural vertical (pórticos y/o muros de cortante).

Si la intención de esta investigación se fundamenta en la prospección de nuevas tecnologías de producción de tales elementos que disminuyan costos, que permitan agilizar los procesos de ejecución, que se conviertan en soluciones sustentables para los programas de vivienda de la región, incluyendo aquellos que se dirigen a los segmentos de menores ingresos, y sobre todo si se toma en consideración que el déficit de vivienda no sólo persiste sino que experimenta incrementos exponenciales, sólo puede llegar a revertirse esta situación mediante el desarrollo tecnológico de la construcción, el empleo de tecnologías racionalizadas y de materiales que se hallen en armonía con el medio ambiente y con la situación económica del país.

Por sólo citar el caso de Brasil se señala: *“Aunque la creación del BNH² ha reconocido la gravedad de la situación de las viviendas (habitacional) en los grandes centros de Brasil, jamás*

² Banco Nacional de Habitación



consiguió definir una política de viviendas populares, clara y capaz de disminuir los grandes problemas de las poblaciones pobres. Del total de las inversiones del BNH, se destinaron simplemente el 9% a las familias pobres con salarios entre 1 y 5 salarios mínimos”³

Ante estas realidades: **¿Por qué puede resultar conveniente la introducción de la prefabricación y el pretensado como alternativas tecnológicas para atenuar la crisis actual de la vivienda?**

En la actualidad la humanidad consume en un solo año el equivalente a una cantidad de combustibles fósiles que la naturaleza tomó aproximadamente un millón de años en formar. Las evaluaciones del Banco Mundial indican que, sólo en la última década del siglo XX, debido al crecimiento de la población, al desarrollo industrial y a las crecientes urbanizaciones, la aceleración de la demanda anual de energía creció en algo más de 6% en los países en vías de desarrollo.

El agotamiento de los recursos forestales desde finales del siglo XIX y el déficit energético que se manifiesta en el planeta, cada vez con mayor agudeza (petróleo, hulla, carbón), limita el empleo de materiales resistentes a la flexión como la madera y el acero, pero también la producción de las materias primas para los hormigones, especialmente para la fabricación del cemento, lo mismo por vía húmeda que seca.

Este cuadro ha provocado que los técnicos del sector de la construcción tomen conciencia de esta realidad y hecho suyas la necesidad de procurar nuevas tecnologías constructivas, y de nuevos materiales alternativos que impliquen una racionalización en el uso de la madera, el acero, el cemento y del equipamiento de alto consumo energético, reto que aun no alcanza el nivel de satisfacción deseado, a pesar de los esfuerzos que se realizan en numerosos países. La **prefabricación** a la escala que resulte objetivamente alcanzable, y el **pretensado**, son sólo dos de las vías exploradas en numerosos países.

En los párrafos siguientes se comentan algunas experiencias nacionales y también internacionales en cuanto a la ejecución de entrepisos y cubiertas, surgidas como expresión de las condiciones económicas actuales y de la disponibilidad objetiva de recursos en el sector de la construcción, las que indudablemente pueden ser transferidas, como tecnología, a cualquier país en vías de desarrollo, con las adecuaciones que el medio exija.

³ Vecchia, Francisco y Ferreira, Osny Pellegrino “**Viviendas prefabricadas con paneles ahuecados: su aplicación para el tema de huracanes y sismos**”. II Seminario Iberoamericano sobre cubiertas y entrepisos para la construcción y rehabilitación de Viviendas. La Habana. Cuba. 1999

2.4 SISTEMAS CONSTRUCTIVOS PREFABRICADOS REGISTRADOS EN ECUADOR PARA LA EJECUCIÓN DE ENTREPIOS Y CUBIERTAS.

La construcción del Estado del Arte en la etapa proyectiva de esta investigación permitió revisar una profusa información documental acerca de los sistemas constructivos que con mayor recurrencia se vienen empleando en el Ecuador, especialmente para la solución de los sistemas de entrepiso y cubierta en general, y en particular para las viviendas. Resultaría ambicioso describirlos todos, sin embargo, se abrirá un espacio a la exposición de aquellos que, a juicio del autor, presentan mayor pertinencia a los programas de vivienda, y muy especialmente los que incluyen algún grado de prefabricación o recurren al empleo del pretensado, aspectos ambos que se vinculan al objeto mismo de este Trabajo.

En resumen serán brevemente descritos los siguientes sistemas:

- ☞ NOVALOSA
- ☞ hor^{mi}2
- ☞ PLAYCEM

2.4.1 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA NOVALOSA^(R: 8)

Se trata de una lámina de acero galvanizada con una corrugación trapezoidal que se emplea para el diseño de losas compuestas con placa de hormigón colaborante. La lámina es diseñada y fabricada según la sección L2 del American Iron and Steel Institute (AISI), y su estudio de capacidad está basado en las especificaciones del Steel Deck Institute (SDI).

El sistema concibe que la lámina de acero funcione como refuerzo positivo para tomar las tracciones, eliminando así la necesidad de emplear varillas de refuerzo, además de aliviar la carga muerta y atenuar el empleo de encofrados. No obstante, ha de disponerse una malla de refuerzo para tomar los esfuerzos de retracción y de cambios de temperatura. Esta malla debe asegurar una cuantía geométrica mínima por cada faja de 1.00m igual a: $\rho_{min} = 0.18h$, siendo h el espesor de la losa compuesta.

Una vez colocadas las láminas sobre la estructura y fijadas debidamente al elemento estructural de entrepiso o cubierta, se vierte “in situ” una carpeta de hormigón que se integra a aquella mediante un sistema de resaltes dispuestos transversalmente para garantizar una trabazón mecánica entre el hormigón vaciado y la lámina, evitando así el deslizamiento relativo entre ambos materiales mediante una adecuada adherencia. Ubicadas las láminas, ellas definen una plataforma de trabajo segura para la colocación futura del hormigón, y una vez que el hormigón vertido alcanza su resistencia especificada ($f_c' = 21MPa$), se forma un sistema compuesto monolítico capaz de resistir cargas tanto verticales como horizontales, actuando la NOVALOSA (lámina de acero galvanizado) como refuerzo positivo de la losa compuesta. La

NOVALOSA posee un recubrimiento galvanizado G90 (Z275) y un límite de fluencia mínimo de ($f_y = 260 \text{ MPa}$).

Su origen metálico exige que no se empleen aditivos en la elaboración de la carpeta que contengan sales cloruros que puedan corroer a la lámina. Durante la etapa de ejecución del entrepiso se debe asegurar que para la carga total concomitante con este proceso, se aseguren las siguientes restricciones:

$$f_s \leq 0.60f_y \quad \text{y} \quad \delta \leq \begin{cases} l/180 \\ 19\text{mm} \end{cases}$$

Donde:

f_s : Es la tensión de trabajo del acero de la lámina para ese estado de carga

δ : Es el corrimiento (flecha) máximo que experimenta la lámina para el mismo estado de carga

l : Luz entre apoyos

Como carga concomitante con el proceso de ejecución se considera el peso propio de la lámina y del hormigón colocado, añadiendo una carga de construcción que puede ser de 224 kg concentrada en la faja unitaria central de la losa ($b = 1.00 \text{ m}$), o una carga uniformemente distribuida de 98 kg/m^2 ($\approx 1 \text{ kN/m}^2$).

La **Figura 2.6** ilustra una cubierta en la que ha sido empleada la Novalosa pero sin recurrir a la colocación de la carpeta colaborante de hormigón. Obsérvese que no se trata de un sistema prefabricado en sí mismo, aunque reproduce algunas ventajas de esta técnica, especialmente en cuanto a reducción de tiempo de ejecución y de recursos para los encofrados. Se ha podido comprobar que esta solución se emplea en numerosos países, dando prueba de su aptitud y pertinencia para la construcción, básicamente, de entrepisos.



Fig. 2.6 Detalles del Sistema NOVALOSA para la solución de entrepisos.

VENTAJAS DE NOVALOSA⁴

- ☞ Sirve como encofrado permanente y reduce el apuntalamiento.
- ☞ Una vez que fragua el hormigón, la lámina actúa como refuerzo principal de la losa.
- ☞ Su instalación es fácil y rápida.
- ☞ Puede ser utilizada sobre estructuras metálicas, de hormigón, de mampostería estructural, de madera, etc., y reduce considerablemente la mano de obra.
- ☞ Elimina los bloques de alivianamiento, varillas de refuerzo y permite el ahorro de al menos un 24% en volumen de hormigón con respecto a losas convencionales que se emplean en el país.
- ☞ Es liviana y de fácil transporte y almacenamiento.
- ☞ Facilita la colocación y posterior reparación de instalaciones sanitarias y eléctricas.
- ☞ Se logra limpieza y orden en la construcción. Los pisos de las edificaciones son más livianos, por lo que el efecto sísmico es menor.
- ☞ Es fabricada a medida de acuerdo al proyecto, reduciendo el nivel de desperdicio.



Fig. 2.7 Detalles Técnicos de la NOVALOSA.

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL FABRICANTE⁵

- ☞ El espesor de la losa está medido desde la parte superior de la Novalosa.
- ☞ Los valores de Máxima Luz sin Apuntalar y Carga Viva Sobre Impuesta, son válidos si las placas están correctamente fijadas a las vigas de apoyo.
- ☞ La separación entre apoyos debe considerarse entre ejes.
- ☞ Los valores de carga están basados en una resistencia del hormigón de $f'_c = 21 \text{ MPa}$.
- ☞ Las Cargas Vivas Sobre Impuestas que se indican en la documentación técnica del sistema se refieren a la capacidad de carga sobre la sección compuesta desde el momento en que

⁴ Tomado de <http://www.novacero.com> (DRT Novacero Soluciones de Acero Ecuador.mht)

⁵ Ibidem 4

el hormigón alcanza su f'_c y deja de ser una carga para la placa. Es decir, únicamente, se deben contemplar las cargas adicionales que actuarán sobre la losa sin tomar en cuenta el peso propio del hormigón y de la Novalosa.

- ☞ Si la separación entre apoyos excede la máxima luz sin apuntalar para la condición de dos o más luces, se asume que la Novalosa deberá ser apuntalada durante la fundición, lo que se refleja en el cuadro de cargas de su Catálogo en un cambio brusco de la capacidad cuando esto ocurre.
- ☞ La malla electrosoldada no está considerada como un aporte estructura al sistema de losa compuesta. Su función es para controlar los esfuerzos por retracción de fraguado y temperatura, en caso de utilizarse debe colocarse a 2.5cm. bajo el nivel superior de la losa.
- ☞ Las placas de Novalosa pueden ser perforadas o cortadas fácilmente para dar paso a instalaciones eléctricas, sanitarias, pozos de luz, etc.


GEOMETRIA	Espesor de lámina (mm)	Ancho útil (mm)	PESO (Kg/m ²)	Altura de onda (mm)	Minima Pendiente (Grados)	Separación máxima entre apoyos (m)	USOS
	0.35	856	3.12/3.08	18	7°	1.10	Cubiertas, paredes y frisos
	0.40		3.57/3.52			1.30	
	0.45	1060	4.01/3.95			1.50	
	0.50		4.46/4.39			1.70	
	0.60		5.35/5.27			1.90	

Fig. 2.8 Criterios Técnicos para el apuntalamiento de la NOVALOSA.

2.4.2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA **hormi2**^(R: 9)

El sistema es desarrollado por PANECONS (Paneles y Construcciones) bajo Patente italiana e introducido en el país hace pocos años. Se trata de un surtido amplio de paneles para muros y losa elaborados a partir de **poliestireno expandido de alta densidad**, reforzados con mallas electrosoldadas de acero. El montaje de estos paneles es rápido y la cualidad del material con que se construyen permite, antes de ser recubiertos con el mortero de microhormigón que luego los reviste, abrir los vanos de puertas y ventanas mediante el empleo de una simple cizalla manual.

El sistema consta de paneles verticales para la solución de los muros y también paneles de losa (entrepiso y cubierta). Los paneles para muros pueden ser:

- ☞ **PSME** (Panel Estructural)
Se refuerza con un acero de 2.5mm de diámetro en ambas direcciones, de manera que se define una malla con aberturas cuadradas de 65mm.
- ☞ **PSMC** (Panel de Cerramiento)
En este caso la malla de refuerzo define aberturas rectangulares de 65mm x 130mm.
- ☞ **PSMR** (Panel Reforzado)

Este panel posee refuerzo sólo en la dirección longitudinal, tratándose de alambres de 3mm de diámetro.

☞ **PSM2R** (Panel doblemente Reforzado)

Este panel se refuerza mediante una malla de alambre de 3mm de diámetro, que define aberturas cuadradas de 65mm x 65mm

La secuencia para el montaje de las paredes se puede resumir de la manera siguiente:

1. Replanteo, timbrado y chicoteado

Sobre la losa que se va a construir (puede tratarse de la propia losa de cimentación o de una losa de cubierta existente) se marca el eje de las paredes de acuerdo al Plano de Arquitectura. A ambos lados de cada eje se traza una línea con un color dado de manera que entre ambas se defina el espesor de la pared. Luego se trazan otras dos líneas de otro color equidistantes de las anteriores 2cm. Estas últimas definen la ubicación de los chicotes de acero que abrazarán al panel de pared. La **Figura 2.9** ilustra el procedimiento.

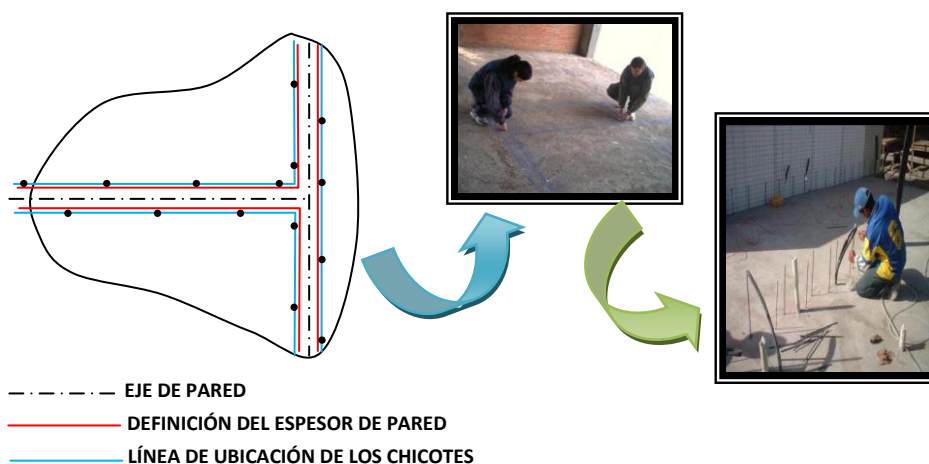


Fig. 2.9 Replanteo de las Paredes.

2. Montaje de los Paneles de Pared



Fig. 2.10 Detalle de montaje comenzando por una esquina de la obra.

La **Figura 2.10** ilustra una ampliación sobre una cubierta libre, pero igual puede tratarse de una nueva edificación que exigiría la preparación previa de la cimentación (en forma de balsa).

Una vez replanteadas las paredes se colocan los Paneles verticales que las definen, comenzando por una esquina para poder asegurar su alineación. El panel debe ubicarse dentro de las líneas de anclaje (chicotes), y durante el montaje se debe procurar cerrar espacios que definan celdas rígidas, para luego colocar los paneles horizontales (entrepiso o cubierta).

3. Colocación de los marcos de puerta y ventana

El corte del panel para habilitar los vanos de puertas y ventanas se realiza por medio de una cizalla manual de muy fácil operación, y dichos vanos pueden realizarse lo mismo antes de montar el panel (**Figura 2.11a**), que una vez colocados los paneles en su posición de proyecto.



Fig. 2.11 Colocación de marcos de puerta y ventana.



4. Colocación de las mallas adicionales de unión o traslape (Tipo MR, MA, MU)

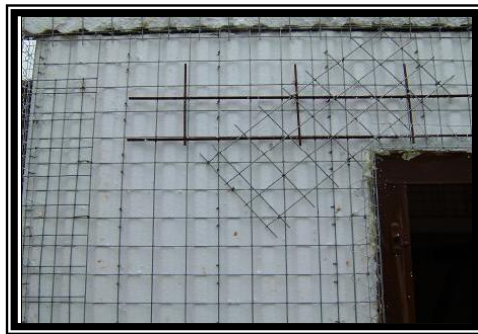


Fig. 2.12 Colocación de mallas adicionales de refuerzo a los Paneles.

En función del cálculo estructural y del proceso constructivo que se siga, se deben disponer mallas adicionales de refuerzo que pueden ser básicamente de tres tipos:

MR: Se colocan a 45° en las esquinas de vanos o aberturas (puerta, ventana, etc.), o para restituir la continuidad de la malla del panel cuando se perfora para dar paso a las redes técnicas (hidráulica, sanitaria, eléctrica)

MA: Se utilizan para reforzar longitudinalmente todas las líneas de convergencia entre dos Paneles, lo mismo verticalmente (entre dos Paneles de pared), que horizontalmente (entre un Panel de Pared y otro de entrepiso o cubierta)

MU: Se utilizan como refuerzo en filos de puerta y ventana, en salientes de pared, y en filos del Panel Losa.

5. Apuntalamiento de paredes y aplomado de los Paneles



Fig. 2.13 Colocación de mallas adicionales de refuerzo a los Paneles.



Para aplomar las paredes se utilizan reglas y puntales. La **Figura 2.13** ilustra la ubicación de puntales que permiten mantener aplomados los paneles antes de su revestimiento definitivo con el mortero lanzado de microconcreto.

6. Colocación del Panel de Entrepiso



Fig. 2.14 Colocación de mallas adicionales de refuerzo a los Paneles.

Los Paneles de losa se fabrican de longitudes variables de acuerdo a las exigencias de cada proyecto. Su ensamblaje es muy sencillo al igual que los Paneles de pared. Se puede emplear un refuerzo adicional con varillas o mediante mallas de 50cm de altura por debajo del panel losa, y por encima si la construcción fuera de más de un nivel. La **Figura 2.14** ilustra un refuerzo a base de varillas.

Cuando las luces son grandes se puede colocar una viga descolgada, también de panel. Las vigas se refuerzan con una malla tipo Omega que permite abrazar la viga y amarrarse a la malla del panel de losa. (Ver **Figura 2.15**)

Estas vigas descolgadas deben ser revocadas completamente y sólo pasado 7 días de haber sido revestidas con el microconcreto, es que puede colocarse la carpeta de hormigón superior en la losa.



Fig. 2.15 Colocación de mallas adicionales de refuerzo a los Paneles.

7. Solución de las Instalaciones

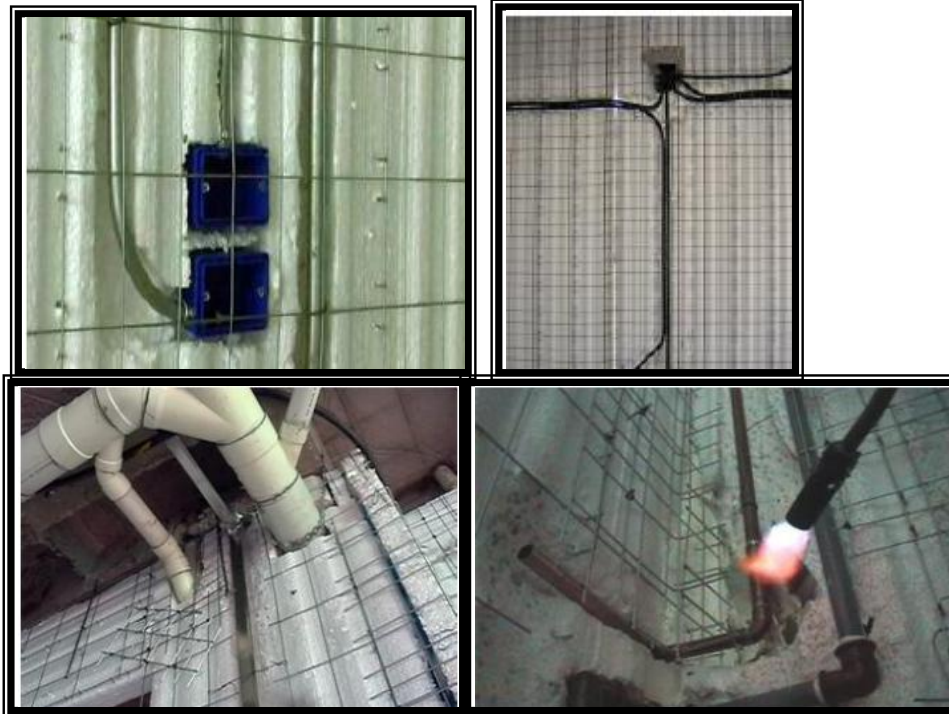


Fig. 2.16 Colocación de las Instalaciones Eléctricas, Hidráulicas y Sanitarias.

Una de las bondades del sistema responde a la probada comodidad para resolver las instalaciones eléctricas, hidráulicas y sanitarias. La docilidad del poliestireno permite realizar con mucha facilidad los pases que estas redes técnicas exigen, y como en ocasiones ellos implican una interrupción de la malla de refuerzo del propio panel, luego se le restituye su continuidad con el empleo de la malla adicional tipo MR.

8. Soporte de la Losa de Entrepiso (o Cubierta)

El soporte de la losa puede hacerse mediante apuntalamiento o mediante un encofrado de toda su superficie interior. El primero consiste en la disposición de travesaños, vigas o “gatas” sostenidas por puntales, mientras el segundo se refiere a un encofrado casi total de la superficie inferior, útil cuando se cuenta con suficiente madera y cuando se desea que el revoque de mortero se coloque luego en un mismo momento.

9. Aplicación del microhormigón sobre los Paneles de Pared

Para el lanzamiento del hormigón se emplea un equipo especial de proyección que lo va colocando en tres etapas: la primera capa de espesor tal que permita cubrir la malla del panel, la segunda proyectada luego de transcurridas 2 ½ horas aproximadamente, y hasta

alcanzar 3cm de recubrimiento, y por último una tercera capa de 5mm a base de un mortero con arena fina para garantizar un adecuado acabado final. Se debe comenzar revistiendo exteriormente y luego pasar al interior. El microhormigón debe asegurar las prescripciones que define el sistema.

10. Vaciado de la carpeta de hormigón de la Losa

La carpeta es de 5cm de espesor y antes de vaciado el hormigón se debe verificar la efectividad de su apuntalamiento. Cuando ya se han vertido los primeros 3cm se dispone una malla de retracción y temperatura

La **Figura 2. 17** ofrece un montaje fotográfico de estas últimas actividades.



Fig. 2.17 Ilustración de las últimas etapas de ejecución del sistema.

Conversaciones que ha sostenido el autor con técnicos lojanos que poseen ya experiencia en el empleo de este sistema, permite resaltar las siguientes bondades:

- ☞ Agilidad en la ejecución, acortando significativamente los plazos de construcción hasta llegar a la puesta en marcha de la obra (llave en mano)
- ☞ Reducción y rápida especialización de la mano de obra

- ☞ Reducción de las áreas de almacenamiento de materiales y herramientas
- ☞ Limpieza en la obra
- ☞ Versatilidad del sistema (puede emplearse no sólo en los programas de vivienda)
- ☞ Sencillez en la solución de las instalaciones técnicas (eléctrica, hidráulica y sanitaria)

Ya ha comenzado a emplearse este Sistema en la Ciudad de Loja y la **Figura 2.18** refiere una visita que hiciera el autor del Trabajo junto a su Director de Tesis, a una ampliación en un tercer nivel que hasta el momento de la ampliación funcionaba como terraza, y que se ejecutaba en la intersección de la Calle Miguel Río Frío y la Avenida Iberoamericana.



Fig. 2.18 Obra en ejecución ubicada en Miguel Río Frío y Avda. Iberoamérica.



2.4.3 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA PLAYCEM

En la búsqueda de soluciones constructivas de interés social para el Ecuador, la Empresa Eternit Ecuatoriana S.A. propuso el sistema PLYCEM prefabricado, con las siguientes especificaciones técnicas:

- Paredes interiores y exteriores (Eternit)
- Estructura metálica para la cubierta.
- Refuerzos esquineros.
- Elementos de anclaje para las paredes.
- Placas onduladas para la cubierta.
- Tornillos y pernos para el ensamble.
- Cielo raso.

Este sistema, aunque no considera precisamente una propuesta de prefabricación a base de hormigón, sí recurre al principio de la industrialización para aprovechar las bondades de la técnica. Fue diseñado en 1994 y enfocado básicamente a las provincias de la costa ecuatoriana, con buena aceptación social en sus inicios, pero que en la actualidad no representa una alternativa de solución social por sus altos costos.

Otras alternativas de vivienda en las que se recurre a la prefabricación total o parcial de sus sistemas estructurales, y cuya experiencia debe multiplicarse en la región, son las siguientes:

- ☞ Viviendas en base a Hormigón Armado:
 - con placa colaborante **TUGALT**.
 - sistema modular (columnas y paneles), **PREFA**.
 - estructura de Paneles **EMMEDUE/ PANECONS**
 - estructura de Paneles Modulares núcleo **EPS**
 - estructura de **Acero-Hormigón**.
 - estructura de **Paneles de Hormigón**
 - estructura de **Madera** en tablón macizo
- ☞ Viviendas Prefabricadas modulares de Madera con Base de Hormigón y estructura de Acero - Madera (maciza o laminada).
- ☞ Viviendas Prefabricadas Modulares con base de Hormigón y Estructura en Sándwich de madera.
- ☞ Viviendas Prefabricadas Móviles (Móvil Homes) - Bungalows Prefabricados y Bungalows de Madera.
- ☞ Viviendas de Madera Prefabricadas con base de Hormigón y Estructura de Madera sistema SANDINO.
- ☞ Viviendas construidas en base a tierra CYTED.
- ☞ Viviendas Prefabricadas con Base de Yeso.
- ☞ Viviendas prefabricadas artesanales ABIERTO-LIVIANO
- ☞ Viviendas Ecológicas.
- ☞ Viviendas ecológicas elaboradas a base de materiales de desecho o basura reciclables EARTHSHIPS.



Mientras que existen otras alternativas, ya de **Viviendas Convencionales**, que no se fundamentan en la técnica del prefabricado, pero en cuyo sistema estructural horizontal pudieran insertarse soluciones como las que se discuten en esta investigación. Se citan las siguientes:

- ☞ Viviendas tradicionales en base a **Hormigón Armado** y **Mampostería de Tierra** cocida.
- ☞ Viviendas tradicionales en base a **Hormigón Armado** y **Mampostería de Bloque** de microhormigón.
- ☞ Viviendas de **Bloque Estructural**.
- ☞ Viviendas de **Madera**.

2.5 EXPERIENCIA INTERNACIONAL EN LA SOLUCIÓN DE PLACAS DE HORMIGÓN MEDIANTE LA PREFABRICACIÓN.

No se trata de describir en este apartado todas las soluciones constructivas que se emplean internacionalmente, ni tan siquiera todas las que fueron revisadas durante la investigación. Tal pretensión desbordaría las posibilidades de este documento. En realidad se presentará una apretada síntesis de aquellas que parecen ser pertinentes para el Ecuador, con el fin de despertar el interés por ellas, algunas de las cuales han sido empleadas ya nacionalmente.

2.5.1 LOSA HUECA PRETESADA “SPIROLL” (LS)

La losa hueca de hormigón **pretesado** es un elemento estructural aligerado de fabricación industrializada, de alta tecnología, utilizable en las más diversas soluciones constructivas, principalmente en función de entrepiso, cubierta o panel de cierre (muro o pared), de ahí que corresponda a los programas de prefabricación abierta. La losa se produce en Plantas especializadas con diversos espesores (100, 150, 200 y 300mm), aunque otros espesores pueden quedar a solicitud del cliente (250, 350 y 400 mm). El ancho estándar de la losa es constante (1 200mm) respondiendo a un macromódulo de 1.20m, bastante utilizado internacionalmente. Esta modulación facilita su tipificación e intercambiabilidad entre muy diversos sistemas constructivos.

La **Figura 2.19** ilustra cuatro tipologías de losa (atendiendo a su espesor y cantidad de acero), de las más de 100 que se pueden producir en serie. Es una tecnología bastante extendida en varios países europeos, y también en Cuba.

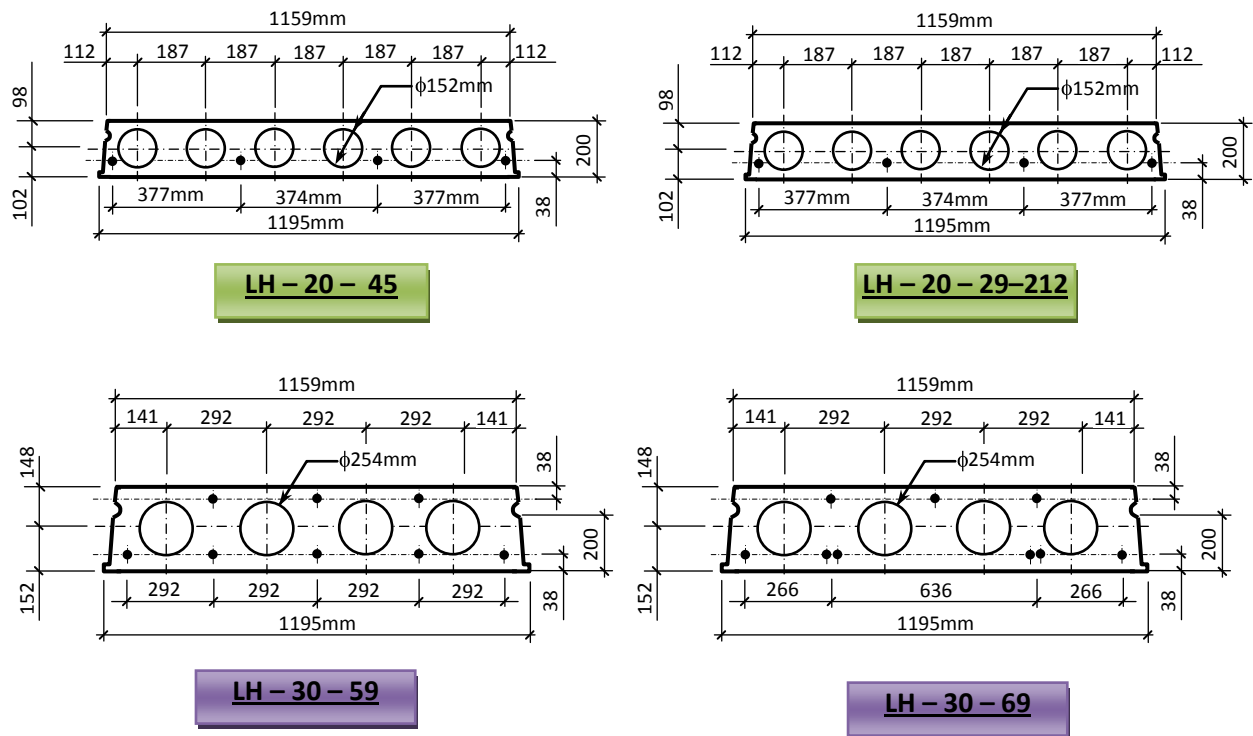


Fig. 2.19 Secciones de la losa pretensada Spiroll.

Una de las características que la distingue son los orificios de sección circular que posee y que además de aligerar considerablemente su peso propio, mejora sus propiedades de aislamiento térmico y acústico, y pueden servir como conductos para las instalaciones eléctricas e hidráulicas.

El empleo de la losa hueca en diferentes tipos de edificaciones proporciona comodidad gracias a la simplicidad y la rapidez de su uso ya que son montadas según el esquema de simple apoyo y no necesitan ningún apuntalamiento. Gracias al tipo de conexión su montaje se vuelve sencillo y rápido, definiendo un entrepiso inmediatamente utilizable como área de trabajo y de tránsito, y para las operaciones de completamiento (fundición de juntas).

CAMPO DE APLICACIÓN: La losa puede ser utilizada lo mismo como elemento de entrepiso y cubierta, o incluso como elemento vertical de pared, lo mismo en la construcción de obras sociales, militares, que industriales. En adición, cualquiera sea la exigencia de proyecto, por su naturaleza y características propias, la losa permite una utilización rápida y funcional para cualquier tipo de estructura, apoyándose lo mismo sobre muros de mampostería que de hormigón armado, también sobre paneles prefabricados, que sobre estructuras de acero.

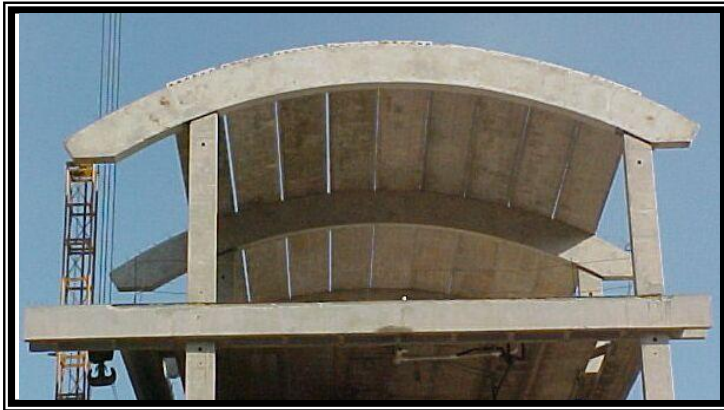


Fig. 2.20 Empleo de losa Spiroll como elemento de Cubierta

La losa Spiroll puede ser utilizada apoyándose en cubiertas arqueadas dando una buena expresión arquitectónica, como se empleara en el Hotel Monteverde, en La Habana. Puede resolver con modernidad soluciones tradicionales o permitir soluciones de proyecto sustancialmente nuevas, con la eliminación de soportes intermedios, lo cual permite obtener grandes espacios libres.

Si existen grandes luces y sobrecargas, así como problemas estáticos, la losa brinda soluciones muy seguras ya que:

- Sus características inerciales, la armadura pretensada y la elevada resistencia mecánica de los hormigones (relación $A/C \approx 0.32$) le confieren al producto alta resistencia a la compresión (37 MPa).
- La doble superficie plana proporciona a igual altura la máxima inercia por flexión. Esta alta rigidez unida al pretensado permite trabajar con losas de elevada relación *luz/espesor* y garantiza una baja deformación con todas las ventajas que de ello se derivan.
- La configuración particular de las superficies laterales (llaves de cortante), producidas a solicitud del cliente, permite una excelente transferencia de los esfuerzo de cortante entre losas contiguas, asegurando una notable repartición de las cargas concentradas, además de servir como medio de agarre mecánico que permite la unificación de deformaciones entre las losas en la etapa de trabajo.

TECNOLOGÍA DE PRODUCCIÓN: La losa hueca pretensada es extrusada, es decir, producida mediante moldes deslizantes horizontales en un proceso mecanizado. Los elementos se producen generalmente en bancos de pretensado de 120 a 180m de longitud. Para su almacenaje se debe utilizar un área correctamente nivelada y compactada con áreas de circulación que permitan radios de giro a los equipos que laboran en las mismas, además de los esquemas de almacenaje previstos para cada tipo de losa según su largo y espesor.

El autor pudo constatar durante una visita que realizara a Cuba en el año 2006 el amplio empleo de esta tipología de losa en el país, llegando a conocer en entrevista que sostuviera con varios profesionales del sector su diversidad. La **Tabla 2.3** refiere sólo algunas de sus aplicaciones.

Tabla 2.3 Algunos ejemplos de empleo de la Losa Spiroll en Cuba

OBRA	SUPERFICIE DE LOSA EMPLEADA (m ²)
Hotel Palacio de las Convenciones (Palco)	14 000
Restaurante El Pedregal (En esta obra se emplearon losas con voladizos que oscilaron entre 1.50 y 4.50 m)	5 000
Marina Hemingway	6 200
Lonja del Comercio (Planta Alta y Parqueo)	4 000
Centro Comercial Primera y Paseo	300

Ténganse en cuenta que la losa es tan flexible que aunque se emplea básicamente en la solución de entrepisos y cubiertas, en Cuba se ha desarrollado un sistema (LH⁶) que la utiliza también como elemento de pared, constituyendo el elemento principal del sistema estructural vertical. La **Figura 2.21** muestra un ejemplo en el que se ha empleado el sistema LH.



⁶ El sistema LH (Losa Hueca) permite resolver edificios de viviendas de 4 ó 5 niveles con el empleo exclusivo de la losa pretensada Spiroll, tanto para la estructura vertical (muros) como para la horizontal (entrepisos y cubierta). Las divisiones interiores se realizan mediante paneles ligeros o albañilería de bloques de hormigón.

2.5.2 LA LOSA NERVADA



Fig. 2. 22 Losa casetonada de doble nervadura.

En realidad son muy diversas las tipologías de losas que recurren al empleo de nervios longitudinales y/o transversales para mejorar sus índices técnico económico. Las losas macizas de hormigón (espesor constante) poseen el inconveniente de desaprovechar una parte importante de su altura cuando trabajan a flexión, precisamente toda aquella que se somete a tracción. Para mejorar este inconveniente se prefiere ubicar el hormigón hacia la zona de compresión, y quizá con el mismo consumo de este material se puede ganar en peralte y con ello en resistencia y rigidez. La manera más razonable de lograrlo es mediante nervios y una carpeta de hormigón de escasos centímetros.

Los nervios reducen la luz de trabajo de la carpeta y su forma de trabajo (pudiendo lograr que cada paño de losa dentro de la carpeta trabaje en dos direcciones), exigiendo así cuantías de refuerzo que generalmente se acercan a las cuantías mínimas exigidas por los Reglamentos. El éxito estructural queda garantizado: quizá con el mismo consumo de hormigón que el requerido por una losa maciza, se gana en capacidad resistente, en rigidez (menor flecha), y sobre todo se optimiza significativamente el consumo de acero. La solución in situ que tradicionalmente se emplea en la Ciudad de Loja mediante el empleo de bloques de hormigón que definen nervios en la losa, es una solución razonable desde el punto de vista estructural, pero desaprovecha las bondades de la prefabricación.

La **Figura 2.22** muestra un ejemplo de losa nervada prefabricada en el momento de izaje y colocación. Esta tipología de losa se emplea internacionalmente con mucha frecuencia, y en Cuba es propia del Sistema **IMS**⁷, cuyas características principales se describen a continuación.

El Sistema responde a los principios de la prefabricación abierta. Se basa en una red modular simple de cuatro columnas y losas con nervaduras que se unen mediante el postensionado, lo cual le confiere una alta ductilidad a la estructura y con ello una elevada aptitud sismo resistente. A

⁷ El nombre del sistema responde al Instituto de Materiales de Servia, donde naciera el sistema en 1957.

partir de esa célula básica el crecimiento puede darse en las tres direcciones (longitudinal, transversal y vertical) (Ver **Figura 2.23**). Hasta ocho niveles las columnas poseen una sección de 30cm x 30cm, entre ocho y doce niveles de 34cm x 34cm, y a partir de 12 y hasta 18 niveles de 38cm x 38cm.

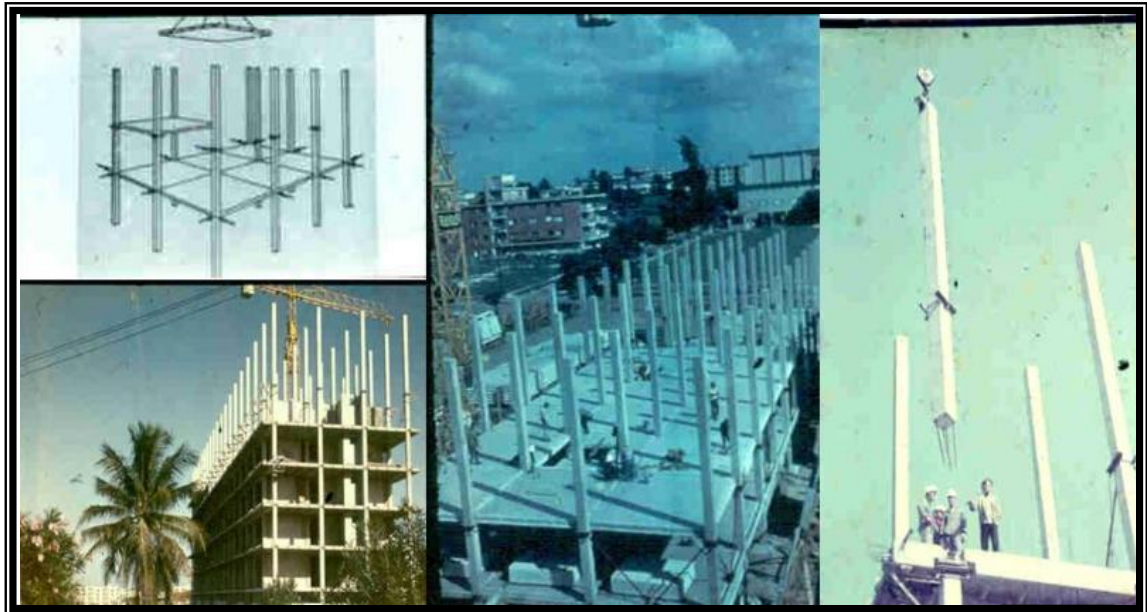


Fig. 2. 23 Célula básica del sistema IMS. Una vez montadas las columnas, la losa se iza y coloca sobre elementos de apoyo temporal para luego postensionar longitudinalmente al edificio.

La rigidez del edificio ante carga horizontal (viento y sismo) se logra mediante la ubicación entre columnas de paneles prefabricados que funcionan como tímpanos (muros de cortante). Los tímpanos se ubican de acuerdo al diseño estructural que se haya propuesto, y sus dimensiones aseguran que al colocarles queden separados de las columnas 45 cm, reserva que se aprovecha para colocar el acero que se requiera longitudinalmente desde la misma base del edificio, para luego vaciar hormigón in situ y asegurar la continuidad en el sentido vertical (altura) de los tímpanos.

El sistema posee un elevado grado de prefabricación pues prácticamente todos los elementos son elaborados industrialmente en Planta:

- Cimiento aislado para columnas (plato-vaso)
- Pedestal
- Columnas (de uno, dos y tres puntales de 2.70m cada uno)
- Losa nervada (de dimensiones únicas: 4.20m x 4.20m pero de varios tipos para asegurar el diseño arquitectónico: pases de escalera, patinejos, etc.)
- Vigas (de borde y de voladizo)

- Tímpano
- Escalera
- Paneles de fachada
- Cabinas Sanitarias
- Parapetos, pretilas, paneles divisorios, etc.

CAMPO DE APLICACIÓN: Se emplea lo mismo en proyectos de viviendas que en obras sociales (hospitales, hoteles, etc.)

TECNOLOGÍA DE PRODUCCIÓN: Todos los elementos son de hormigón armado y se producen en Plantas Fijas cuya inversión inicial puede resultar alta, razón que limita el empleo del sistema para las pretensiones de esta investigación, encaminada básicamente a los programas de vivienda enfocados a familias de bajos ingresos económicos. La **Figura 2.24** ilustra detalles de una Planta típica del Sistema.



Fig. 2. 24 Planta Fija para la producción de los elementos del sistema IMS.

Otro tipo losa nervada es la **T** o la **2T** (Ver **Figura 2.25**). Posee el mismo principio que cualquier otra losa con nervadura: ganar en rigidez y resistencia con índices técnico económico competitivos en cuanto a consumo de hormigón y acero.

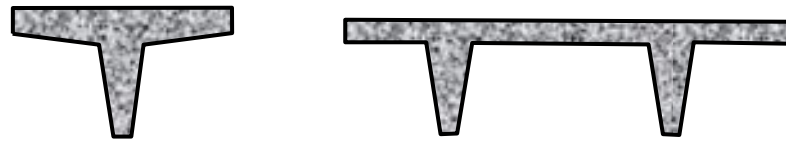


Fig. 2. 25 Losa T y 2T con nervios longitudinales.

La losa puede ser de hormigón armado u hormigón pretensado. En Cuba representa el elemento principal de entrepiso y cubierta para diferentes sistemas constructivos por ceñirse al principio de la prefabricación abierta (intercambiabilidad del elemento dentro de un mismo sistema, y de un sistema a otro). Por ejemplo, la losa 2T de hormigón armado se emplea en una luz de 6.00m en el Sistema **Girón** (Ver esquema de despiece del sistema en la **Figura 2.26**), y en una luz de 12.00m, ya pretensada, en el sistema **SMAC**⁸.

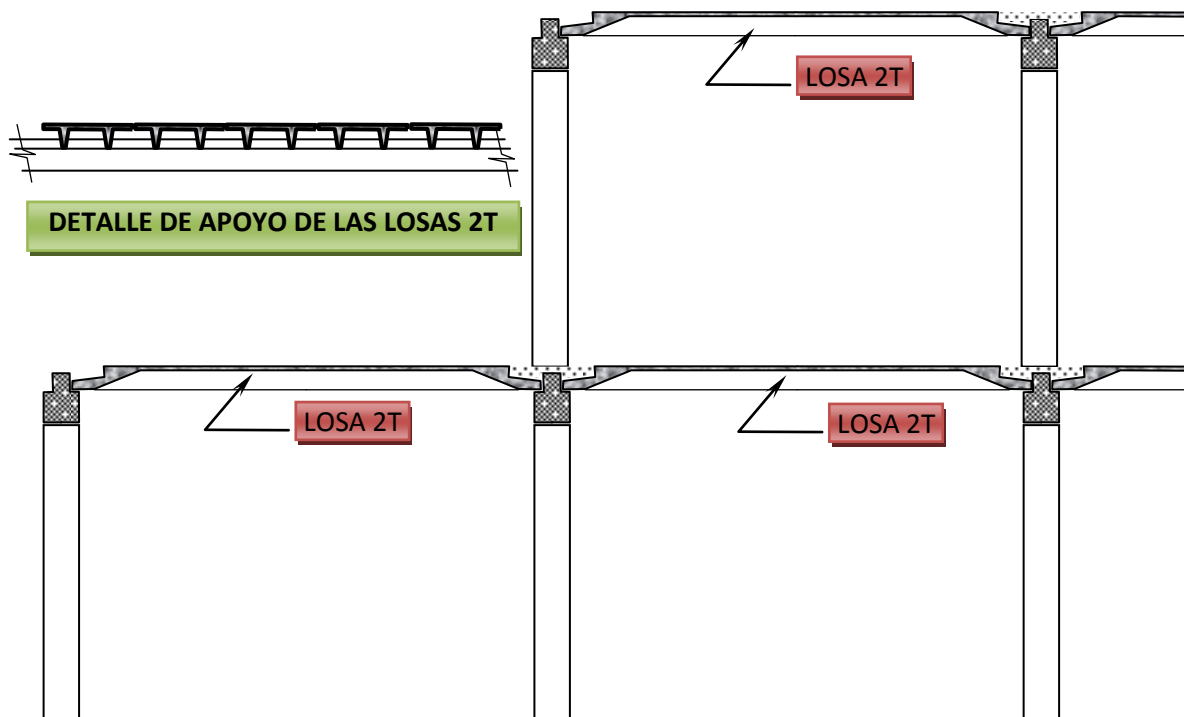


Fig. 2. 26 Detalle de los pórticos del sistema Girón y empleo de la losa 2T.

⁸ SMAC significa “Sistema de Múltiples Aplicaciones para Cuba”



2.6 PREFABRICACIÓN ALTERNATIVA EN LA SOLUCIÓN DE LOSAS DE HORMIGÓN

Para los países en vías de desarrollo y con escasa experiencia en el empleo de la prefabricación no resulta aconsejable enfrentar el grave problema de la falta de vivienda mediante el empleo de la industrialización de los procesos en Plantas Fijas que exijan un costo elevado, mucho menos que respondan a las reglas de la prefabricación cerrada, y menos aun que fragmente a la estructura en elementos que por su peso requieran de grúas para su manipulación.

La tendencia debe ser pensar en la producción de la mayor cantidad de elementos en Plantas que, aunque bien diseñadas para asegurar un flujo de producción estable y una calidad que garantice su aceptación, no exijan costosos equipos y recurran a procesos de ejecución que no se aparten sensiblemente de la construcción tradicional. Claro que la implementación de tales Plantas no sería suficiente para que un programa dado asegure eficacia en su introducción, sino que se requiere, sobre todo, un nivel de coordinación regional, provincial y hasta nacional, que asegure los siguientes principios básicos:

- ☞ Coordinación dimensional en los proyectos de arquitectura.
- ☞ Tipificación de los elementos principales de los sistemas estructurales (horizontal y vertical), y también de los elementos de cierre y terminación.
- ☞ Producción de elementos catalogados con el máximo de intercambiabilidad entre los diferentes sistemas y tecnologías empleadas
- ☞ Procurar una fragmentación que asegure elementos cuyas dimensiones permitan su manipulación sin requerir equipos de izaje.
- ☞ Ubicar preferentemente la Planta equidistante a la zona de suministro de los materiales básicos (áridos, cemento, acero, etc.), y la obra, especialmente cuando se trate de programas que procuren altos volúmenes de ejecución como sucede, por ejemplo, en Ciudad Victoria.
- ☞ Que la Planta responda a un diseño que le permita desmontarse y trasladarse a otro emplazamiento con el menor grado de depreciación.

Son numerosos los programas que responden a estos principios, y a seguir se esbozarán las principales características de aquellos que ofrecen solución a los elementos del sistema de entrepiso y cubierta para viviendas, con un elevado índice de prefabricación.

2.6.1 SISTEMAS DE FORJADOS UNIDIRECCIONALES (VIGUETA Y BOVEDILLA).

Estos sistemas responden al principio de la prefabricación abierta y recurren a los siguientes elementos:

1. Viguetas prefabricadas de hormigón.
 - Vigueta pretensada
 - Vigueta de hormigón armado
 - Semi Vigueta de hormigón armado
2. Piezas de entrevigado no resistente, con función de aligeramiento y encofrado (bovedilla).
 - Bloque de mortero de hormigón
 - Bloque cerámico
 - Bloque aligerado de poliestireno expandido
 - Bovedilla convexa de microhormigón (utilizada como encofrado perdido o recuperable)
 - Otras
3. Armadura de repartición, retracción y temperatura (colocada in situ antes del vaciado de la carpeta)
4. Carpeta de hormigón “in situ”.



Fig. 2. 27 Entrepiso formado por viguetas de hormigón Pretensado y bovedillas de bloque de mortero de hormigón .

La **Figura 2.27** expone lo que algunos reconocen como la solución clásica de forjados unidireccionales en base al empleo de viguetas y bovedillas.

Las viguetas son pretensadas y se fabrican en Planta, variando las dimensiones de su sección transversal, y cuantía de acero pretensado atendiendo a la luz en que se empleen, pudiéndose colocar incluso dos viguetas unidas para definir un nervio, cuando las luces y carga lo requieran por resistencia.

Se dice que la vigueta es semi resistente cuando es necesario apuntalar durante el proceso constructivo de la carpeta.

Una vez que las viguetas han sido elaboradas en la Planta e inmediatamente después de la transferencia de la fuerza de pretensado (la técnica que se sigue es el pretesado que se describiera en la **Sección §2.2**), las viguetas no deben presentar tracciones superiores a la resistencia a tracción directa del hormigón utilizado ($f_{c1} \leq |f_{ct}|$), ni compresiones superiores al 60 % de su resistencia a compresión ($f_{c2} \leq 0.60f'_c$), siendo $f_{ct} = 0.33\sqrt{f'_c}$ y evaluándose f'_c a la edad en que se produce la transferencia.

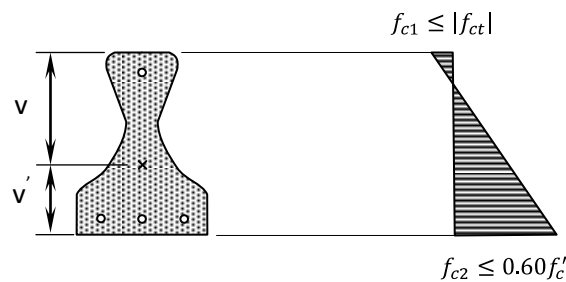


Fig. 2. 28 Tensiones límites en la sección de hormigón en el instante de la transferencia.

Como magnitud de la fuerza de pretensado transferida, se toma el valor de la fuerza de tesado disminuida en la suma de las pérdidas iniciales originadas por:

1. Penetración de cuñas.
2. Relajación a temperatura ambiente hasta la transferencia.
3. Retracción anterior a la transferencia.
4. Acortamiento elástico instantáneo al transferir.

Los fabricantes ofrecen Tablas y Ábacos que permiten seleccionar rápidamente el tipo de vigueta que se requiere para un proyecto en particular (cargas y luces), lo que agiliza significativamente las actividades de proyecto. Lo interesante de estas soluciones desde el punto de vista del cálculo estructural es la identificación de las hipótesis de carga, debiéndose distinguir la etapa de ejecución de la carpeta (cuando vaciado el hormigón de la carpeta no alcanza la resistencia suficiente como para que forme parte de la sección resistente), y la etapa para cuando la sección resistente se completa con la carpeta y el sistema queda apto para recibir las cargas vivas de servicio.

Una segunda variante se refiere al empleo de semiviguetas de hormigón armado y la propia bovedilla formada por bloque de microhormigón. La **Figura 2.29** ofrece detalles de esta variante.



Fig. 2.29 Solución conformada por Semi Viguetas de hormigón armado y Bovedillas de bloque de mortero de hormigón.

Obsérvese cómo la vigueta semi resistente puede ser manipulada sin recurrir a equipos de izaje, y también el tipo de apoyo de la bovedilla (bloque de hormigón) sobre ella. Es evidente la rapidez que puede alcanzarse en el montaje de un entrepiso con estas soluciones, a más de la práctica eliminación de la madera como encofrado, cuando no sea para apuntalar las viguetas antes del vaciado de la carpeta.

Al vaciarse in situ el hormigón de la carpeta debe verificarse antes que la sección transversal del forjado cumpla con los siguientes requisitos:

- El espesor mínimo de la losa superior de hormigón será de 3 cm sobre viguetas y piezas de entrevigado.
- En el caso de viguetas que no tengan armaduras transversales de conexión con el hormigón in situ, el perfil de la pieza de entrevigado debe dejar a ambos lados de la cara superior de la vigueta un paso de al menos 2.0cm.

Las condiciones anteriores buscan por un lado asegurar la necesaria continuidad transversal mediante un espesor adecuado de la losa superior y por otro, garantizar que el perímetro de la vigueta quede embebido en el hormigón in situ.

En cuanto a la Armadura de reparto, longitudinal y transversal, que se dispone en la carpeta se resuelve con alambres de acero en dos direcciones a intervalos no superiores a 30cm en la dirección perpendicular a los nervios, ni a 60cm en la dirección paralela a los nervios, pero cumpliendo siempre con las siguientes restricciones:

☞ **En la dirección perpendicular a los nervios**

$$A_{s1} \geq \begin{cases} \frac{250h_o}{f_y} \\ \frac{2000}{f_y} \end{cases}$$

☞ **En la dirección paralela a los nervios**

$$A_{s2} \geq \begin{cases} \frac{250h_o}{f_y} \\ \frac{1000}{f_y} \end{cases}$$

Siendo:

h_o : Espesor mínimo de la losa superior sobre la pieza de entrevigado.

f_y : Resistencia del acero

A_{s1} : Área de acero transversal (perpendicular a las viguetas)

A_{s2} : Área de acero longitudinal (paralelo a las viguetas)

Esta armadura de reparto cumple un papel esencial para la distribución transversal de cargas locales, evitando la fisuración del revestimiento de la cara inferior del forjado. Así mismo sirve para repartir las fisuras producidas por la retracción y las variaciones de temperatura; dar resistencia en el plano del forjado frente a las acciones horizontales que actúan sobre el conjunto de la estructura, asegurar el enlace entre el forjado y el resto de la estructura frente a acciones imprevistas etc. Por ello se prescribe que la armadura de reparto este constituida por barras en las dos direcciones aunque predominando en la dirección perpendicular a los nervios.

En forjados con viguetas de hormigón pretensado la armadura mínima longitudinal en la zona de momentos negativos debe tener una sección (A_s^-) que verifique:

$$A_s^- \geq \begin{cases} (0.08b_o h) \frac{f_c'}{f_y} \\ 0.006b_o \end{cases}$$



Siendo:

b_o : Ancho mínimo del nervio de la vigueta.

h : Espesor total del forjado.

CONSIDERACIONES ESTRUCTURALES: Durante el vaciado “in situ” de la carpeta las viguetas deben soportar por si solas el peso propio total del forjado y una sobrecarga de ejecución que, salvo justificación especial, no se considerará inferior a 1 kN/m^2 (100 kg/m^2). Las luces de cálculo se deben medir entre apoyos y ejes de sopandas si estas existen.

En los forjados de piso se tienen en cuenta las cargas permanentes superficiales de peso propio del forjado, relleno, revestimientos, de muros y tabiquería (si existen), y las sobrecargas vivas o de uso. En el proceso de apuntalamiento de plantas sucesivas durante la ejecución se recomienda mantener el apuntalamiento hasta el suelo.

Los forjados según estén proyectados, pueden trabajar como simplemente apoyados, como pieza elásticamente empotrada o como pieza perfectamente empotrada en sus extremos. Para ello deben cumplir con las siguientes condiciones:

Forjado simplemente apoyado: Debe ser tal que en la rotura la sección de apoyo así como las contiguas hasta una distancia de la misma igual al 8% de la luz, sean capaces de absorber un momento flector negativo igual al 25% del momento flector positivo de la pieza, aunque el apoyo en sí no tenga capacidad para absorber ese momento.

Forjado semiempotrado: Debe ser tal que la sección de apoyo, así como las contiguas hasta una distancia de la misma igual al 15% de la luz, sean capaces de absorber un momento flector negativo igual al 50% del momento flector positivo de la pieza, o igual al 70% del isostático.

Forjado biempotrado: Debe ser tal que la sección de apoyo, así como las contiguas hasta una distancia de la misma igual al 22% de la luz, sean capaces de absorber un momento flector negativo igual al 100% del momento flector positivo de la pieza, o igual al 55% del isostático.

En todos los casos la luz de cálculo se mide entre ejes de elementos de apoyos salvo que estos sean muros, en cuyo caso puede tomarse la luz libre más el canto del forjado si resulta menor.

2.6.2 SOLUCIONES SUSTENTABLES DE ENTREPIOS Y CUBIERTAS

Con estas soluciones se procura que las viguetas prefabricadas sean de sección transversal pequeña y que alcancen luces entre 3.00m y 4.00m. Se pueden colocar elementos de cofre perdido entre las mismas y pueden ser completadas o no con una carpeta de hormigón in situ. Se consideran viguetas aquellos elementos que tienen su sección completa y semi - viguetas los que parte de su sección se completa una vez colocada en su lugar de trabajo. Sus materiales componentes pueden ser hormigón armado o pretensado.

Las viguetas de hormigón armado se pueden producir con tecnologías simples, lo mismo a pie de obra que en polígonos o plantas de producción. Existe una diversidad amplia de soluciones en la que el elemento común es la vigueta de hormigón armado o pretensado, mientras que el cierre del espacio entre éstas es lo que cambia, describiéndose a continuación sólo algunas de las soluciones más generalizadas.

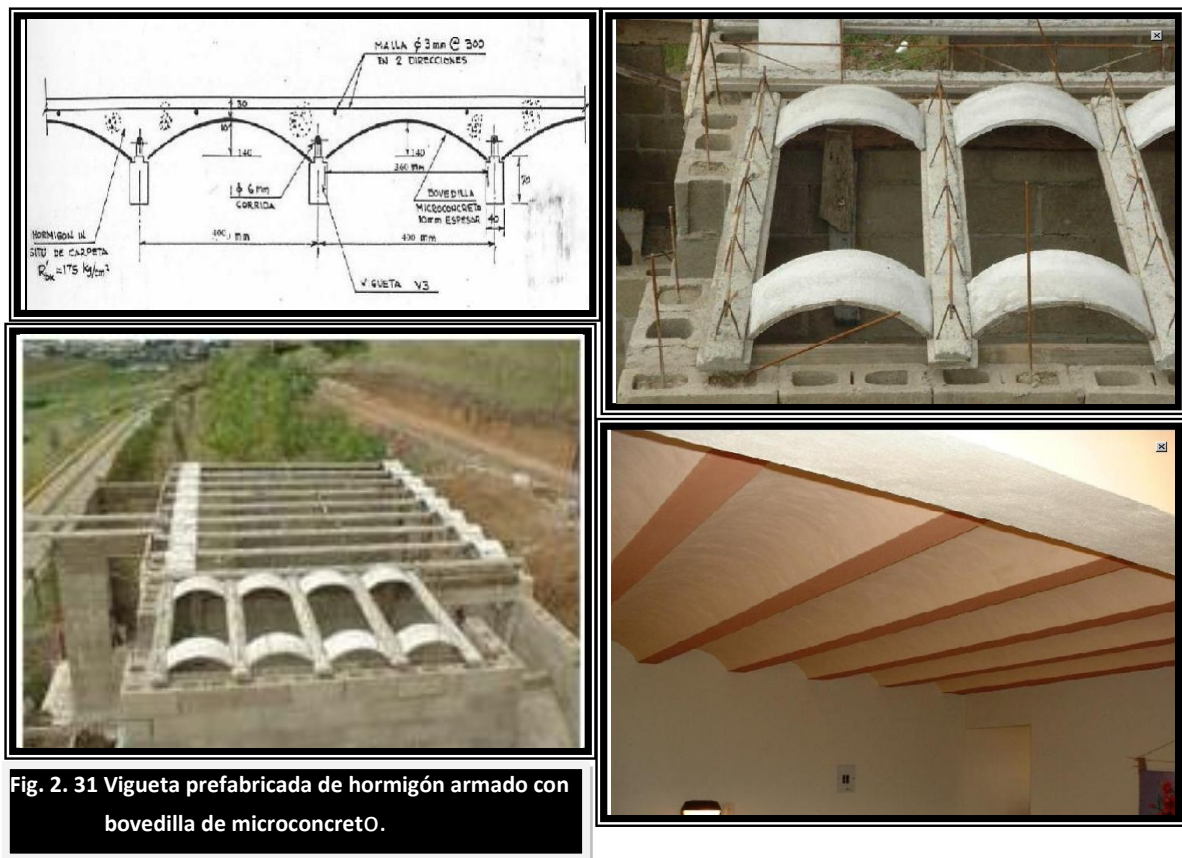
A. Vigueta y Dovelas



Fig. 2.30 Entrepiso de bovedilla de microhormigón

Las dovelas son elementos laminares prefabricadas de forma curva que se apoyan sobre viguetas temporales o no. Sus dimensiones pueden oscilar entre 400mm y 600mm pudiendo ser de mortero, hormigón, cerámica, ferrocemento, microconcreto, cemento-fibra vegetal, etc.

Pueden producirse a pie de obra, en polígonos o en plantas de prefabricado ya que los moldes pueden ser muy sencillos. Se emplean tanto en cubiertas como en entrepisos de viviendas. Las Figuras 2.30 y 2.31 muestran dos soluciones diferentes bajo una misma idea.



En la Figura 2.30 las viguetas empleadas son de madera y luego de vaciada la carpeta y endurecido el hormigón que se ha colocado (pasado de 3 a 7 días), se pueden retirar al unísono de los puntales o sopandas. Claro que en lugar de madera, las viguetas pudieran ser también metálicas (Perfiles I) que luego se retiran.

Mientras tanto en la Figura 2.31 se emplean semi viguetas de hormigón armado sobre las que se apoyan las dovelas para luego vaciar el hormigón de la carpeta y completar a la vez la sección resistente de la vigueta. Otras combinaciones pueden darse que permitan incluso recuperar hasta la propia dovela con el fin de reutilizarla mientras no pierda sus cualidades.

B. Losa Cajón Pretesada

Esta solución fue detenidamente analizada en esta investigación y se confirmó sus posibilidades de producción en la misma Planta en que se produzca la variante que se convirtió en su objetivo central: la prelosa **PPCC**.

La losa cajón a la que se refiere esta sección se concibe a partir de los principios del pretensado, con la virtud de que todo el equipamiento que se requiere para su fabricación responde a una tecnología muy sencilla que resulta completamente transferible al Ecuador. La **Figura 2.32** ilustra algunos detalles de interés de esta solución.



Fig. 2. 32 Losa Cajón Pretesada para soluciones de
entrepiso y cubierta.

Nótese que la losa es perfectamente manipulable por dos obreros como consecuencia del peso que asegura sus dimensiones. Además se elimina completamente el empleo de madera para el encofrado y una vez colocadas las losas conforman una plataforma sobre la que puede seguir trabajándose siempre que no se introduzcan cargas excepcionales de ejecución. El proceso de fabricación de la losa es muy similar al que se sigue para la variante **PPCC** y los detalles del mismo se abordarán en el **Capítulo 3** de este documento.

C. Prelosa PPCC

Todas las soluciones sustentables presentadas en el epígrafe § 2.6.2 ya han sido empleadas en los programas de vivienda en Cuba, y bajo la colaboración de especialistas de ese país han sido introducidas en otros países latinoamericanos como Colombia, República Dominicana, Bolivia, México, Brasil, etc. Sin embargo, el elemento **PPCC** que centra la atención de esta investigación y que fue concebido por los Drs. Julio A. Hernández Caneiro y Jorge Acevedo Catá, ambos disertantes en la Maestría que ampara esta investigación, exigió un proceso de análisis, lo mismo estructural que tecnológico, de la cual este trabajo forma parte bajo la dirección del primero de los especialistas citados.

En esta sección sólo se indicará un detalle del elemento pues a su modelación y tecnología de fabricación, se dedicará el tercer Capítulo. La **Figura 2.33** ofrece un esquema de esta variante.

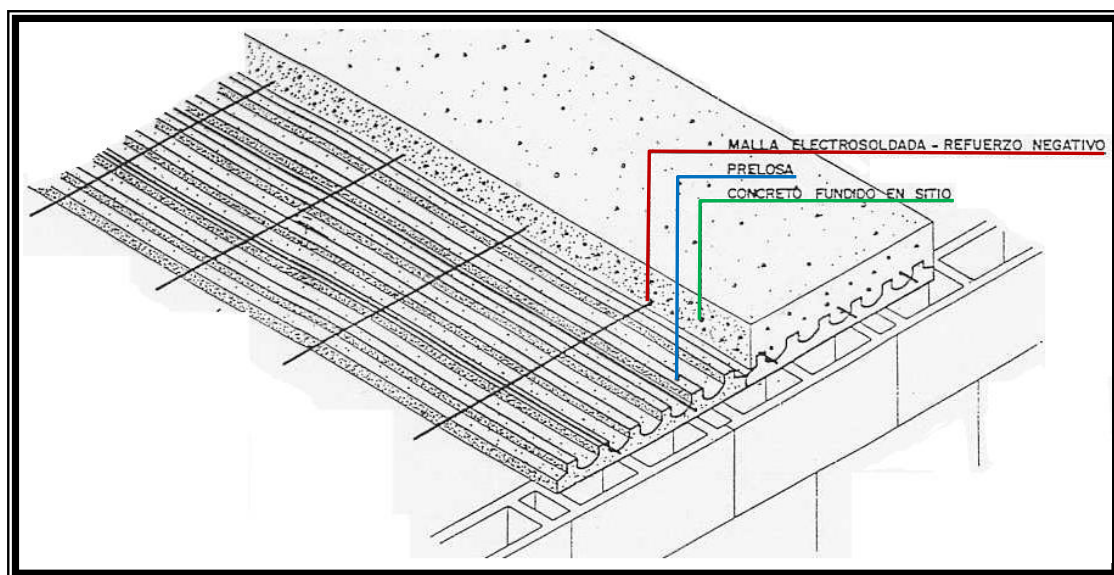


Fig. 2. 33 Detalle de la prelosa PPCC completada con la carpeta de hormigón que luego se vacía.



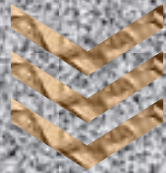
2.7 CONCLUSIONES PARCIALES DEL CAPÍTULO

La industrialización de la construcción es una necesidad que exige redoblar esfuerzos en el país para incrementar su utilización. En el Ecuador existen interesantes experiencias que demuestran la preparación de los técnicos nacionales para asumir este reto, pero resultaría saludable incrementar su incidencia en los programas de vivienda dentro de los cuales resta mucho por hacer. Ante la falta de una coordinación nacional que lo propicie y de la concertación de una política nacional que apunte a las inversiones en la adquisición de grandes Plantas para la prefabricación a gran escala, puede resultar conveniente que la provincia de Loja instrumente un programa de acción a partir de los principios de la prefabricación abierta en pequeñas Plantas, encaminada a producir en serie un amplio surtido de elementos que permitan avanzar en la construcción de viviendas destinadas a los sectores más necesitados del país. Una experiencia tan interesante como Ciudad Victoria puede multiplicar su alcance si se concibe bajo los principios de la industrialización y con el empleo de técnicas que mejoren la durabilidad de las obras construidas.

CAPÍTULO III



ESTUDIO DE LA PRELOSA PPCC. ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y TECNOLOGÍA DE PRODUCCIÓN.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA

ÁREA DE LA ENERGÍA, LAS INDUSTRIAS Y LOS RECURSOS
NATURALES NO RENOVABLES

3.1 INTRODUCCIÓN

En numerosos países industrializados la solución de entrepisos y cubiertas mediante el empleo de losas huecas pretesadas¹ continúa siendo, aun en la actualidad, una variante muy utilizada. Esta tecnología comenzó a implementarse a inicios mismos de la segunda mitad del siglo pasado a partir del desarrollo de la técnica del pretesado en grandes bancos. Ya para los años sesenta adquiere tanto auge que datos oficiales aseguraban una producción que superaba los 150 millones de metros cuadrados (m^2) anualmente². Sin embargo, más recientemente comienzan a darse soluciones estructurales que combinan las losas huecas pretesadas con un “topping” o carpeta de hormigón vaciado in situ, para definir una sección compuesta conformada por un **hormigón prefabricado** (constituido por la propia losa prefabricada, en este caso pretesada), y un segundo **hormigón colocado en obra**, asegurando mediante las tensiones rasantes que se desarrollan en la interfase entre uno y otro, un trabajo conjunto a pesar de poseer diferentes edades, tipo de refuerzo y probablemente resistencia.

Con esta solución semiprefabricada se garantizan las ventajas propias de las losas huecas pretesadas, a saber:

- alta productividad durante la ejecución de las losas.
- variabilidad en la longitud de los elementos (a solicitud del proyecto).
- buena calidad y uniformidad de fabricación con tolerancias mínimas en cuanto a las dimensiones de los elementos.
- buen aislamiento térmico y acústico.
- rapidez y facilidad durante la colocación de las instalaciones eléctricas y sanitarias.
- adaptabilidad a cortes y abertura de orificios.
- rapidez en el montaje.
- buena resistencia al fuego.
- buena resistencia a la corrosión, etc.

A las que habría que añadir, una vez que se complete la sección compuesta con el hormigón vaciado in situ, las siguientes:

- incremento general de la capacidad de carga en estructuras nuevas o existentes.
- mayor rigidez ante la acción de cargas verticales.
- mayor rigidez ante la acción de cargas horizontales del diafragma definido por la losa de sección compuesta que se ha formado.
- mejor redistribución de cargas no uniformes o concentradas, que perfecciona el trabajo conjunto del entrepiso o cubierta en que se emplee.
- permite solucionar voladizos laterales garantizando la continuidad.

¹ Las losas alveolares que siguen un proceso extrusado para su fabricación en grandes Plantas recurriendo al pretesado para mejorar su aptitud, como por ejemplo la que responde a la patente Spiroll descrita en el Capítulo II, son de las más empleadas.

² AIDEPLA, 2004 Proyecto y Ejecución de Elementos resistentes con AlveoPlaca. España. 2004

- losa superior que sirve para alojar en ella elementos de fijación en entrepisos tecnológicos, además para colocar los conductos de diferentes tipos de instalaciones.
- mayor impermeabilidad.
- mayor aislamiento acústico y térmico, etc.

Esta solución, sin embargo, exige de un elemento prefabricado que se produce industrialmente en Fábrica o Planta Fija cuya instalación puede demandar una fuerte inversión inicial; y a causa de sus dimensiones, resultan elementos que por su peso no pueden ser fácilmente manipulados si no es mediante el empleo de equipos de izaje, generalmente costosos. Además, resultan ser elementos con capacidades resistentes sobradas para las luces y cargas que se manejan habitualmente en las viviendas de interés social, precisamente las que se atienden en esta investigación. En fin, se trata de una solución que no parece ser apropiada para los programas alternativos de viviendas a pesar de sus reconocidas bondades.

¿Qué hacer para salvar estos inconvenientes sin dejar de aprovechar las ventajas de las secciones compuestas antes enunciadas, cuando se procura una solución estructural para la construcción de losas de entrepiso o cubierta para viviendas de interés social?

La **Figura 3.1** esquematiza la idea rectora que dio origen a la variante **PPCC**.

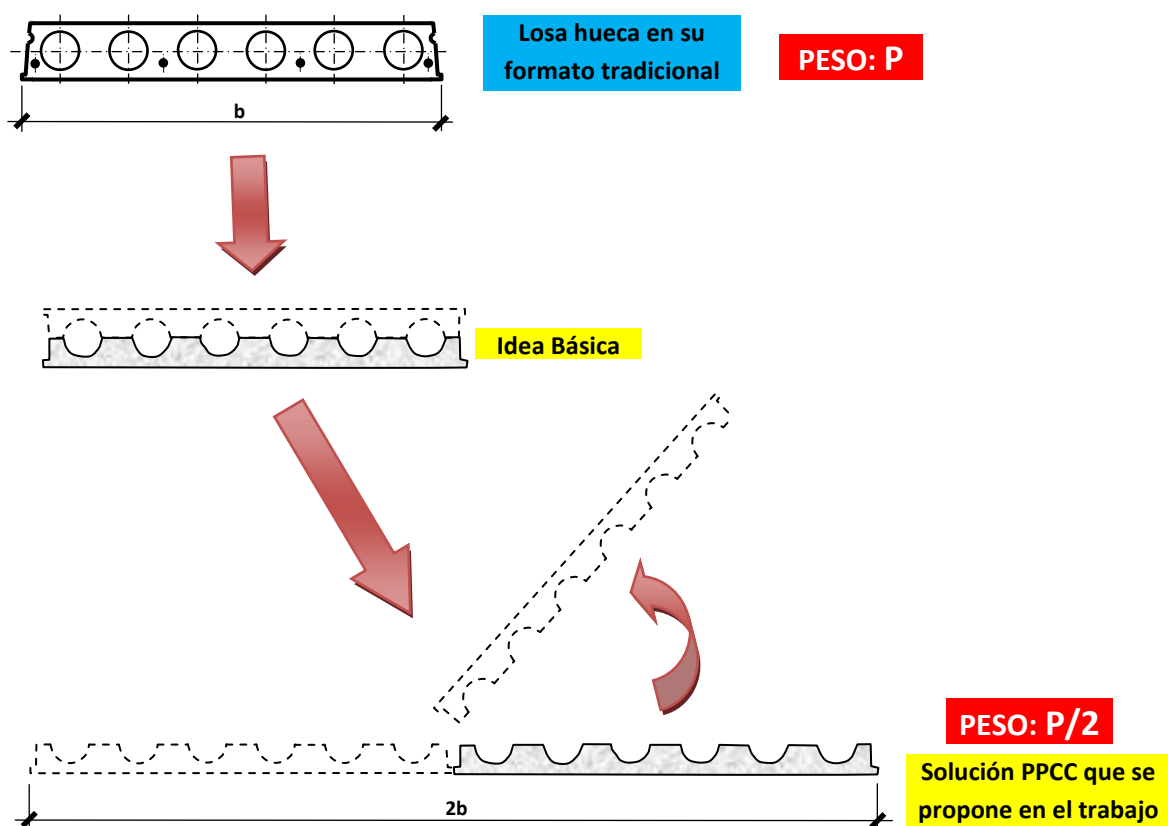


Fig. 3.1 Concepción primaria de la prelosa PPCC

Las placas (losas) resueltas a partir de losas huecas con sus espesores habituales (10cm, ..., 30cm, ...), aún sin la incorporación posterior de la carpeta o “topping”, resultan una solución estructuralmente sobrada para viviendas, caracterizadas por luces y cargas pequeñas; sin embargo, al dividir la losa prefabricada de la manera que se ha ilustrado en la **Figura 3.1**, no sólo se estaría duplicando la superficie de placa que puede alcanzarse con la misma cantidad de losas, sino que a la vez se estaría reduciendo sensiblemente el consumo de hormigón por unidad de superficie cubierta, lo mismo que su peso. No obstante, a pesar de haber reducido a la mitad el peso, todavía puede resultar alto como para garantizar su manipulación sin recurrir a equipos de izaje, a causa de la elevada densidad que posee el hormigón.

En efecto, si se analizara la losa alveolar Spiroll de **1.20m** de ancho y **15cm** de espesor, se comprueba que su peso llega a alcanzar los **300 kg/m**, lo que significa que en una longitud de sólo **4.00m** su peso es aproximadamente de **1 200kg**, difícil de manipular por 3 ó 4 operarios.

Sin embargo, para los programas emergentes de viviendas de interés social, en los que las luces se ubican frecuentemente entre **3.00m** y **4.50m**, y las cargas son moderadas, el espesor de la losa prefabricada puede reducirse aun más tan siquiera por exigencias estructurales, con lo cual se aseguraría un ahorro mayor de hormigón y a la vez un menor peso.

3.2 DESCRIPCIÓN DE LA PRELOSA PPCC



Fig. 3.2 Losa alivianada construida in situ de profuso empleo en el Ecuador

El hormigón continúa siendo el material más empleado dentro de los programas de viviendas para definir los sistemas estructurales horizontales para entresijos, y muy frecuentemente también en cubierta.

Las soluciones tradicionales basadas en el vaciado in situ de hormigón representan alternativas con probadas fortalezas estructurales, y en Ecuador continúa siendo muy frecuente utilizar la losa alivianada con nervaduras unidireccionales o bidireccionales de incuestionable aptitud estructural, pues los nervios reducen la luz de los paños de la placa de compresión (carpeta) que ellos definen, y en consecuencia la carpeta demandará cuantías de refuerzo relativamente bajas, aunque concentrando el refuerzo principalmente en los nervios. La **Figura 3.2** ilustra esta solución.

Con todo, estas soluciones exigen numerosas actividades a pie de obra que alargan los plazos de ejecución, a más de requerir de sistemas de moldes que llegan a encarecer significativamente sus costos.

Una respuesta a estas desventajas se puede dar mediante la introducción de elementos prefabricados que pueden ser colocados en obra en plazos muy breves y que además permitan eliminar prácticamente el empleo de encofrados; la variante **PPCC** sería una alternativa. La prelosa **PPCC** se fabricaría en Planta y en su diseño conceptual han primado los siguientes criterios:

- ☞ Responder a una tipología de sección aligerada cuya superficie inferior sea plana y la superior lo suficientemente irregular como para garantizar una mayor adherencia con un hormigón de diferente edad, dispuesto para completar la sección resistente de la losa a partir de un trabajo conjunto de ambos hormigones.
- ☞ Garantizar dimensiones, especialmente su ancho, que permita intercambiabilidad entre proyectos de diferentes diseños, siempre que respeten una modulación previamente definida en la región con el fin de introducir paulatinamente la normalización y tipificación en el sector de la construcción. Se propone que a futuro los proyectos de vivienda en la Ciudad de Loja se diseñen respetando un micromódulo de 500mm, para facilitar la incorporación paulatina de la prefabricación o la semiprefabricación.
- ☞ Asegurar que las dimensiones de la sección transversal del elemento garanticen un peso que permita su manipulación sin el concurso de equipos de izaje, al menos en las longitudes que se correspondan con las luces habituales en viviendas de interés social (**3.00m, 3.50m, 4.00m, 4.50m**).
- ☞ Recurrir al empleo del pretensado mediante la introducción de precompresiones que mejoren la aptitud de la losa dentro de los estados límites de servicio (menor deformación y fisuración), y sobre todo incrementar la capacidad resistente de la sección, aun con menores espesores de la losa compuesta y área de acero.
- ☞ Aprovechar las ventajas de la construcción evolutiva mediante la cual un elemento estructural pueda ir modificando su sección resistente en la medida en que se vaya introduciendo carga con el avance del proceso constructivo de la obra.
- ☞ Minimizar el empleo de encofrados (madera) en un elemento superficial que tradicionalmente tanto lo demanda: LA LOSA.

3.2.1 DIMENSIONAMIENTO Y PROPIEDADES GEOMÉTRICO - MECÁNICAS DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL DE LA PRELOSA

En la **Figura 3.3** se ilustra la sección tipo de la preloso con las variables principales que definen sus dimensiones, de las que se derivan sus propiedades geométrico – mecánicas fundamentales como *Área*, *Centroide*, *Inercia Centroidal*, *Módulos de Resistencia*, etc.

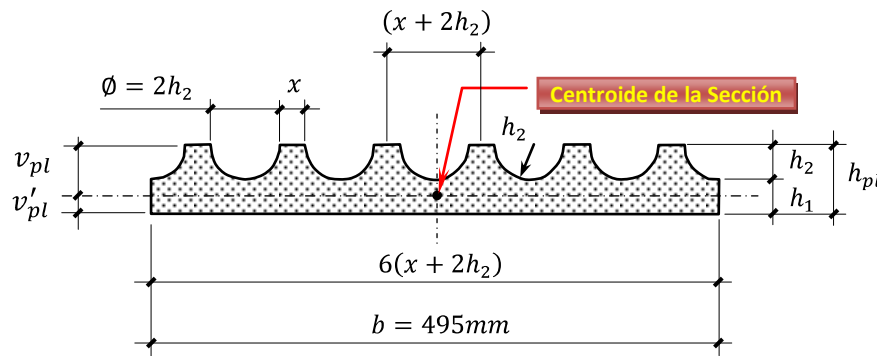


Fig. 3.3 Sección transversal de la preloso PPCC

El estudio parimétrico que se realizó permitió tomar las siguientes decisiones (Ver **ANEXO 1**):

- ☞ **Cantidad de semicírculos de aligeramiento (n_{sc})**
Se proponen cinco (5) semicírculos completos y dos (2) cuartos de círculo, uno a cada extremo de la sección, o sea, un valor de $n_{sc} = 6$.
- ☞ **Altura de la sección por debajo de los semicírculos de aligeramiento (h_1):**
Serán comprobadas estructuralmente las alturas de **30mm**, **35mm** y **40mm**, debido a que valores mayores incrementarían el peso propio del elemento y por tanto impedirían una adecuada manipulación.
- ☞ **Radio de los semicírculos de aligeramiento (h_2):**
Se fija para las deformaciones longitudinales circulares un diámetro constante, igual a $\varnothing = 60mm$, es decir, ($h_2 = 30mm$)
- ☞ **Altura total de la preloso ($h_{pl} = h_1 + h_2$):**
Serán comprobados estructuralmente los espesores totales que corresponden a los valores de h_1 considerados anteriormente:

$$h_{pl(1)} = 60mm, \quad h_{pl(2)} = 65mm \quad \text{y} \quad h_{pl(3)} = 70mm$$

- ☞ **Ancho de la preloso (b):**
En cuanto a esta dimensión, se decidió fijar un ancho nominal de 500mm, múltiplo del micromódulo que se propone para Ecuador, aunque su ancho real es

$b = 495\text{mm}$ procurando las tolerancias propias de la prefabricación. Este valor se adoptó, primero para limitar el peso de la prelosa, pero también para asegurar que puedan ser colocadas una cantidad entera de unidades en los espacios en que se emplee la prelosa, según la modulación propuesta.

La **Tabla 3.1** ilustra las principales propiedades geométricas y mecánicas de la sección transversal para los tres valores del espesor h_1 señalados anteriormente. Las expresiones utilizadas para la evaluación de cada una de ellas se discuten en el **ANEXO 2**.

Tabla 3.1 Características Geométricas de la prelosa **PPCC**

CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS PARA ($b = 495\text{mm}$) y ($r_c = h_2 = 30\text{mm}$)									
h_1 (mm)	h_{pl} (mm)	A_{pl} (mm ²)	\bar{h}_{pl} (mm)	v_{pl} (mm)	v'_{pl} (mm)	I_{pl} (mm ⁴)	W_{pl} (mm ³)	W'_{pl} (mm ³)	q_{pl} (kg/m)
30	60	21 218	42.9	37.0	23.0	4 333 521	117 261	-188 055	50.9
35	65	23 693	47.9	39.6	25.4	5 784 897	145 993	-227 971	56.9
40	70	26 168	52.9	42.3	27.7	7 531 343	178 210	-271 507	62.8

Por otro lado la **Tabla 3.2** expone el peso total expresado en kg de cada una de las variantes que concentra a atención de este Capítulo para evaluarla aptitud estructural de cada una. Nótese que con las dimensiones propuestas ($b = 495\text{mm}$, $h_2 = 30\text{mm}$, $h_1 = 30\text{mm}, 35\text{mm}$ ó 40mm) se asegura un peso, hasta luces de 4.50m, por debajo de los **300kg**, lo que puede garantizar su manipulación manual con ciertas precauciones a lo largo de todo el proceso, hasta su colocación final en obra.

Tabla 3.2 Peso Total de la prelosa para las luces más utilizadas en vivienda

PESO TOTAL (kg)					
h_1 (cm)	q_{pl} (kg/m)	Luz (m)			
		3.00	3.50	4.00	4.50
3.0	50.9	152.8	178.2	203.7	229.2
3.5	56.9	170.6	199.0	227.4	255.9
4.0	62.8	188.4	219.8	251.2	282.6

3.2.2 TIPOLOGÍA DE ARMADO³

La investigación propone el empleo de alambres de acero de alto límite elástico y de diámetros preferentemente pequeños como para poder asegurar su tesado con los equipos que concibe la tecnología que luego será descrita, y que además su ubicación en la sección satisfaga las exigencias de recubrimientos mínimos que establecen las Normas de Cálculo Estructural. En el **ANEXO 3** se expone todo lo referido al refuerzo pretensado y se definen las tipologías básicas de armado que serán analizadas. Se adoptarán alambres con la caracterización que expresa la **Tabla 3.3**, y combinados de manera que definan las ocho tipologías señaladas en la **Tabla A3.5** e

³ El término “tipología” define cantidad, diámetro y posición de los alambres que se emplean como refuerzo de la prelosa.

ilustradas en la **Figura A3.3**, estas dos últimas ubicadas en el propio **ANEXO 3**. Estas no representan propuestas de armado definitivas, el estudio de los estados límites de resistencia de la prelosa, tanto durante la etapa de vaciado de la carpeta como de explotación de las placas que se construyan con este elemento, permitirá decidir cuáles de ellas resultan aptas.

Tabla 3.3 Caracterización del alambre pretensado empleado en el diseño de la prelosa

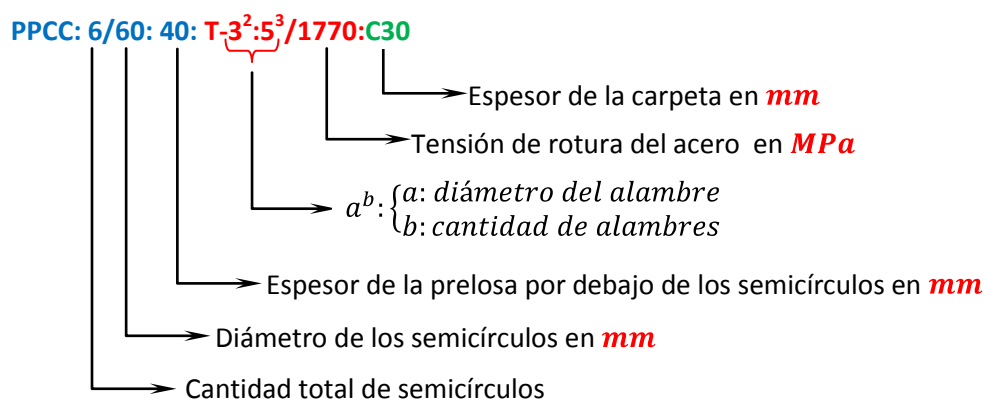
GEOMÉTRICA		MECÁNICA	
DIÁMETRO d_b (mm)	ÁREA a_p (mm ²)	TENSIÓN ÚLTIMA f_{pu} (MPa)	TENSIÓN DE FLUENCIA ⁴ f_{py} (MPa)
3mm	7.07	1860	1437
5mm	19.63	1770	1610

Tabla 3.4 Tipologías de refuerzo consideradas en el Trabajo.

GRUPO	TIPOLOGÍA DE ARMADO	CANTIDAD DE ALAMBRES	DESCRIPCIÓN	$d_{b(max)}$
1	T-3 ³	3	Tres alambres de 3mm de diámetro	3
	T-5 ³	3	Tres alambres de 5mm de diámetro	5
	T-3 ⁵	5	Cinco alambres de 3mm de diámetro	3
	T-5 ⁵	5	Cinco alambres de 5mm de diámetro	5
2	T-3 ² :5 ¹	3	Dos alambres de 3mm y uno de 5mm	5
	T-3 ¹ :5 ²	3	Un alambre de 3mm y dos de 5mm	5
	T-3 ³ :5 ²	5	Tres alambres de 3mm y dos de 5mm	5
	T-3 ² :5 ³	5	Dos alambres de 3mm y tres de 5mm	5

En cuanto a la denominación de la prelosa para su codificación, con el empleo de la carpeta o “topping” de hormigón vaciado in situ, el **descriptor de la tipología de la sección compuesta** se completa, añadiendo a la información ya definida en el propio **ANEXO 3**, el espesor de la carpeta.

Por ejemplo, si se fija una tipología cualquiera de sección compuesta que responda al código **PPCC: 6/60: 40: T-3²:5³/1770:C30**, se está significando que se ha empleado en ella una prelosa de 6 semicírculos de 60mm de diámetro cada uno, con un espesor de 40mm por debajo de dichos semicírculos, reforzada con 2 alambres de 3mm de diámetro y otros 3 de 5mm, que poseen una tensión de rotura de 1770MPa, a la que finalmente se le incorpora una carpeta vaciada in situ de 30mm de espesor, definiendo un peralte estructural total de la losa compuesta de 10cm ($h_1 + h_2 + e_{carpeta} = 4cm + 3cm + 3cm = 10cm$).



⁴ Para aceros que satisfagan la condición $f_{py}/f_{pu} = 0.85$

3.3 PÉRDIDAS DE Tensión EN EL ACERO PRETENSADO

El pretensado se caracteriza, entre otras cosas, por las pérdidas progresivas que experimenta la tensión (también la fuerza) en el acero previamente estirado, las que tienen lugar desde el propio instante en que se están tesando los alambres y hasta transcurrido un período prolongado de tiempo. Se trata entonces de caídas de tensión que pueden quedar divididas en dos etapas ampliamente reconocidas:

- a) Una primera etapa que transcurre desde que se inicia el proceso de tesado y hasta que se transfiere la fuerza de pretensado al hormigón, etapa en la que se desarrollan las llamadas **PÉRDIDAS INICIALES**, reconocidas aquí como $\Delta f_{inicial}$.
- b) Una segunda etapa que se inicia prácticamente a partir de la anterior y se desarrolla con el tiempo, de manera más intensa en los primeros meses, de ahí su carácter cronodependiente. En esta etapa se desarrollan las llamadas **PÉRDIDAS DIFERIDAS**, que serán denotadas por $\Delta f_{diferida}$.

La identificación de los factores que intervienen tanto en las pérdidas iniciales como en las diferidas, depende en lo fundamental del tipo de pretensado que se está analizando (pretesado o postesado), y su evaluación está llena de incertidumbres por la cantidad de variables que intervienen en ellas, a saber: del equipamiento que se emplee para realizar el tesado, de la eficacia del sistema de anclaje que se utilice para sostener la tensión inicial introducida al acero, del tipo de acero que se estira y especialmente de su grado de relajación, de fenómenos cronodependientes y diferidos como la retracción y fluencia del hormigón sobre el que se transfiere el pretensado, etc.

Se pueden estimar valores de pérdidas que pueden ser razonablemente precisos a partir de consideraciones sobre el nivel inicial de esfuerzo ($f_{pi} \geq 0.70 f_{pu}$), del tipo de acero que se emplee (liberado de esfuerzo, o de bajo relajamiento; si se trata de alambre, tendón o barra), de las condiciones de exposición del elemento, especialmente de la humedad del ambiente que rodee a la pieza durante su explotación, de la técnica que se siga (pretesado, postesado con o sin adherencia), etc. Sin duda, esta estimación mucho depende de la experiencia de quien la realice; no obstante, los Reglamentos y documentos técnicos referidos al tema ofrecen modelos analíticos más o menos precisos, que permiten mejorar la eficacia de tal estimación.

Para el tipo de elemento que se analiza no existen antecedentes que permitan fijar un estimador certero para cuantificar las pérdidas de tensión que tienen lugar, razón que justifica el profuso estudio que se incluye en este Capítulo. En la preloza el acero es estirado y anclado antes del vaciado del hormigón (pretesado), en consecuencia no tienen lugar las pérdidas iniciales **por fricción** ❶ ($\Delta f_{FR} = 0$), como tampoco la pérdida por **asentamiento, penetración o deslizamiento de las cuñas en los anclajes durante la transferencia** ❷ ($\Delta f_{PA} = 0$), aunque al cortar los cables se registra un **acortamiento instantáneo** del hormigón de carácter elástico que origina la pérdida inicial llamada **acortamiento elástico** ($\Delta f_{ES} \neq 0$) ❸.

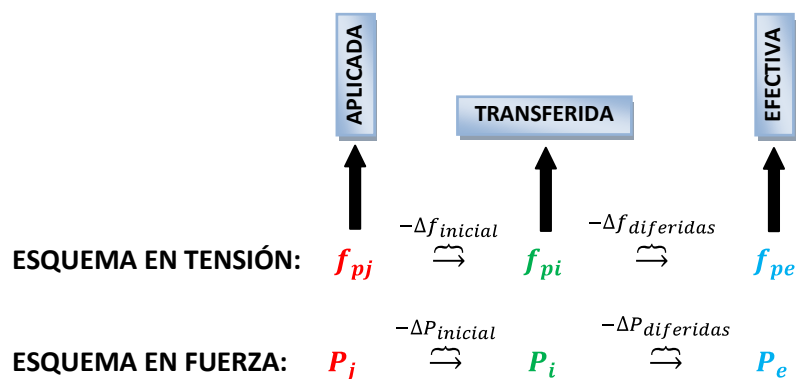
Mientras tanto, las pérdidas diferidas se deben en lo fundamental a la **relajación del acero** ($\Delta f_{RE} \neq 0$)^④ (depende de su grado de relajación), y también a la **retracción** ($\Delta f_{SH} \neq 0$)^⑤ y **fluencia** ($\Delta f_{CR} \neq 0$)^⑥ del hormigón.

De esta manera, para el caso de la prelosa, se deben cuantificar las siguientes caídas de tensión⁵:

$$\Delta f_{inicial} = \Delta f_{FR} + \Delta f_{PA} + \Delta f_{ES} = \Delta f_{ES}$$

$$\Delta f_{diferida} = \Delta f_{CR} + \Delta f_{SH} + \Delta f_{RE}$$

Si se denota como f_{pj} a la tensión a que se estira inicialmente el acero (a ella corresponde la fuerza P_j), al originarse las pérdidas iniciales asociadas al proceso de tesado, anclaje y transferencia, dicha tensión cae al valor f_{pi} (asociándose a ella la fuerza P_i), hasta que finalmente se estabiliza la tensión cuando tienen lugar las pérdidas diferidas que dependen del tiempo, en un valor efectivo reconocido por f_{pe} (a la que corresponde la fuerza P_e). El siguiente esquema ilustra esta idea:



Para evaluar las pérdidas de tensión en el acero se adoptará en el Trabajo el modelo analítico sugerido por el PCI⁶ en la Segunda Edición del Manual para el Diseño de Losas de Núcleo Hueco⁷

La evaluación exige definir los siguientes elementos:

- Características geométricas de la sección transversal sobre la que se transfiere el pretensado (a partir de sus dimensiones).

⁵ Los subíndices que se emplean para identificar cada una de las pérdidas que serán evaluadas significan:

ES: Elastic Shorting (acortamiento elástico)

CR: Creep (concrete creep; “arrastre” o fluencia del hormigón)

SH: Shrinkage (shrinkage concrete; “encogimiento”, entumecimiento o retracción del hormigón)

RE: Relaxation (steel relaxation; relajación del acero)

⁶ Precast/Prestressed Concrete Institute

⁷ PCI_ Manual for the Design of Hollow Core Slabs. Second Edition. 1998. ISBN 0-937040-57-6

- b) Secciones en las que ha de verificarse el cumplimiento de las tensiones.
- c) Expresiones analíticas para cuantificar cada pérdida

3.3.1 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL

Salvo que se decida considerar una sección transversal para la prelosa diferente a las que fueron definidas en el epígrafe **§3.2.1**, las características geométricas para las tres dimensiones básicas de dicha sección se conocen ya, y se resumen en la **Tabla 3.1**.

Para cualquier otra sección que se desee considerar (cantidad de deformaciones longitudinales diferente a 6, diámetro de dichas deformaciones distinto de 60mm y de espesores por debajo de ellas diferentes a 30mm, 35mm ó 40mm), deben ser evaluadas estas características siguiendo el procedimiento que se explica en el epígrafe **§A2.3** del **ANEXO 2**.

3.3.2 SECCIONES A VERIFICAR

Cuando se trata de un pretensado centrado ($e_o = 0$), al transferirse a la sección de hormigón la fuerza de pretensado, la pieza sólo experimenta un acortamiento que impide que la carga concomitante, en este caso el peso propio, genere flexión alguna. Sin embargo, en el caso del pretensado excéntrico ($e_o \neq 0$), ya la pieza puede adoptar una deflexión positiva o negativa (concavidad o convexidad), que origina uno o dos puntos de apoyo del elemento sobre el lecho de vaciado. Cuando esto suceda comienza a concomitar con el pretensado transferido la carga de peso propio, generando en la pieza una flexión que origina también tensiones normales a la sección transversal que deben adicionarse a aquellas otras provocadas por el pretensado transferido.

La **Figura A3.4** del **ANEXO 3** ilustra cómo en las prelosas que responden a las tipologías **PPCC: 6/60:35** y **PPCC: 6/60:40** se logra un pretensado centrado en el instante del destense ($e_o = 0$), y en consecuencia la carga concomitante no origina flexión alguna, debiéndose las tensiones normales que aparecerán en la sección de hormigón, exclusivamente al pretensado. Esta situación quedó ilustrada como Caso (a) de la **Figura A3.2** incluida en el propio **ANEXO**.

Mientras tanto, en la tipología **PPCC: 6/60:30** los alambres se descentran por encima del centroide de la sección de hormigón ($e_o = -2mm$), provocando que la prelosa adopte una elástica como la que se ilustra en la **Figura A3.3** del mismo **ANEXO 3**. Ya en este caso el peso propio origina flexión negativa en todas las secciones ubicadas en la longitud $l/4$, a ambos lados de la pieza.

La comprobación de las tensiones normales que tienen lugar sobre el hormigón de la prelosa se realiza básicamente en la sección más esforzada por la carga concomitante, en este caso la situada a la distancia $l/4$ medida desde el apoyo. Sin embargo, esta comprobación **durante el destense**, es decir, en el instante en que se transfiere la fuerza inicial de pretensado, se debe realizar, además, en la sección extrema de la zona de transferencia. Ambas secciones se ilustran en la **Figura 3.4**.

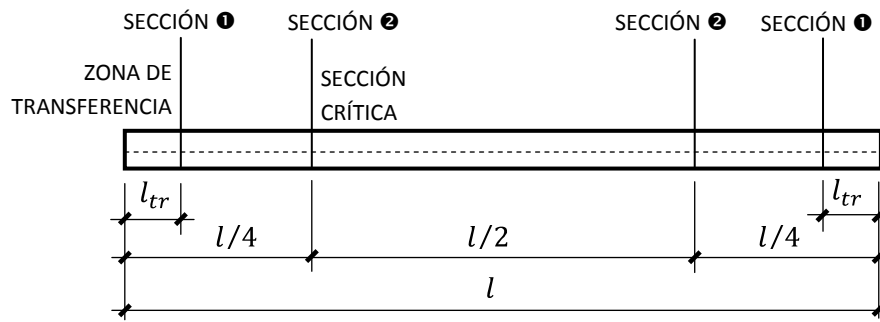


Fig. 3.4 Secciones de comprobación durante el destense

A la zona de transferencia corresponde la longitud (l_{tr}) y se define como la *longitud mínima que requiere un tendón adherido para transmitir la fuerza de pretensado a la sección de hormigón*. Más allá de esta longitud, la fuerza de pretensado a lo largo del tendón se puede considerar constante para cada tiempo t en que se desee evaluar, y hasta la zona de transmisión del extremo opuesto del tendón, ya que hacia ese otro extremo el fenómeno se produce en sentido inverso.

Se conocen diferentes modelos para evaluar la longitud de transferencia l_{tr} y en este Trabajo se adoptó el sugerido por el MODEL CODE CEB-FIP, que la define de la manera siguiente:

$$l_{tr} = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \frac{f_{pj}}{f_{pu}} (l_{pd})$$

Siendo:

- $\alpha_1: \begin{cases} 1.0 & \text{para transferencia lenta} \\ 1.25 & \text{para transferencia brusca (corte de la armadura)} \end{cases}$
- $\alpha_2: \begin{cases} 1.0 & \text{para el cálculo a esfuerzo cortante} \\ 0.5 & \text{para el cálculo de la armadura transversal en la zona de anclaje} \end{cases}$
- $\alpha_3: \begin{cases} 0.7 & \text{para alambres} \\ 0.5 & \text{para torones} \end{cases}$
- $f_{pj} = \lambda_t f_{pu}$
- $\lambda_t: \begin{cases} 0.80 & \text{Para alambres de baja relajación con } \xi = 0.90 \\ 0.80 & \text{Para alambres aliviados de tensiones con } \xi = 0.85 \\ 0.75 & \text{Para barras conformadas con } \xi = 0.80 \end{cases}$

$$\xi = f_{py}/f_{pu}^8$$

Como en el refuerzo de la prelosa se emplean alambres, y aceptando que se trata de un acero en el que $\xi = 0.85$ (de los más frecuentes en el mercado), se adoptará el valor de $\lambda_t = 0.80$

$$l_{pd} = \frac{a_p}{p} \left(\frac{1.5}{\eta_1 \eta_2} \right) \frac{f_{py}}{f'_{cj}}$$

l_{pd} : Longitud básica de anclaje del alambre

a_p : Área del alambre de mayor diámetro que se emplee en una misma prelosa

p : Perímetro adherente del alambre de mayor diámetro que se emplee en una misma prelosa

$$\eta_1: \begin{cases} 1.4 & \text{para alambres} \\ 1.2 & \text{para torones} \end{cases}$$

$$\eta_2: \begin{cases} 1.0 & \text{para alambres situados a menos de 250mm del fondo de la pieza,} \\ & \text{o a más de 300mm por debajo de la cara superior de hormigonado} \\ 0.7 & \text{para las demás posiciones} \end{cases}$$

3.3.2.1 Determinación de la longitud de transferencia en la prelosa

A manera de ejemplo se evalúa a continuación la longitud de transferencia para las siguientes condiciones:

HORMIGÓN:

- Resistencia característica a los 28 días $f'_c = 25 \text{ Mpa}$
- Destense a los tres días de vaciado el hormigón: $j = 3$

ACERO:

- Resistencia última: $f_{pu} = 1770 \text{ MPa}$
- Diámetro: 3 mm
- $\xi = f_{py}/f_{pu} = 0.85 \Rightarrow \lambda_t = 0.80$

⁸ Es frecuente que este valor sea especificado por el fabricante que produce el acero

SOLUCIÓN

- 1) Fijar los valores de los coeficientes que intervienen en el modelo

$$\alpha_1 = 1.25 \text{ (Transferencia brusca del pretensado por el tipo de corte que se practica)}$$

$$\alpha_2 = 1.00 \text{ (No se empleará refuerzo transversal alguno en la prelosa)}$$

$$\alpha_3 = 0.70 \text{ (Se trata de alambres y no torones)}$$

$$\eta_1 = 1.4 \text{ (Se trata de alambres y no torones)}$$

$$\eta_2 = 1.0 \text{ (El espesor total de la prelosa para cualquiera de las tipologías que se han fijado, es tan reducido, que en todos los casos el acero se ubica a una distancia muy inferior a los 25cm del fondo de la losa)}$$

- 2) Definición de la tensión del acero en el instante de la transferencia (f_{pj})

Para alambre con $\xi = 0.85$ se tiene:

$$f_{pj} = \lambda_t f_{pu} = 0.80 f_{pu} = (0.80)(1770 \text{ MPa}) = 1416 \text{ MPa}$$

- 3) Definición de la longitud básica de anclaje del alambre (l_{pd})

La resistencia del hormigón en el instante del destense f'_{cj} viene dado por:⁹

$$f'_{cj} = \beta_j f'_c = 0.60(25 \text{ MPa}) = 0.60(25 \text{ MPa}) = 15 \text{ MPa}$$

$$a_p = \pi d_b^2 / 4 = \frac{\pi(3)^2}{4} = 7.07 \text{ mm}^2$$

$$p = \pi d_b = \pi(3) = 18.8 \text{ mm}$$

⁹ Para una humedad relativa $HR \geq 90\%$ y una temperatura $T \approx 20^\circ \text{C}$, el coeficiente $\beta_{(j)}$ viene dado por:

$$\beta_{(j)} = e^{s[1-\sqrt{28/j}]}$$

j : Tiempo transcurrido desde el vaciado del hormigón (en días)

$$s: \begin{cases} 0.20 & \text{para cementos de alta resistencia y endurecimiento rápido} \\ 0.25 & \text{para cementos de endurecimiento normal} \\ 0.38 & \text{para cementos de endurecimiento lento} \end{cases}$$

En esta investigación se adoptan las siguientes consideraciones de carácter práctico, que cubren las situaciones más generales y frecuentes: el cemento empleado para elaborar la prelosa es de endurecimiento normal, y el acero se cortará en la Planta de fabricación a los 3 días. De esta manera se obtiene $\beta_{(j)} \approx 0.60$.

$$f_{py} = \xi \cdot f_{pu} = 0.85(1\,770\text{MPa}) = 1\,504\text{MPa}$$

$$\therefore l_{pd} = \frac{7.07\text{mm}^2}{18.8\text{mm}} \left[\frac{1.5}{(1.4)(1.0)} \right] \frac{1\,504\text{MPa}}{15\text{MPa}} = 40\text{mm}$$

4) Definición de la longitud de transferencia (l_{tr})

$$l_{tr} = (1.25)(1.0)(0.70) \frac{1\,416\text{MPa}}{1\,770\text{MPa}} (40\text{mm}) = 28\text{mm}$$

Es decir, en el caso que se ha considerado a escasos 3cm aproximadamente desde ambos extremos de la prelosa, la fuerza de pretensado puede considerarse constante.

Si este mismo procedimiento se aplicara a las restantes tipologías de refuerzo que ya fueron definidas (diámetro y resistencia del acero), se obtienen los resultados que aparecen en la **Tabla 3.5**.

Tabla 3.5 Longitud de transferencia de los alambres de 3 y 5mm

f_{pu} (MPa)	$d_{b(max)}$ (mm)	l_{tr} (mm)
1 770	3	28
	5	47
1 860	3	30
	5	50

3.3.2.2 Evaluación del momento flector originado por la carga concomitante en las secciones a verificar

Se trata ahora de determinar las expresiones del momento flector M_g ocasionado por la carga concomitante g en las secciones de interés cuando el pretensado es excéntrico, a saber: la extrema de la zona de transferencia y la crítica situada a la distancia $l/4$ del extremo de la pieza.

La **Figura 3.5** muestra el esquema de análisis para este caso, propio de la tipología **PPCC:6/60:30**.

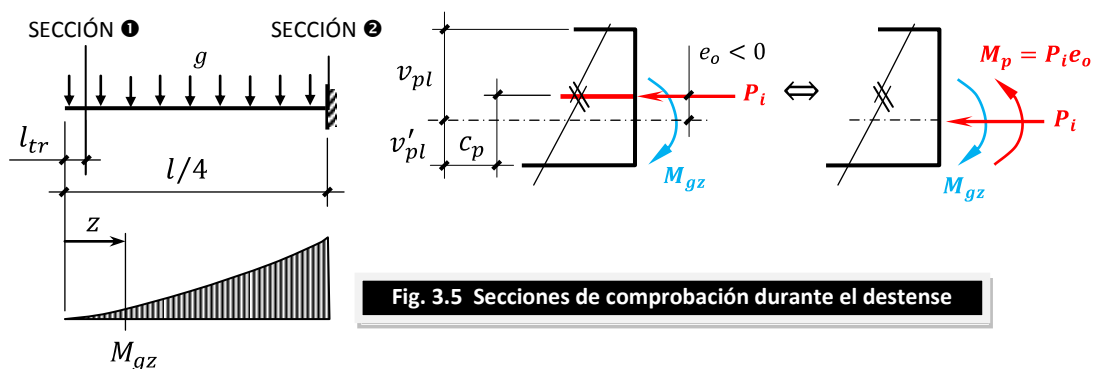


Fig. 3.5 Secciones de comprobación durante el destense

Se comprueba que:

$$M_{gz} = \frac{1}{2}gz^2 \Rightarrow \begin{cases} \text{Para } z = l_{tr} \rightarrow M_{gz} = 0.5gl_{tr}^2 \\ \text{Para } z = l/4 \rightarrow M_{gz} = 0.03125gl^2 \end{cases}$$

O también:

$$M_{gz} = \psi(gl^2) \Rightarrow \begin{cases} z = l_{tr} \rightarrow \psi = 0.5(l_{tr}/l)^2 \\ z = l/2 \rightarrow \psi \approx 0.03 \end{cases}$$

3.3.3 EVALUACIÓN DE LA PÉRDIDA INSTANTÁNEA DEBIDA AL ACORTAMIENTO ELÁSTICO DEL HORMIGÓN

El modelo que se adoptó para evaluar las pérdidas en esta investigación propone para esta pérdida una formulación del tipo:

$$\Delta f_{ES} = K_{es} \frac{E_p}{E_{ci}} f_{cir}$$

Siendo:

$K_{es} = 1.00$ Para elementos pretesados como el que se analiza

$E_p = 2 \cdot 10^5 MPa$ En realidad el Módulo de Deformación de los aceros de alto límite elástico es algo menor, y su valor es suministrado por el fabricante, aunque en la práctica se adopta este valor como representativo dentro de su diversidad

$E_{ci} = 4700 \sqrt{f'_{cj}} = 4700 \sqrt{\beta_j f'_c} = 3640 \sqrt{f'_c}$ Módulo de Deformación del hormigón en el instante de la transferencia, que considera un coeficiente $\beta_j = 0.60$ correspondiente a una transferencia que tiene lugar a los 3 días de vaciado el hormigón de la prelosa ($j = 3$)

f_{cir} : Tensión normal a la sección debida a la acción simultánea de la fuerza de pretensado transferida P_i y la carga concomitante, evaluada para la sección bruta de hormigón y a nivel del centroide de la armadura pretensada (MPa). (Ver **Figura 3.6**)

$$f_{cir} = 0.9f_{cpi} + f_{gz} = 0.9 \left[\frac{P_i}{A_{pl}} + \frac{P_i}{I_{pl}} (e_o)^2 \right] + \frac{M_{gz}}{I_{pl}} e_o$$

f_{cpi} : Tensión normal a la sección debida sólo a la acción de la fuerza de pretensado transferida P_i , evaluada también para la sección bruta de hormigón y a nivel del centroide de la armadura pretensada (MPa).

f_{gz} : Tensión en el hormigón a nivel del baricentro del acero pretensado en tracción, debido a la carga concomitante (g) en el momento en que se transfiere el pretensado, en este caso sólo el peso propio de la prelosa (MPa).

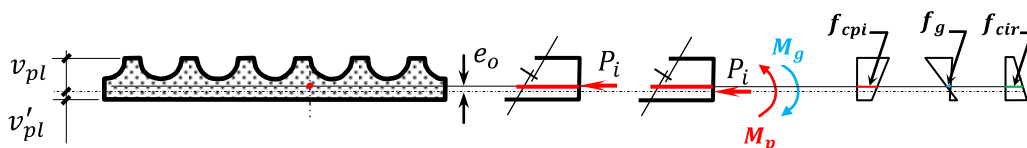


Fig. 3.6 Tensiones normales a la sección de hormigón en el instante del destense

En la expresión de f_{cir} los valores de M_{gz} y de e_o se sustituyen con su signo, considerando como convenio que M_{gz} es positivo si tracciona las fibras inferiores, mientras que e_o lo es si los alambres se ubican por debajo del centroide de la sección de hormigón. En el caso de la tipología **PPCC: 6/60:30**, la única en que la carga concomitante origina tensiones durante el destense, ambas magnitudes son negativas en dicho instante. La **Figura 3.7** ilustra el procedimiento general para cuantificar la pérdida por acortamiento elástico del hormigón, mientras que la **Tabla 3.6** incluye los resultados de haber evaluado esta pérdida para las siguientes consideraciones:

- Resistencia característica del hormigón de la prelosa a los 28 días $f'_c = 25MPa$
- Destense a los tres días de vaciado ($j = 3$)
- Se emplea un cemento de endurecimiento normal para elaborar el hormigón de la prelosa ($s = 0.25$)
- Evaluada la pérdida en la sección central de la prelosa ($\psi = 0.03$)
- Longitud de la prelosa: $l = 3.0m$
- Relación entre las tensiones de fluencia y rotura: $\xi = f_{py}/f_{pu} = 0.85$

Repárese en las observaciones siguientes, las que resultaban evidentemente previsibles:

- 1) La mayor pérdida por acortamiento elástico del hormigón al transferirse el pretensado tiene lugar en la prelosa de menor sección transversal (**PPCC: 6/60:30**), reforzada con la mayor área de acero pretensado, es decir, la mayor fuerza transferida ($A_p = 98.15mm^2$), lo mismo en la sección de transferencia que en la sección crítica ($\Delta f_{ES} = 69.4MPa$ y $70.1MPa$).
- 2) En todos los casos, la pérdida es relativamente pequeña respecto de la tensión del acero pretensado en el instante de la transferencia. Por ejemplo, si se toman en consideración las que tienen lugar en la sección crítica, se tiene:

$$\text{Para el acero 1770: } \frac{\Delta f_{ES}}{f_{pu}} \cdot 100 = \frac{66.8MPa}{1770MPa} \cdot 100 \approx 3.8\%$$

$$\text{Para el acero 1860: } \frac{\Delta f_{ES}}{f_{pu}} \cdot 100 = \frac{70.1MPa}{1860MPa} \cdot 100 \approx 3.8\%$$

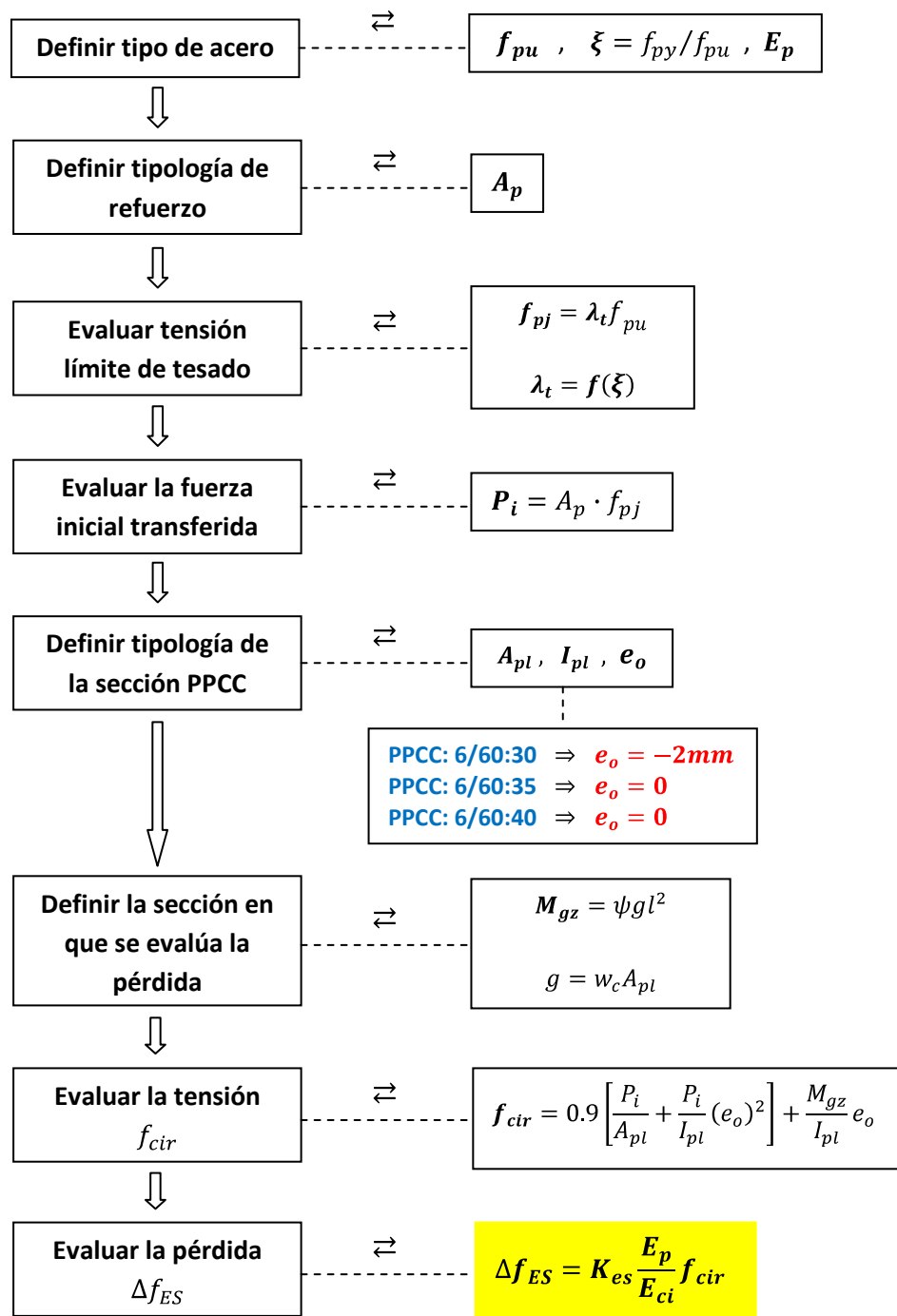


Fig. 3.7 Esquema de evaluación de la pérdida por acortamiento instantáneo del hormigón

Tabla 3.6 Pérdida inicial debida al **acortamiento elástico** en las 48 variantes de prelosa en estudio, para una longitud de 3.00m.

SECCIÓN	REFUERZO	A_p (mm ²)	e_o (mm)	Δf_{ES} (MPa)			
				$f_{pu} = 1\,770\text{MPa}$ $f_{pj} = 1\,416\text{MPa}$		$f_{pu} = 1\,860\text{MPa}$ $f_{pj} = 1\,488\text{MPa}$	
				S. TRANSF.	S. CRÍTICA	S. TRANSF.	S. CRÍTICA
PPCC: 6/60: 30	T-3 ³	21.21	-2	14,3	15,0	15,0	15,7
	T-5 ³	58.89		39,6	40,4	41,7	42,4
	T-3 ⁵	35.35		23,8	24,5	25,0	25,7
	T-5 ⁵	98.15		66,1	66,8	69,4	70,1
	T-3 ² :5 ¹	33.77		22,7	23,5	23,9	24,6
	T-3 ¹ :5 ²	46.33		31,2	31,9	32,8	33,5
	T-3 ³ :5 ²	60.47		40,7	41,4	42,8	43,5
	T-3 ² :5 ³	73.03		49,2	49,9	51,7	52,4
PPCC: 6/60: 35	T-3 ³	21.21	0	12,5	12,5	13,2	13,2
	T-5 ³	58.89		34,8	34,8	36,6	36,6
	T-3 ⁵	35.35		20,9	20,9	22,0	22,0
	T-5 ⁵	98.15		58,0	58,0	61,0	61,0
	T-3 ² :5 ¹	33.77		20,0	20,0	21,0	21,0
	T-3 ¹ :5 ²	46.33		27,4	27,4	28,8	28,8
	T-3 ³ :5 ²	60.47		35,7	35,7	37,6	37,6
	T-3 ² :5 ³	73.03		43,2	43,2	45,4	45,4
PPCC: 6/60: 40	T-3 ³	21.21	0	11,4	11,4	11,9	11,9
	T-5 ³	58.89		31,5	31,5	33,1	33,1
	T-3 ⁵	35.35		18,9	18,9	19,9	19,9
	T-5 ⁵	98.15		52,5	52,5	55,2	55,2
	T-3 ² :5 ¹	33.77		18,1	18,1	19,0	19,0
	T-3 ¹ :5 ²	46.33		24,8	24,8	26,1	26,1
	T-3 ³ :5 ²	60.47		32,4	32,4	34,0	34,0
	T-3 ² :5 ³	73.03		39,1	39,1	41,1	41,1

Para analizar cómo influyen en la magnitud de esta pérdida factores tales como la longitud de la prelosa, el tiempo transcurrido entre el vaciado del hormigón y el destense y la sección en que se evalúa, se exponen las siguientes consideraciones a partir de los resultados que se alcanzaron mediante los cálculos recogidos en el **ANEXO 4**.

Por ejemplo, tomando como base de comparación la prelosa **PPCC: 6/60:30** y acero **$f_{pu} = 1\,770\text{MPa}$** con la tipología de refuerzo **T-5⁵**, para la que se obtuvo en la sección crítica una pérdida de **66.8MPa**:

- ☞ Si se modifica la longitud de la prelosa de $l = 3.00\text{m}$ a 4.50m , manteniendo constante las restantes consideraciones (Ver **Tabla A4.5** del **ANEXO 4**), se confirma que la pérdida por acortamiento elástico que tiene lugar en la misma sección crítica es: $\Delta f_{ES} = 67.7\text{MPa}$:

$$\therefore \begin{cases} \Delta f_{ES(base)} = 66.8 MPa \\ \Delta f_{ES(l=4.5m)} = 67.7 MPa \end{cases} \Rightarrow \frac{\Delta f_{ES(l=4.5m)} - \Delta f_{ES(base)}}{\Delta f_{ES(l=4.5m)}} \cdot 100 \approx 1.3\%$$

Es decir, modificando la longitud de la prelosa en un 33% (correspondiente a las longitudes extremas máxima y mínima de la prelosa), la pérdida por acortamiento elástico varía sólo un 1.3%.

☞ Si se destensa a los 20 días en lugar de al tercero, y se mantienen constante las restantes consideraciones:

$$\begin{cases} j = 3 \Rightarrow \beta_j = 0.60 \Rightarrow E_{ci} = 3640\sqrt{f'_c} \\ j = 20 \Rightarrow \beta_j = 0.96 \Rightarrow E_{ci} = 4594\sqrt{f'_c} \end{cases}$$

$$\therefore \begin{cases} \Delta f_{ES(base)} = 66.8 MPa \\ \Delta f_{ES(j=20)} = 52.8 MPa \end{cases} \Rightarrow \frac{\Delta f_{ES(base)} - \Delta f_{ES(j=20)}}{\Delta f_{ES(base)}} \cdot 100 \approx 21\%$$

Como era de esperar, al atrasar la fecha de destense la pérdida por acortamiento elástico disminuye significativamente al transferirse la fuerza de pretensado sobre un hormigón más resistente¹⁰.

☞ Si para las mismas consideraciones, la pérdida se evalúa en la sección extrema de la zona de transferencia, en lugar de la central, entonces $\psi = 0.5(l_{tr}/l)^2$ en lugar de $\psi = 0.03$:

$$\langle \text{PPCC: 6/60: 30} \mid \text{T} - 5^5 \mid f_{pu} = 1\,770 MPa \rangle \Rightarrow l_{tr} = 50mm \Rightarrow \Delta f_{ES} = 66.1 MPa$$

$$\begin{cases} \Delta f_{ES(base)} = 66.8 MPa \\ \Delta f_{ES(st)} = 66.1 MPa \end{cases} \Rightarrow \frac{\Delta f_{ES(base)} - \Delta f_{ES(st)}}{\Delta f_{ES(base)}} \cdot 100 \approx 1.0\%$$

Es decir, la pérdida por acortamiento elástico que tiene lugar en la sección de transferencia y en la crítica, prácticamente coinciden, lo que confirma el escaso peso del término M_{gz} en su evaluación.

En el **ANEXO 4** aparecen Tablas que incluyen la magnitud de esta pérdida, tanto en la sección extrema de la zona de transferencia, como en la central, para las 48 variantes de diseños que propone esta investigación.

¹⁰ En la práctica, la tecnología de producción de la prelosa impide prácticamente que se destense antes de 3 días, y postergar esta fecha atenta contra el rendimiento de producción, por lo cual la pérdida calculada a los tres días es representativa de lo que se espera.

3.3.4 EVALUACIÓN DE LA PÉRDIDA DIFERIDA DEBIDA A LA FLUENCIA DEL HORMIGÓN

La pérdida por flujo plástico del hormigón de la prelosa sólo se evalúa en la sección crítica de la pieza y tiene una significación importante en el comportamiento a lo largo de su vida útil. Guarda estrecha y compleja relación con la pérdida por retracción que se estudia luego.

Esta pérdida, de carácter diferido, se evalúa mediante la siguiente expresión para hormigones de peso normal:

$$\Delta f_{CR} = \frac{2E_p}{E_c} \left(f_{cir} - \frac{M_{ds}}{I_{pl}} e_o \right)$$

Siendo:

M_{ds} : Momento de servicio debido a la sobrecarga muerta o permanente que actúa sobre la prelosa, sin incluir su peso propio, pero sí el de la carpeta

$E_c = 4700\sqrt{f'_c}$ Módulo de deformación diferido del hormigón

El valor de la tensión f_{cir} que interesa es el que corresponde a la sección crítica durante el destense, que se estima ubicada a la distancia $l/4$ medida desde el extremo del elemento. Su magnitud ya se evaluó, sin embargo, la determinación del momento flector M_{ds} **en la propia sección** es imprecisa debido a la incuestionable variabilidad de la carga muerta superpuesta total (q_{ds}) que puede estar actuando durante la explotación de la edificación. Esta carga incluye el peso de la carpeta (q_c), y la carga muerta superpuesta (q_s), esta última dependiendo del rol de la losa en los que se emplee esta solución (entrepiso o cubierta).

Aunque se argumentará más adelante, la investigación propone analizar tres espesores diferentes para la carpeta que luego se vacía in situ, a saber: ($h_c = 20mm, 30mm$ ó $40mm$), cuyo peso provocaría la carga muerta (q_c) indicada en la Tabla que aparece en la **Figura 3.8**.

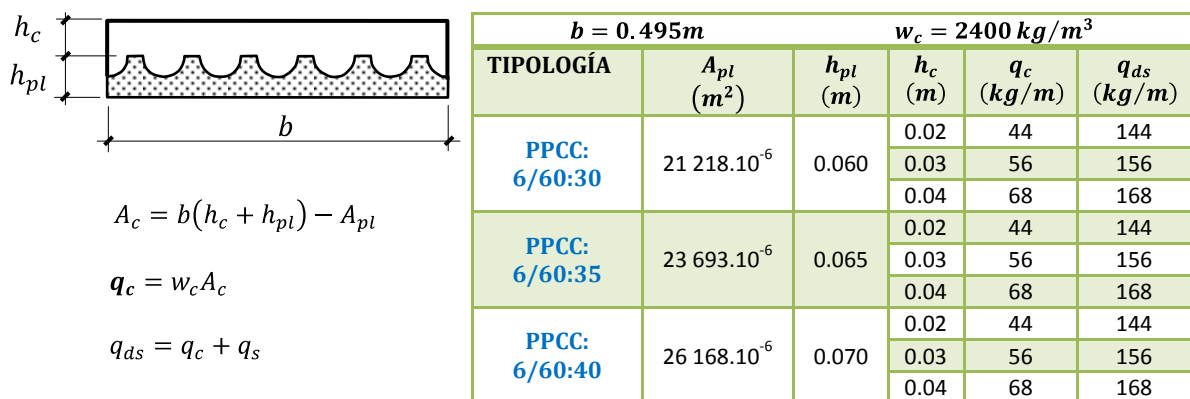


Fig. 3.8 Inclusión de la carpeta. Evaluación de la carga muerta que representa

Si se supone además una carga muerta adicional superpuesta $q_s = 100 \text{ kg/m}$ debida a las terminaciones de piso o de impermeabilización, o cualquier otro efecto de este tipo, se obtiene la carga muerta impuesta total que se indica en la última columna de la misma Tabla. De estos resultados se decide considerar en lo adelante una carga muerta superpuesta total igual a $q_{ds} = 160 \text{ kg/m} = 1.6 \text{ kN/m}$. Obsérvese que para un mismo espesor de carpeta su peso es independiente de la tipología de losa sobre la que se vierta, ya que todas ellas poseen la misma cantidad de depósitos de iguales dimensiones en su plano superior, por tanto el hormigón que se aloja en ellos es el mismo.

Se ha evaluado esta pérdida para las mismas consideraciones que se fijaron en el caso de la pérdida por acortamiento elástico (epígrafe §3.3.3), y los resultados se resumen en la Tabla 3.7. En estos cálculos se ha supuesto la carga muerta superpuesta ya indicada ($q_{ds} = 160 \text{ kg/m}$), por lo que:

$$M_{ds} = \psi(q_{ds}l^2) \approx 0.03(q_{ds}l^2)$$

$$\therefore M_{ds} = 0.03(160 \text{ kg/m})(3.0\text{m})^2 = 43.2 \text{ kg.m} = 43.2 \cdot 10^4 \text{ N.mm}$$

Tabla 3.7 Evaluación de la pérdida debida a la **Fluencia** del hormigón en la sección central

SECCIÓN	REFUERZO	A_p (mm ²)	e_o (mm)	Δf_{CR} (MPa)			
				$f_{pu} = 1\,770 \text{ MPa}$ $f_{pj} = 1\,416 \text{ MPa}$		$f_{pu} = 1\,860 \text{ MPa}$ $f_{pj} = 1\,488 \text{ MPa}$	
				S. TRANSF.	S. CRÍTICA	S. TRANSF.	S. CRÍTICA
PPCC: 6/60: 30	T-3 ³	21.21	-2	25,6	26,7	26,7	27,9
	T-5 ³	58.89		64,8	66,0	68,0	69,1
	T-3 ⁵	35.35		40,3	41,5	42,2	43,3
	T-5 ⁵	98.15		105,7	106,8	110,9	112,0
	T-3 ² :5 ¹	33.77		38,7	39,8	40,5	41,6
	T-3 ¹ :5 ²	46.33		51,8	52,9	54,2	55,3
	T-3 ³ :5 ²	60.47		66,5	67,6	69,7	70,8
	T-3 ² :5 ³	73.03		79,6	80,7	83,4	84,6
PPCC: 6/60: 35	T-3 ³	21.21	0	19,4	19,4	20,4	20,4
	T-5 ³	58.89		53,8	53,8	56,6	56,6
	T-3 ⁵	35.35		32,3	32,3	34,0	34,0
	T-5 ⁵	98.15		89,7	89,7	94,3	94,3
	T-3 ² :5 ¹	33.77		30,9	30,9	32,4	32,4
	T-3 ¹ :5 ²	46.33		42,4	42,4	44,5	44,5
	T-3 ³ :5 ²	60.47		55,3	55,3	58,1	58,1
	T-3 ² :5 ³	73.03		66,8	66,8	70,2	70,2
PPCC: 6/60: 40	T-3 ³	21.21	0	17,6	17,6	18,5	18,5
	T-5 ³	58.89		48,8	48,8	51,2	51,2
	T-3 ⁵	35.35		29,3	29,3	30,8	30,8
	T-5 ⁵	98.15		81,3	81,3	85,4	85,4
	T-3 ² :5 ¹	33.77		28,0	28,0	29,4	29,4
	T-3 ¹ :5 ²	46.33		38,4	38,4	40,3	40,3
	T-3 ³ :5 ²	60.47		50,1	50,1	52,6	52,6
	T-3 ² :5 ³	73.03		60,5	60,5	63,5	63,5

Se observa cómo la mayor pérdida vuelve a corresponder a la prelosa de sección más débil reforzada con el acero de mayor calidad y cuantía, es decir, para la variante **PPCC: 6/60:30: T-5⁵/1860**. La **Figura 3.9** ilustra esta afirmación.

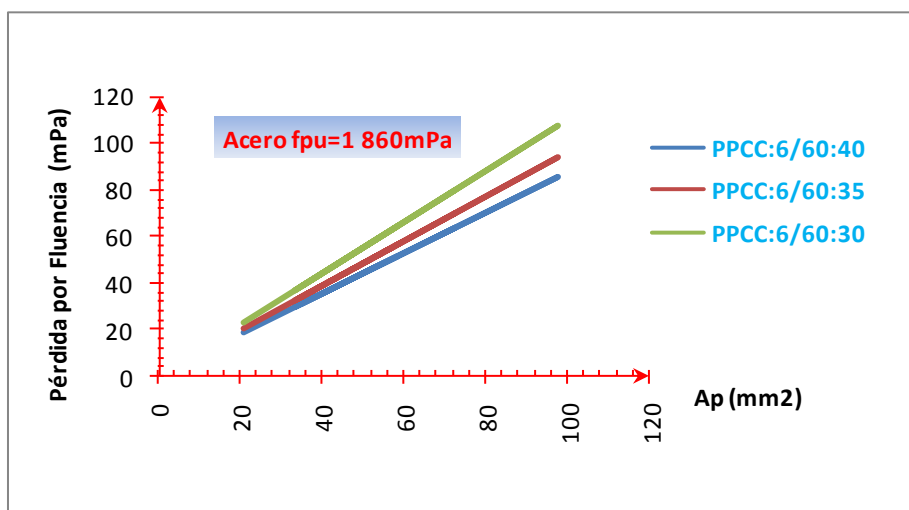


Fig. 3.9 Influencia de la tipología de sección en la pérdida por Fluencia

La **Figura 3. 9** describe la tendencia de la pérdida por fluencia con la variación del área de acero (fuerza de pretensado) y el tipo de sección transversal de la prelosa, considerando siempre una misma calidad de acero pretensado. Obsérvese que para las tres tipologías de sección transversal la tendencia es única: crece la pérdida con el aumento del área de pretensado, pero además, repárese en el hecho de que a la sección de menores dimensiones corresponden las mayores pérdidas, llegando a diferenciarse en aproximadamente un 20 % cuando se compara la sección más débil con la más robusta, considerando en ambas la mayor cantidad de acero.

Mientras tanto, la **Figura 3.10** ofrece una comparación similar pero analizando la tendencia cuando se mantiene constante la sección de la prelosa (los valores indicados se refieren a la tipología **PPCC:6/60:30**), y se varía la resistencia última del acero. En este caso se aprecia cómo al aumentar la resistencia del acero empleado, crece la pérdida por fluencia aunque no de manera sensible, especialmente si se trata de bajas cuantías de acero. Para la mayor área de acero la diferencia es escasamente de un 5%, aproximadamente.

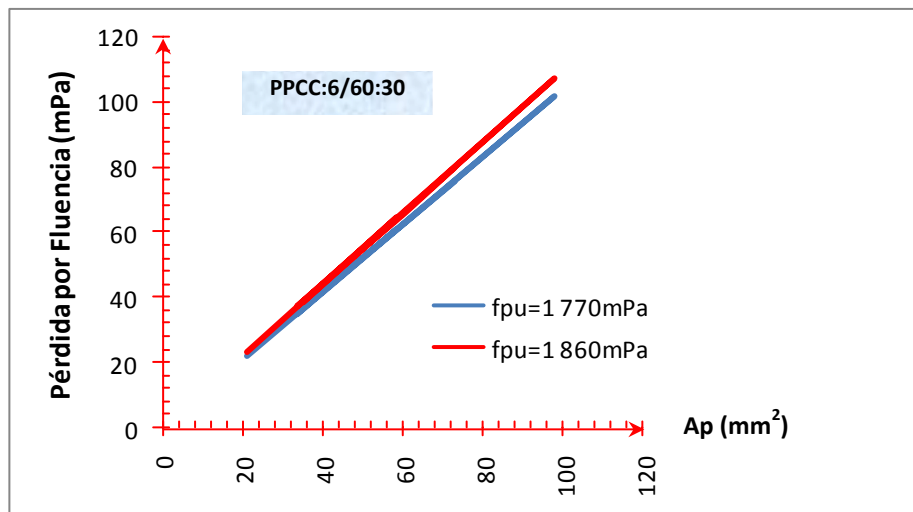


Fig. 3.10 Influencia de la resistencia del acero en la pérdida por Fluencia

3.3.5 EVALUACIÓN DE LA PÉRDIDA DIFERIDA DEBIDA A LA RETRACCIÓN DEL HORMIGÓN

Esta tercera pérdida, también de carácter diferido, se evalúa mediante la expresión siguiente:

$$\Delta f_{SH} = 8.2 \cdot 10^{-6} K_{sh} E_p (1 - 2.36 \cdot 10^{-3} \frac{A_{pl}}{p_{pl}}) (100 - HR_{\%})$$

Siendo:

$K_{sh} = 1$ (Para piezas pretesadas)

A_{pl} : Área de la sección transversal de la prelosa (mm^2)

p_{pl} : Perímetro de la prelosa (mm)

$HR_{\%}$: Humedad relativa ambiental (%)

Si se observa la **Figura 3.3** se puede demostrar que:

$$p_{pl} = 2b + 2h_1 + n_{sc}h_2(\pi - 2)$$

Para las dimensiones tentativas que se han fijado a la prelosa durante su estudio paramétrico ($b = 495mm$; $h_1 = 30mm$, ó $35mm$, ó $40mm$; $h_2 = 30mm$; $n_{sc} = 6$), se llega a:

$$p_{pl} = 1195 + 2h_1$$

La **Tabla 3.8** indica los valores que corresponden a la pérdida por retracción para las tres tipologías de losas que se definieron, y para tres de las humedades relativas ambientales más frecuentes en la región. En los cálculos se ha supuesto $E_p = 2 \cdot 10^5 MPa$.

Tabla 3.8 Pérdida por Retracción en las prelosas de tipología primaria

TIPOLOGÍA	A_{pl} (mm ²)	h_1 (mm)	p_{pl} (mm)	Δf_{SH} (MPa)		
				HR=70%	HR=80%	HR=85%
PPCC:6/60:30	21 218	30	1 255	47.2	31.5	23.6
PPCC:6/60:35	23 693	35	1 265	47.0	31.4	23.5
PPCC:6/60:40	26 168	40	1 275	46.8	31.2	23.4

Obsérvese que las dimensiones de la prelosa en el rango en que han sido fijadas tienen muy poca influencia sobre esta pérdida, no así la humedad relativa ambiental. La **Figura 3.11** ilustra esta última relación para el caso de la prelosa de menor sección transversal.

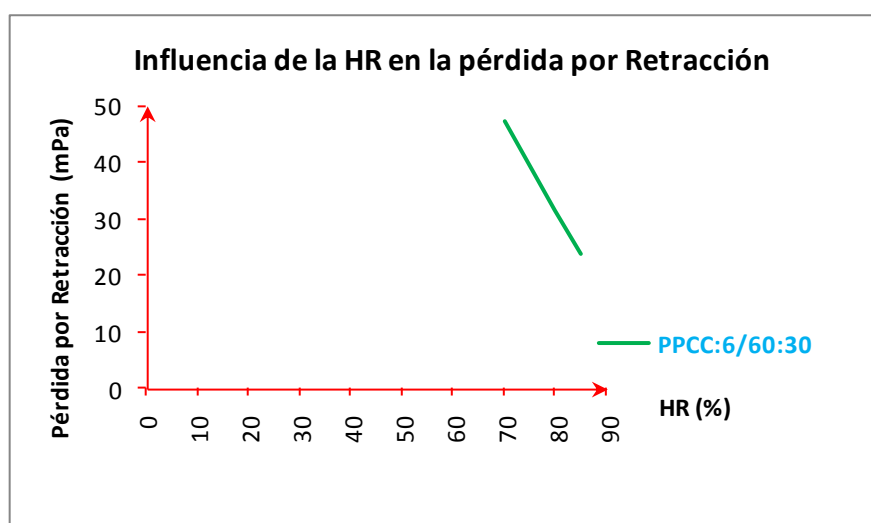


Fig. 3.11 Influencia de la humedad relativa ambiental en la pérdida por Retracción

3.3.6 EVALUACIÓN DE LA PÉRDIDA DIFERIDA DEBIDA A LA RELAJACIÓN DE ESFUERZO

Esta pérdida es la última que se evalúa y depende en lo fundamental del tipo de acero que se utilice para reforzar la prelosa (de relajamiento normal o bajo), además de las restantes pérdidas que ya fueron calculadas. Se rige por la siguiente expresión:

$$\Delta f_{RE} = C[K_{re} - J(\Delta f_{ES} + \Delta f_{CR} + \Delta f_{SH})]$$

Los valores de K_{re} y J se ofrecen en la **Tabla 3.9**, mientras que los de C en la **Tabla 3.10**.

Tabla 3.9 Valores de K_{re} y J

Tipo de Acero	f_{pu} (MPa)	K_{re} (MPa)	J
Relajamiento Normal	1 860	137.9	0.15
	1770	127.5	0.14
Relajamiento Bajo	1 860	34.4	0.04
	1770	31.9	0.037

Tabla 3.10 Valores de C

$\lambda_t = f_{pj}/f_{pu}$	C	
	Relajamiento Normal	Relajamiento Bajo
0.80	-	1.28
0.78	-	1.16
0.75	1.45	1.00
0.73	1.27	0.90
0.70	1.00	0.75
Se interpolará para obtener C de ser necesario		

La evaluación de todas las pérdidas se realizó mediante un Libro Electrónico que se elaboró en EXCEL, y que permitió automatizar la evaluación de todas ellas. Este libro ofrece la posibilidad de calcular automáticamente la pérdidas si se decidiera modificar las dimensiones de la sección y también la tipología de armado.

3.3.7 COEFICIENTES PARA ESTIMAR LAS PÉRDIDAS INICIALES Y DIFERIDAS

La cuarta Conclusión que se incluye en el **ANEXO 4** es quizá la más importante desde un punto de vista práctico, pues ofrece dos coeficientes de fácil empleo para estimar las pérdidas iniciales y diferidas en el elemento **PPCC**, y con ellas fuerza de pretensado tanto inicial o transferida, como la efectiva.

Estos coeficientes son:

$\chi_i = 0.05$ Estimador para las **pérdidas iniciales**

$\chi_d = 0.10$ Estimador para las **pérdidas diferidas**

De manera que la fuerza de pretensado que se transfiere, de hecho la que ha de emplearse durante la comprobación de la prelosa en el instante del destense, viene dada por la expresión:

$$P_i = \begin{cases} 0.75f_{pu}A_p \\ \text{ó} \\ 0.88f_{py}A_p \end{cases}$$

Para los aceros que cumplan con las relaciones:

$$f_{pu} = \lambda_t f_{pu} = 0.80f_{pu} \text{ y } f_{py} = \xi f_{pu} = 0.85f_{pu}:$$

Mientras que la fuerza efectiva para las mismas condiciones:

$$P_e = \begin{cases} 0.65f_{pu}A_p \\ \text{ó} \\ 0.76f_{py}A_p \end{cases}$$

3.4 COMPROBACIÓN DE LA PRELOSA EN EL INSTANTE DEL DESTENSE

Esta comprobación, referida al instante mismo en que se transfiere la fuerza de pretensado a la prelosa en la Planta de producción, se fundamenta en la verificación de las tensiones normales que se introducen a la sección de hormigón, procurando definir si la sección propuesta se acepta o ha de rechazarse, es decir, modificar sus dimensiones. La comprobación exige precisar tres aspectos fundamentales:

- Tensiones límites que se admitan para el hormigón en el destense.
- Evaluación de las tensiones normales que tienen lugar en la sección de la prelosa
- Aceptación o rechazo de la tipología

3.4.1 TENSIONES LÍMITES IMPUESTAS AL HORMIGÓN DURANTE EL DESTENSE

La etapa del destense es relativamente fugaz si se compara con el tiempo de explotación del elemento, y si bien debe verificarse para la fuerza inicial de pretensado P_i , que es la mayor, y la potencial actuación de la carga concomitante, que es la menor, no debe ignorarse que cualquier sobrevaloración de las tensiones que tienen lugar, especialmente las de tracción, debe ser objetivamente interpretada. En efecto, si las tracciones aparecen a nivel de la fibra superior y su magnitud es superior a la resistencia a tracción del hormigón, se originan inmediatamente grietas que luego se cerrarían cuando se haga trabajar a la losa apoyada en sus extremos, pues para entonces la sobrecarga muerta y viva que impone la explotación de la pieza provoca compresión hacia esa fibra.

En el estudio se adoptan los valores ofrecidos por al ACI 318:2008, los que se relacionan a continuación:

Máxima Tracción: $[f_t] = -\sqrt{f'_{cj}}$

Máxima Compresión: $[f_c] = 0.60f'_{cj}$

Si el destense se realiza a los tres días, ya se vio que $f'_{cj} = \beta_3 f'_c = 15 \text{ MPa}$

Entonces:

Máxima Tracción: $[f_t] = -3.87 \text{ MPa}$

Máxima Compresión: $[f_c] = 9 \text{ MPa}$

3.4.2 EVALUACIÓN DE LAS TENSIONES NORMALES

Dentro de esta etapa, las tensiones normales se deben a la acción simultánea de la fuerza inicial de pretensado (P_i), combinada con la carga concomitante (M_{gz}) si es que esta genera flexión, lo que sucede solamente en la tipología **PPCC:6/60:30**, la única en la que el acero posee excentricidad. La **Figura 3.12** ilustra los esfuerzos que solicitan a la sección en este caso.

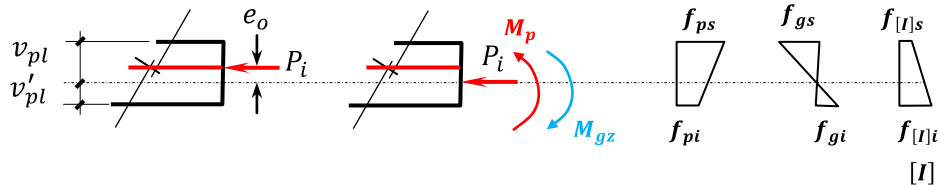


Fig. 3.12 Tensiones normales a la sección de hormigón en el instante del destense

Aceptando que en servicio la respuesta de la sección es cuasi elástica, que la degradación de rigidez es sensiblemente atenuada producto del pretensado, y que la homogeneidad del material se garantiza lo suficiente, las leyes de tensión responden a las expuestas por Navier en sus tratados de la mecánica clásica. Estas leyes se escriben a continuación para las fibras superior e inferior de la sección:

FIBRA SUPERIOR: $f_{[I]s} = \frac{P_i}{A_{pl}} + \frac{P_i \cdot e_o}{W_{pl}} + \frac{M_{gz}}{W_{pl}}$

FIBRA INFERIOR: $f_{[I]i} = \frac{P_i}{A_{pl}} + \frac{P_i \cdot e_o}{W'_{pl}} + \frac{M_{gz}}{W'_{pl}}$

Siendo:

$$M_{gz} = \psi(gl^2) = \psi(w_c \cdot A_{pl})l^2$$

Resultan válidas las siguientes observaciones:

- 1) Las tensiones que se están evaluando a nivel de las fibras superior e inferior de la prelosa en el instante del destense, $f_{[I]s}$ y $f_{[I]i}$, respectivamente, dependen de la longitud de la prelosa (l), pues su magnitud influye en el término M_{gz} .
- 2) El resto de los términos que aparecen en las expresiones de $f_{[I]s}$ y $f_{[I]i}$, dependen de:
 - La Tipología de refuerzo (área y calidad del acero empleado): $P_i = 0.75f_{pu}A_p$
 - La Tipología de la sección de hormigón: A_{pl} , W_{pl} , W'_{pl} , e_o
 - La sección en que desee evaluarse la tensión: ψ
- 3) En el caso de las tipologías de losa **PPCC:6/60:35** y **PPCC:6/60:40** se propuso ubicar los alambres coincidiendo con el centroide de la sección de hormigón, es decir, sin excentricidad alguna ($e_o = 0$). Esta decisión asegura que al transferirse la fuerza de pretensado la pieza sólo se acorta y no llega a adoptar la convexidad que puede tener lugar en la prelosa **PPCC:6/60:30** producto de existir en ella cierta excentricidad. Como consecuencia de esta observación, para las dos tipologías que se mencionan inicialmente se puede asegurar que $e_o = 0$ y $M_{gz} = 0$. En consecuencia para ellas:

$$f_{[I]s} = f_{[I]i} = \frac{P_i}{A_{pl}}$$

- 4) En las expresiones de $f_{[I]s}$ y $f_{[I]i}$ se sustituye cada variable con su signo, adoptándose el siguiente convenio:

P_i : Siempre **positiva** al tratarse de una fuerza que comprime a la sección.

A_{pl} : Siempre **positiva**

W_{pl} : Siempre **positiva** al tratarse de la fibra superior

W'_{pl} : Siempre **negativa** al tratarse de la fibra inferior

e_o : **Positiva** cuando los alambres se ubican por debajo del centroide de la sección de hormigón

M_{gz} : **Positivo** si tracciona la fibra inferior de la sección

$f_{[I]s}$ y $f_{[I]i}$: Si resultan **positivos** se trata de una compresión, de lo contrario resulta una tracción

Las **Tablas 3.11 – 3.14** ofrecen los valores de las tensiones en las fibras extremas para la preloso **PPCC: 6/60:30**, con sus 8 tipologías de refuerzo y para las dos calidades de acero que se han considerado (1 770MPa y 1 860MPa), así como para las dos longitudes extremas que se están fijando a la pieza, a saber: 3.00m y 4.50m. En las evaluaciones realizadas se ha distinguido entre la sección extrema de la zona de transferencia y la crítica situada a la distancia $z = l/4$.

Mientras tanto la **Tabla 3.15** incluye las tensiones que tienen lugar en las fibras extremas de la sección en la preloso de tipología **PPCC: 6/60:35**, para las dos calidades fijadas al acero. Ya en esta tipología, en la que el pretensado es centrado, no es necesario distinguir ni la sección en que se efectúa la evaluación, como tampoco la longitud de la pieza. La **Tabla 3.16** hace lo mismo para la tipología **PPCC: 6/60:40**.

Tabla 3.11 Tensiones normales durante el destense en la **PPCC:6/60:30**, acero 1770 y longitud de **3.00m**

PPCC:6/60:30	$l = 3.00m$		$A_{pl} = 21\,218mm^2$ $W_{pl} = 117\,261mm^3$ $W'_{pl} = -188\,055mm^3$ $e_o = -2mm$					
	$f_{pu} = 1\,770MPa$		SECCIÓN DE TRANSFERENCIA				SECCIÓN CRÍTICA	
			$M_{gz} = 0.5w_c A_{pl} (l_{tr}/l)^2$ $M_{gz} = 2.83 \cdot 10^{-8} (l_{tr})^2$				$M_{gz} = 0.03w_c A_{pl} (l)^2$	
	A_p (mm ²)	P_i (N)	l_{tr} (mm)	$M_{gz} \cdot 10^{-5}$ (N. mm)	$f_{[I]s}$ (MPa)	$f_{[I]i}$ (MPa)	M_{gz} (N. mm)	$f_{[I]s}$ (MPa)
								$f_{[I]i}$ (MPa)
T-3 ³	21.21	28 156	28	-2,22	0,85	1,63	-143 222	-0,37
T-5 ³	58.89	78 176	47	-6,25	2,35	4,52		1,13
T-3 ⁵	35.35	46 927	28	-2,22	1,41	2,71		0,19
T-5 ⁵	98.15	130 294	47	-6,25	3,92	7,53		2,70
T-3 ² :5 ¹	33.77	44 830	47	-6,25	1,35	2,59		0,13
T-3 ¹ :5 ²	46.33	61 503	47	-6,25	1,85	3,55		0,63
T-3 ³ :5 ²	60.47	80 274	47	-6,25	2,41	4,64		1,19
T-3 ² :5 ³	73.03	96 947	47	-6,25	2,92	5,60		1,69

Tabla 3.12 Tensiones normales durante el destense en la **PPCC:6/60:30**, acero 1770 y longitud de **4.50m**

PPCC:6/60:30	$l = 4.50m$		$A_{pl} = 21\,218mm^2$ $W_{pl} = 117\,261mm^3$ $W'_{pl} = -188\,055mm^3$ $e_o = -2mm$					
	$f_{pu} = 1\,770MPa$		SECCIÓN DE TRANSFERENCIA				SECCIÓN CRÍTICA	
			$M_{gz} = 0.5w_c A_{pl} (l_{tr}/l)^2$ $M_{gz} = 2.83 \cdot 10^{-8} (l_{tr})^2$				$M_{gz} = 0.03w_c A_{pl} (l)^2$	
	A_p (mm ²)	P_i (N)	l_{tr} (mm)	M_{gz} (N. mm)	$f_{[I]s}$ (MPa)	$f_{[I]i}$ (MPa)	M_{gz} (N. mm)	$f_{[I]s}$ (MPa)
								$f_{[I]i}$ (MPa)
T-3 ³	21.21	28 156	28	-9,86	0,85	1,63	-322 248	-1,90
T-5 ³	58.89	78 176	47	-2,78	2,35	4,52		-0,40
T-3 ⁵	35.35	46 927	28	-9,86	1,41	2,71		-1,34
T-5 ⁵	98.15	130 294	47	-2,78	3,92	7,53		1,17
T-3 ² :5 ¹	33.77	44 830	47	-2,78	1,35	2,59		-1,40
T-3 ¹ :5 ²	46.33	61 503	47	-2,78	1,85	3,55		-0,90
T-3 ³ :5 ²	60.47	80 274	47	-2,78	2,41	4,64		-0,33
T-3 ² :5 ³	73.03	96 947	47	-2,78	2,92	5,60		0,17

Tabla 3.13 Tensiones normales durante el destense en la **PPCC:6/60:30**, acero 1860 y longitud de **3.00m**

PPCC:6/60:30	$l = 3.00m$		$A_{pl} = 21\,218mm^2$ $W_{pl} = 117\,261mm^3$ $W'_{pl} = -188\,055mm^3$ $e_o = -2mm$					
	$f_{pu} = 1\,860MPa$		SECCIÓN DE TRANSFERENCIA				SECCIÓN CRÍTICA	
			$M_{gz} = 0.5w_c A_{pl} (l_{tr}/l)^2$ $M_{gz} = 2.83 \cdot 10^{-8} (l_{tr})^2$				$M_{gz} = 0.03w_c A_{pl} (l)^2$	
	A_p (mm^2)	P_i (N)	l_{tr} (mm)	M_{gz} ($N \cdot mm$)	$f_{[I]s}$ (MPa)	$f_{[I]i}$ (MPa)	M_{gz} ($N \cdot mm$)	$f_{[I]s}$ (MPa)
T-3³	21.21	29 588	30	-2,55	0,89	1,71	-143 222	-0,33
T-5³	58.89	82 152	50	-7,07	2,47	4,75		1,25
T-3⁵	35.35	49 313	30	-2,55	1,48	2,85		0,26
T-5⁵	98.15	136 919	50	-7,07	4,12	7,91		2,90
T-3²:5¹	33.77	47 109	50	-7,07	1,42	2,72		0,20
T-3¹:5²	46.33	64 630	50	-7,07	1,94	3,73		0,72
T-3³:5²	60.47	84 356	50	-7,07	2,54	4,87		1,32
T-3²:5³	73.03	101 877	50	-7,07	3,06	5,88		1,84
								6,65

Tabla 3.14 Tensiones normales durante el destense en la **PPCC:6/60:30**, acero 1860 y longitud de **4.50m**

PPCC:6/60:30	$l = 4.50m$		$A_{pl} = 21\,218mm^2$ $W_{pl} = 117\,261mm^3$ $W'_{pl} = -188\,055mm^3$ $e_o = -2mm$					
	$f_{pu} = 1\,860MPa$		SECCIÓN DE TRANSFERENCIA				SECCIÓN CRÍTICA	
			$M_{gz} = 0.5w_c A_{pl} (l_{tr}/l)^2$ $M_{gz} = 2.83 \cdot 10^{-8} (l_{tr})^2$				$M_{gz} = 0.03w_c A_{pl} (l)^2$	
	A_p (mm^2)	P_i (N)	l_{tr} (mm)	M_{gz} ($N \cdot mm$)	$f_{[I]s}$ (MPa)	$f_{[I]i}$ (MPa)	M_{gz} ($N \cdot mm$)	$f_{[I]s}$ (MPa)
T-3³	21.21	29 588	30	-1,13	0,89	1,71	-322 248	-1,86
T-5³	58.89	82 152	50	-3,14	2,47	4,75		-0,28
T-3⁵	35.35	49 313	30	-1,13	1,48	2,85		-1,27
T-5⁵	98.15	136 919	50	-3,14	4,12	7,91		1,37
T-3²:5¹	33.77	47 109	50	-3,14	1,42	2,72		-1,33
T-3¹:5²	46.33	64 630	50	-3,14	1,94	3,73		-0,80
T-3³:5²	60.47	84 356	50	-3,14	2,54	4,87		-0,21
T-3²:5³	73.03	101 877	50	-3,14	3,06	5,88		0,32
								7,60

Tabla 3.15 Tensiones normales durante el destense en la PPCC:6/60:35

PPCC:6/60:35						
	$A_{pl} = 23\,693\text{mm}^2$ $e_o = 0$					
	$f_{pu} = 1\,770\text{MPa}$				$f_{pu} = 1\,860\text{MPa}$	
	A_p (mm^2)	P_i (N)	$f_{[I]s}$ (MPa)	$f_{[I]i}$ (MPa)	P_i (N)	$f_{[I]i}$ (MPa)
T-3 ³	21.21	28 156	1,19	1,19	29 588	1,25
T-5 ³	58.89	78 176	3,30	3,30	82 152	3,47
T-3 ⁵	35.35	46 927	1,98	1,98	49 313	2,08
T-5 ⁵	98.15	130 294	5,50	5,50	136 919	5,78
T-3 ^{2:5} ¹	33.77	44 830	1,89	1,89	47 109	1,99
T-3 ^{1:5} ²	46.33	61 503	2,60	2,60	64 630	2,73
T-3 ^{3:5} ²	60.47	80 274	3,39	3,39	84 356	3,56
T-3 ^{2:5} ³	73.03	96 947	4,09	4,09	101 877	4,30

Tabla 3.16 Tensiones normales durante el destense en la PPCC:6/60:40

PPCC:6/60:40						
	$A_{pl} = 26\,168\text{mm}^2$ $e_o = 0$					
	$f_{pu} = 1\,770\text{MPa}$				$f_{pu} = 1\,860\text{MPa}$	
	A_p (mm^2)	P_i (N)	$f_{[I]s}$ (MPa)	$f_{[I]i}$ (MPa)	P_i (N)	$f_{[I]i}$ (MPa)
T-3 ³	21.21	28 156	1,08	1,08	29 588	1,13
T-5 ³	58.89	78 176	2,99	2,99	82 152	3,14
T-3 ⁵	35.35	46 927	1,79	1,79	49 313	1,88
T-5 ⁵	98.15	130 294	4,98	4,98	136 919	5,23
T-3 ^{2:5} ¹	33.77	44 830	1,71	1,71	47 109	1,80
T-3 ^{1:5} ²	46.33	61 503	2,35	2,35	64 630	2,47
T-3 ^{3:5} ²	60.47	80 274	3,07	3,07	84 356	3,22
T-3 ^{2:5} ³	73.03	96 947	3,70	3,70	101 877	3,89

Se exponen, por su interés, las siguientes observaciones:

- 1) En el caso de las tipologías PPCC:6/60:35 y PPCC:6/60:40 no se distingue entre las secciones de transferencia y crítica, pues en ambas las tensiones normales que aparecen en el hormigón durante el destense son iguales debido a que en ellas $e_o = 0$ y $M_{gz} = 0$.
- 2) En el caso de la tipología PPCC:6/60:30 no sucede lo mismo, sin embargo, es más desfavorable la situación que acontece en la sección crítica, la única en que para algunas condiciones, aparecen tracciones.
- 3) En todos los casos la fibra inferior se encontrará comprimida durante el destense.

- 4) Sólo en la sección crítica la fibra superior puede llegar a traccionarse. La máxima tracción se registra en el caso de la tipología **PPCC: 6/60:30**, de longitud 4.50m y con un acero de $f_{pu} = 1\,770\text{MPa}$ que responde a la cuantía mínima (**T-3³**), es decir, la sección de hormigón más débil y la menor fuerza de pretensado. La magnitud de esta tensión es **-1.90MPa**.
- 5) La máxima compresión aparece a nivel de la fibra inferior, también para la tipología **PPCC:6/60:30**, pero cuando tiene lugar la fuerza de pretensado máxima, es decir, para el acero de $f_{pu} = 1\,860\text{MPa}$ con la mayor cantidad de acero (**T-5⁵**). Su magnitud es **+9.62MPa**.
- 6) En el caso de las tipologías **PPCC: 6/60:35** y **PPCC: 6/60:40** nunca aparecen tracciones al transferirse la fuerza de pretensado.

3.4.3 ACEPTACIÓN O RECHAZO DE LA TIPOLOGÍA

Si se combina la definición recogida en el epígrafe **§3.4.1** con los resultados alcanzados en **§3.4.2**, se concluye que en sólo dos de las 48 variantes en estudio no se satisface una de las tensiones límites, en este caso la de máxima compresión.

Se trata de las variantes **PPCC:6/60:T-5⁵/1770** y **PPCC:6/60:T-5⁵/1860** cuando se emplean en la longitud de 4.50m.

Esta conclusión se fundamenta en el hecho de que la máxima tracción que tiene lugar no sobrepasa, en ningún caso, la tensión límite fijada. Sin embargo, en los casos señalados en el párrafo anterior se origina una compresión a nivel de la fibra inferior que supera la tensión límite aceptada. En efecto:

TRACCIÓN:

- $|f_{t,max}| < |f_t|$ Pues $|-1.90\text{MPa}| < |-3.87\text{MPa}|$, **1.90MPa < 3.87MPa**

COMPRESIÓN:

- $f_{c,max} > [f_c]$ Pues , **9.24MPa > 9.0MPa** Para **PPCC:6/60:T-5⁵/1770**
- $f_{c,max} > [f_c]$ Pues , **9.62MPa > 9.0MPa** Para **PPCC:6/60:T-5⁵/1860**

A pesar de esto, se admitirá que las 48 variantes pasan la prueba del destense pues la diferencia entre la máxima compresión que tiene lugar, y la tensión límite fijada es realmente baja, sólo del 6.9%.

3.5 PRINCIPIOS GENERALES DE CÁLCULO

El análisis estructural de la tipología **PPCC** se fundamenta en la tendencia actual de las normativas internacionales relacionadas con el análisis de las secciones compuestas del tipo que aquí se propone, así como la documentación consultada con lo más avanzado a nivel mundial en experimentación y modelación sobre estas soluciones compuestas.

Se resaltan, por su importancia, los siguientes principios:

- Los resultados no deben generalizarse a obras que se ubiquen dentro de zonas sísmicas con grado II o superior, como tampoco en estructuras sometidas a efectos dinámicos de significación.
- Las losas construidas con la solución **PPCC** no deben estar afectadas por cargas colgadas que degraden la capacidad resistente de la conexión que se produce en la interfase prelosa – carpeta.
- Se adoptan los principios del ACI: 318:2008 para fijar los coeficientes de mayoración de las cargas (muerta y viva), lo mismo que los coeficientes de reducción de las capacidades resistentes nominales.
- Los cálculos incluyen las comprobaciones de los **estados límites de servicio y de resistencia**, lo mismo para la etapa de construcción de la carpeta, como de explotación de la losa.

3.5.1 ETAPAS DE ANÁLISIS

Las comprobaciones a efectuar se aplican a las tres tipologías de sección en estudio (**PPCC:6/60:30**, **PPCC:6/60:35** o **PPCC:6/60:40**), y a las ocho de refuerzo (**T-3³**, **T-5³**, **T-3⁵**, **T-5⁵**, **T-3²:5¹**, **T-3¹:5²**, **T-3³:5²** o **T-3²:5³**), debiéndose considerar las dos etapas fundamentales de trabajo de este elemento:

(A) ETAPA DE CONSTRUCCIÓN DE LA CARPETA

(B) ETAPA DE EXPLOTACIÓN DE LA LOSA

En cada una de estas etapas se modifica tanto la sección resistente que debe ser considerada en los cálculos, como la carga que actúa. A continuación se exponen las principales singularidades de ambas.

3.5.2 ESTUDIO DE LA ETAPA DE CONSTRUCCIÓN DE LA CARPETA

OBJETO DEL ANÁLISIS EN ESTA ETAPA:

En esta etapa el análisis se refiere a decidir **si se requiere o no apuntalar la losa** durante el vaciado del hormigón de la carpeta, y en caso afirmativo definir la cantidad de puntales a colocar en cada losa. El interés del apuntalamiento es reducir temporalmente la longitud de la losa para garantizar el cumplimiento de los estados límites.

CARGAS A CONSIDERAR

MUERTA: (D_{E1})

- Peso propio de la prelosa: $q_{pl} = w_c A_{pl}$
- Peso de la carpeta vaciada in situ: $q_c = w_c [b(h_{pl} + h_c) - A_{pl}]$
- Carga temporal de construcción: Se asumirá $q_{te} = 80 \text{ kg/m}^2$

Como el ancho adoptado para la losa es $b = 495 \text{ mm}$, esta última carga distribuida longitudinalmente resulta ser:

$$q_{te} = (80 \text{ kg/m}^2) \cdot b = (80 \text{ kg/m}^2)(0.495 \text{ m}) \approx 40 \text{ kg/m}$$

Recurriendo a la información que ofrece la **Tabla 3.1** (define el peso por unidad de longitud de cada losa, q_{pl}), y la que ofrece la Tabla que se incluye en la **Figura 3.8** (define el peso por unidad de longitud de la carpeta, q_c), se obtiene para cada tipología de losa y espesor de carpeta, la carga muerta total (D_{E1}) que se define en la **Tabla 3.17**.

Tabla 3.17 Carga Muerta Total que actúa durante la etapa de construcción de la carpeta

TIPOLOGÍA	q_{pl} (kg/m)	h_c (m)	q_c (kg/m)	q_{te} (kg/m)	D_{E1} (kg/m)	D_{E1} (N/mm)
PPCC: 6/60:30	50.9	0.02	44	40 kg/m	135	1.35
		0.03	56		147	1.47
		0.04	68		159	1.59
PPCC: 6/60:35	56.9	0.02	44		141	1.41
		0.03	56		153	1.53
		0.04	68		165	1.65
PPCC: 6/60:40	62.8	0.02	44		147	1.47
		0.03	56		159	1.59
		0.04	68		171	1.71

Siendo:

$$D_{E1} = q_{pl} + q_c + q_{te}$$

SECCIÓN RESISTENTE A CONSIDERAR

En esta etapa y hasta tanto el hormigón vaciado de la carpeta no endurezca, la sección resistente es exclusivamente la sección de la prelosa, de ahí que se pueda llegar a requerir apuntalamiento del elemento en algunos casos, debido a que la sección resistente es la más débil y la sobrecarga de construcción es relativamente alta.

La complejidad analítica que significa considerar en los cálculos como sección resistente a aquella que en realidad posee la prelosa justifica recurrir a la simplificación que se expone a continuación, sobre todo cuando la diferencia de resultados con una y otra sección (real y simplificada) resulta despreciable.

La simplificación consiste en una transformación mediante la cual la sección real sea tratada mediante una sección rectangular equivalente que respete el siguiente principio: **Mantener constante la altura de la sección y reducir su ancho de manera que el área de la nueva sección coincida con el área de la sección original.** La **Figura 3.13** muestra la idea rectora de la simplificación.

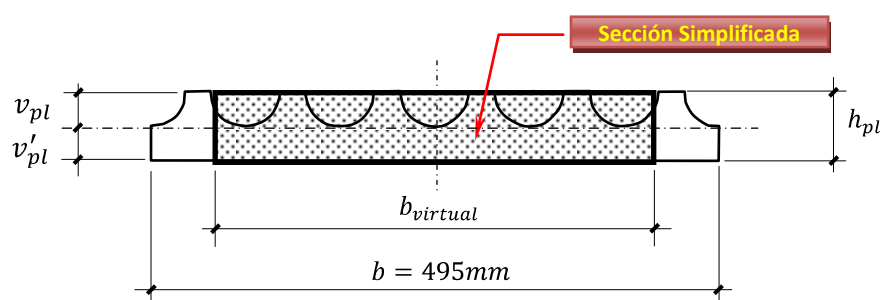


Fig. 3.13 Sección simplificada de la prelosa PPCC para el análisis de esta Etapa

Con la transformación propuesta se obtienen nuevas características geométricas que son las que deben ser consideradas para el análisis de las tensiones normales en servicio. La **Tabla 3.18** expone las dimensiones y características geométricas de las secciones transformadas.

Tabla 3.18 Características Geométricas de la sección resistente simplificada para el análisis de la etapa de construcción de la carpeta

TIPOLOGÍA	SECCIÓN					
	REAL		TRANSFORMADA			
	A_{pl} (mm ²)	h_{pl} (mm)	$b_{virtual}$ (mm)	$v_{E1} = v'_{E1}$ (mm)	I_{E1} (mm ⁴)	$W_{E1} = W'_{E1}$ (mm ³)
PPCC: 6/60:30	21 218	60	354	30.0	6 372 000	212 400
PPCC: 6/60:35	23 693	65	364	32.5	8 330 292	256 317
PPCC: 6/60:40	26 168	70	374	35.0	10 690 167	305 433

Siendo:

$$b_{virtual} = A_{pl}/h_{pl}$$

$$v_{E1} = v'_{E1} = h_{pl}/2$$

$$I_{E1} = (b_{virtual})(h_{pl})^3/12$$

$$W_{E1} = W'_{E1} = I_{E1}/v_{E1}$$

MODELO ANALÍTICO

Se fundamenta en las líneas (b) y (c) enunciadas en el párrafo §3.4. La presentación y solución de este modelo se trata en el epígrafe §3.6.

3.5.3 ESTUDIO DE LA ETAPA DE EXPLOTACIÓN DE LA LOSA

OBJETO DEL ANÁLISIS EN ESTA ETAPA:

En esta segunda etapa el análisis se refiere a **evaluar la máxima sobrecarga** que admite la losa compuesta, con el interés de garantizar el cumplimiento de los estados límites.

CARGAS A CONSIDERAR

CARGA MUERTA: (D_{E2})

- Peso propio de la prelosa: (q_{pl})
- Peso de la carpeta vaciada in situ: (q_c)
- Carga de terminación: Se asumirá lo mismo para entrepiso que cubierta una carga muerta adicional debido al peso de las terminaciones igual a $q_{sD} = 100 \text{ kg/m}^2$

$$q_{sD} = (100 \text{ kg/m}^2) \cdot b = (100 \text{ kg/m}^2)(0.495\text{m}) \approx 50 \text{ kg/m}$$

La **Tabla 3.19** resume esta carga.

Tabla 3.19 Carga Muerta Total que actúa durante la etapa explotación de la losa

TIPOLOGÍA	q_{pl} (kg/m)	h_c (m)	q_c (kg/m)	q_{sD} (kg/m)	D_{E2} (kg/m)	D_{E2} (kN/m)
PPCC: 6/60:30	50.9	0.02	44	50 kg/m	145	1.45
		0.03	56		157	1.57
		0.04	68		169	1.69
PPCC: 6/60:35	56.9	0.02	44		151	1.51
		0.03	56		163	1.63
		0.04	68		175	1.75
PPCC: 6/60:40	62.8	0.02	44		157	1.57
		0.03	56		169	1.69
		0.04	68		181	1.81

Siendo:

$$D_{E2} = q_{pl} + q_c + q_{sD}$$

CARGA VIVA: (L_{E2})

El modelo analítico que se presenta en la sección §3.7 procura determinar dentro de esta etapa la máxima sobrecarga L_{E2} que puede admitirse para cada tipología de losa (incluido su refuerzo), y en cada una de las luces en que pueden emplearse, de manera que se satisfagan los estados límites.

SECCIÓN RESISTENTE A CONSIDERAR

Se trata de una sección a la cual se integra la carpeta pues ya para entonces el hormigón empleado en ella ha adquirido su resistencia. Proponiendo que ambos hormigones posean la misma resistencia no se justifica homogenización alguna y en consecuencia continúa tratándose de una sección resistente rectangular, ahora de una altura mayor debido a la contribución de la carpeta. El procedimiento para obtener las dimensiones y características geométricas de la nueva sección resistente, es similar al descrito para la etapa anterior, indicándose en la **Tabla 3.20** estos resultados.

Tabla 3.20 Características Geométricas de la sección resistente para el análisis de la etapa de explotación de la losa

TIPOLOGÍA	h_{pl} (mm)	h_c (mm)	h_t (mm)	A_{E2} (mm ²)	$v_{E2} = v'_{E2}$ (mm)	I_{E2} (mm ⁴)	$W_{E2} = W'_{E2}$ (mm ³)
PPCC: 6/60:30	60	20	80	39 600	40	21 120 000	528 000
		30	90	44 550	45	30 071 250	668 250
		40	100	49 500	50	41 250 000	825 000
PPCC: 6/60:35	65	20	85	42 075	42.5	25 332 656	596 063
		30	95	47 025	47.5	35 366 719	744 563
		40	105	51 975	52.5	47 752 031	909 563
PPCC: 6/60:40	70	20	90	44 550	45	30 071 250	668 250
		30	100	49 500	50	41 250 000	825 000
		40	110	54 450	55	54 903 750	998 250

Siendo:

$$h_t = h_{pl} + h_c$$

$$A_{E2} = b \cdot h_t = 495 \cdot h_t$$

$$v_{E2} = v'_{E2} = h_t/2$$

$$I_{E2} = (b)(h_t)^3/12 = (495)(h_t)^3/12$$

$$W_{E2} = W'_{E2} = I_{E2}/v_{E1}$$

MODELO ANALÍTICO

Se fundamenta también en las líneas (b) y (c) enunciadas en el párrafo §3.4. La presentación y solución de este modelo se trata en el epígrafe §3.7.

3.5.4 ENFOQUE DEL MODELO A LOS ESTADOS LÍMITES

(A) ESTADOS LÍMITES ÚLTIMOS

La comprobación de los **Estados Límites Últimos** se efectúa a partir de las acciones mayoradas o de cálculo, garantizando en todos los casos que la sollicitación actuante mayorada en la sección crítica, y para la combinación pésima de las cargas, no llegue a sobrepasar la resistencia de diseño de dicha sección, es decir, garantizando el cumplimiento de la siguiente desigualdad:

$$U \leq \phi R_n \Rightarrow U \leq R_d$$

Siendo:

U : Resistencia requerida

R_n : Resistencia Nominal

R_d : Resistencia de Diseño

ϕ : Coeficiente reductor de la capacidad nominal

Se verificarán dentro de cada etapa los siguientes Estados Límites Últimos:

ETAPA DE CONSTRUCCIÓN DE LA CARPETA

Estado E1.1_(ELU): Capacidad resistente a Flexión (Define la separación entre puntales X_{E11})

Estado E1.2_(ELU): Capacidad resistente a Cortante (Define la separación entre puntales X_{E12})

ETAPA DE CONSTRUCCIÓN DE EXPLOTACIÓN

Estado E2.1_(ELU): Capacidad resistente a Flexión (Define la carga L_{E21})

Estado E2.2_(ELU): Capacidad resistente a Cortante (Define la carga L_{E23})

(B) ESTADOS LÍMITES DE SERVICIO

Para los **Estados Límites de Servicio** se adoptan los valores característicos de las cargas, garantizando en todos los casos que la sollicitación actuante en la sección crítica, y para la combinación pésima de las cargas, no llegue a sobrepasar la resistencia de diseño de dicha sección, determinada a partir de las resistencias características de los materiales:

$$U \leq R_n \Rightarrow \phi = 1$$

Se verificarán dentro de cada etapa los siguientes Estados Límites de Servicio:

ETAPA DE CONSTRUCCIÓN DE LA CARPETA

Estado E1.3_(ELS): Comprobación de las tensiones normales generadas por las cargas de servicio (Define la separación entre puntales X_{E13})

Estado E1.4_(ELS): Comprobación de la flecha (Define la separación entre puntales X_{E14})

ETAPA DE CONSTRUCCIÓN DE EXPLOTACIÓN

Estado E2.3_(ELS): Comprobación de las tensiones normales generadas por las cargas de servicio (Define la carga L_{E23})

Estado E2.4_(ELS): Comprobación de la flecha (Define la carga L_{E24})

3.6 ANÁLISIS DE LA ETAPA DE VACIADO DE LA CARPETA. CÁLCULO DEL APUNTALAMIENTO

Se trata ahora de definir si durante la etapa de vaciado de la carpeta es necesario apuntalar la losa para garantizar los estados límites, lo mismo de resistencia que de servicio, y en caso afirmativo determinar la separación a la que deben ser ubicados los puntales. En el rango de luces que se estudia es muy poco probable que se necesiten más de dos puntales y en consecuencia se definen tres variantes de apuntalamiento:

Variante P₀: No se requiere *puntal* alguno, luego $X_0 = l_{pl}$.

Variante P₁: Se refiere a la ubicación de *un puntal* intermedio, definiendo así dos luces de trabajo en la prelosa, iguales entre sí e igual a $X_1 = l_{pl}/2$.

Variante P₂: Se refiere a la ubicación de *dos puntales* intermedios de manera que quedan definidas tres luces de trabajo en la prelosa, iguales entre sí e igual a $X_2 = l_{pL}/3$.

En la **Figura 3.14** se incluyen las leyes que permiten evaluar los *momentos elásticos*, tanto negativos como positivos que origina la carga D_{E1} en esta etapa, definida en la **Tabla 3.17**: sobre los apoyos intermedios (representados por los puntales), y en la sección de máximo momento de cada vano, respectivamente, para las dos variantes apuntadas:

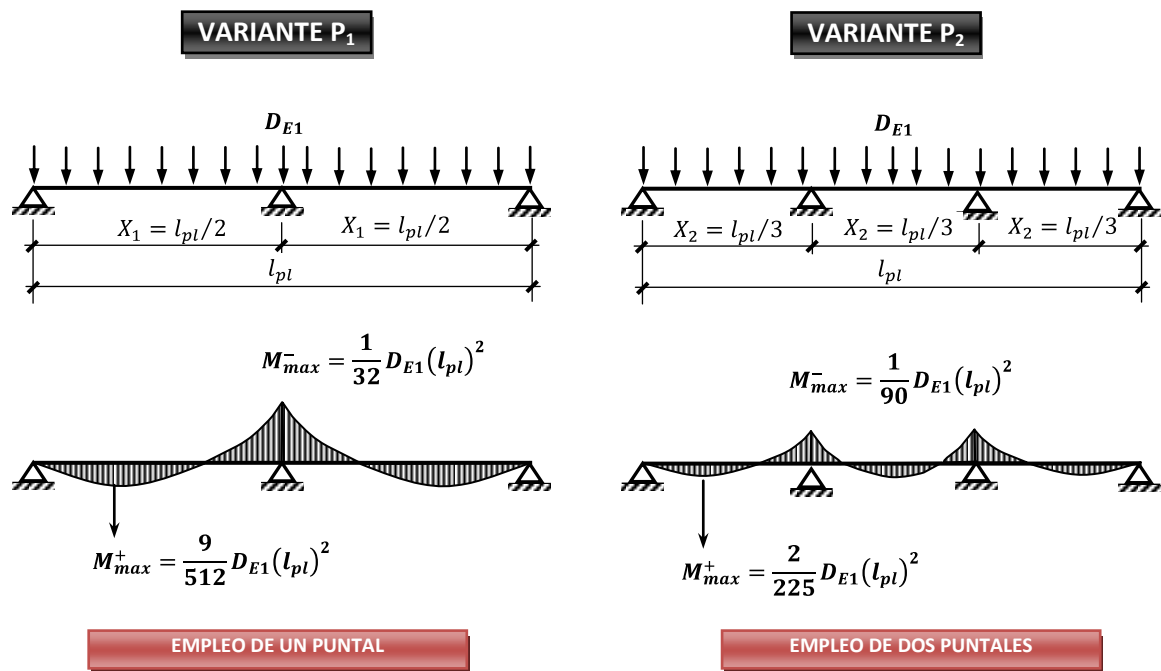


Fig. 3.14 Variantes de apuntalamiento para la etapa de ejecución de la carpeta

Tabla 3.21 Momentos Elásticos que tienen lugar durante el apuntalamiento de la carpeta

ETAPA	VARIANTE DE APUNTAMIENTO	SEPARACIÓN ENTRE PUNTALES	MOMENTO ELÁSTICO	M_{max}^{+} , M_{max}^{-}	λ
VACIADO CARPETA	SIN PUNTAL	l_{pl}	POSITIVO	$M_{max}^{+,-} = \lambda \cdot D_{E1} (l_{pl})^2$	1/8
	UN PUNTAL	$l_{pl}/2$	POSITIVO		9/512
			NEGATIVO		1/32
	DOS PUNTALES	$l_{pl}/3$	POSITIVO		2/225
			NEGATIVO		1/90

Al analizarse esta etapa mediante una sección resistente prismática y un pretensado centrado en las tipologías **PPCC: 6/60:35** y **PPCC: 6/60:40**, o cuasi centrado para el caso **PPCC: 6/60:30**, para definir si se requiera o no apuntalar es suficiente considerar como acción sobre la sección resistente aquella que corresponde a los momentos positivos

3.6.1 DETERMINACIÓN DE LA CANTIDAD DE PUNTALES PARA ASEGURAR EL ESTADO LÍMITE DE RESISTENCIA A FLEXIÓN

Se parte de las ecuaciones de equilibrio correspondientes a los estados límites de resistencia, escritas para una sección rectangular como la que se ha propuesto para esta etapa:

EQUILIBRIO DE FUERZAS: $0.85f'_c \cdot \beta_1 c \cdot b_{virtual} = A_p \cdot f_{ps}$

EQUILIBRIO DE MOMENTO: $M_n = 0.85f'_c \cdot \beta_1 c \cdot b_{virtual} (d - 0.5\beta_1 c)$

Para evaluar la tensión de trabajo del acero pretensado, f_{ps} , se adopta la expresión definida por el ACI, la que se indica luego en el diagrama secuencial que se expone en la **Figura 3.15**. Además, se considera el valor del coeficiente de reducción de la capacidad resistente (ϕ) que ofrece ese mismo Reglamento.

CONDICIONES SUPUESTAS PARA EL CÁLCULO:

- Relación entre las tensiones de fluencia y rotura: $\xi = f_{py}/f_{pu} = 0.85 \Rightarrow \gamma_p = 0.40$
- Resistencia del hormigón (igual para prelosa y carpeta): $f'_c = 25MPa \Rightarrow \beta_1 = 0.85$

BASE DE CÁLCULO: $M_u \leq \phi M_n$

Si se define $M_u = \lambda q l_{pl}^2 = \lambda (\gamma_{SD} \cdot D_{E1}) l_{pl}^2$

Entonces, para cada caso de apuntalamiento, definido por el coeficiente (λ), se debe cumplir que:

$$\lambda (\gamma_{SD} \cdot D_{E1}) l_{pl}^2 \leq \phi M_n \Rightarrow \lambda \leq \phi M_n / \gamma_{SD} \cdot D_{E1} \cdot l_{pl}^2$$

CONCLUSIÓN: Los resultados que se exponen en las **Tablas 3.22, 23 y 24** confirman que el cumplimiento de la base de cálculo de los Estados Límites de Resistencia a Flexión durante el vaciado de la carpeta, exige apuntalar la prelosa en la mayoría de sus tipologías de sección transversal y acero, e incluso de longitud, lo que permite proponer para esta etapa un puntal ubicado en el centro de su longitud.

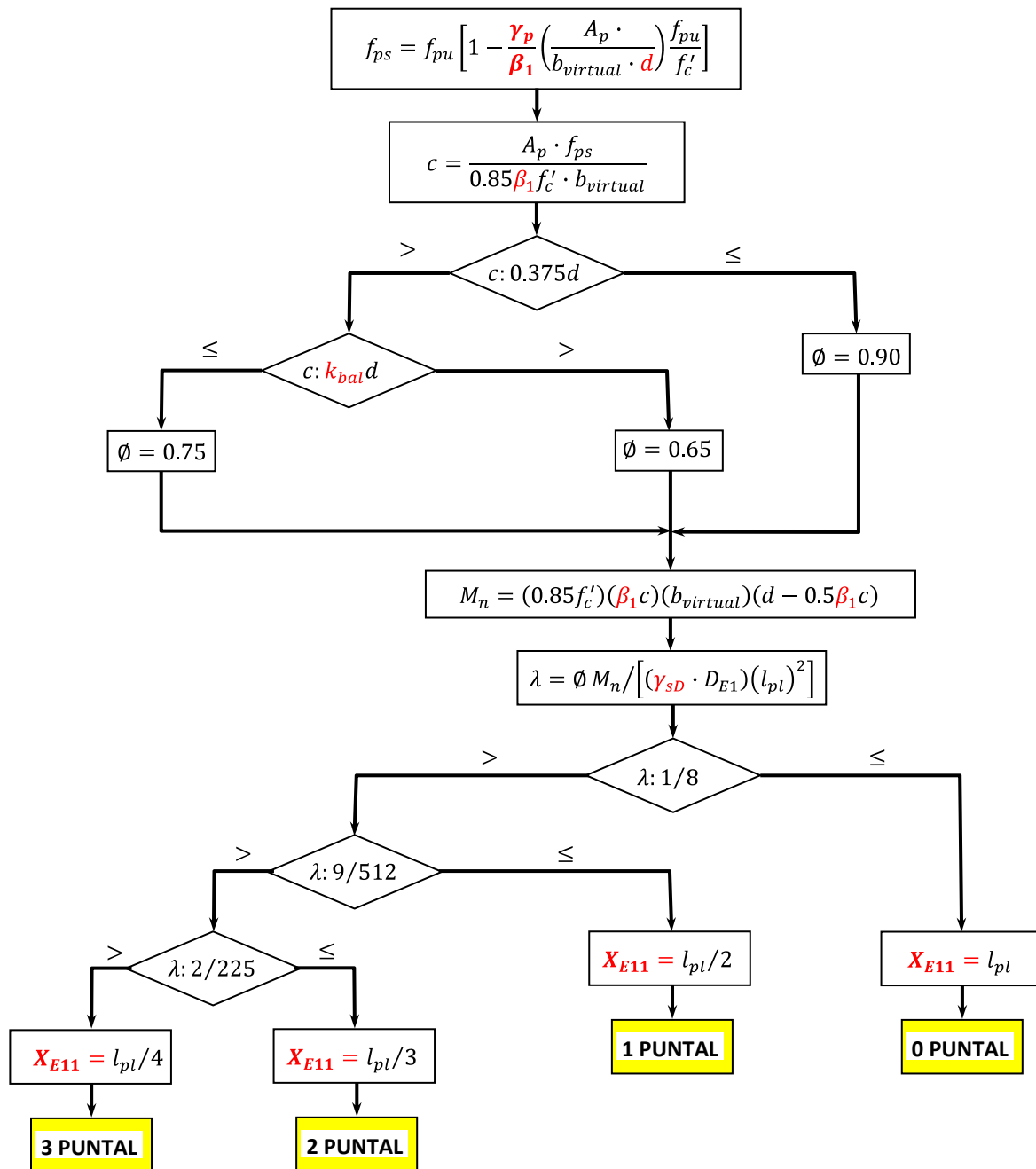


Fig. 3.15 Procedimiento para determinar la separación entre puntales que satisfaga El E.LU de resistencia a Flexión durante el vaciado de la carpeta

Tabla 3.22 Cantidad de puntales que requiere la Tipología de losa **PPCC: 6/60:30** durante el vaciado de la carpeta

DATOS:						$h_{pl} = 60mm$ (Tabla 3.19) $b_{virtual} = 354mm$ $d_s = 25mm$ (Anexo 3) $(d = h_{pl} - d_s = 35mm)$ $f'_c = 25MPa$ ($\beta_1 = 0.85$) $\gamma_{sD} = 1.2$ $k_{bal} = 0.003/(f_{pu}/E_p - 0.004)$							
DATOS DE LA PRELOSA						CANTIDAD DE PUNTALES							
HORMIGÓN			ACERO		CARGA	$f_{pu} = 1\,770MPa$ $(k_{bal} = 0.619)$				$f_{pu} = 1\,860MPa$ $(k_{bal} = 0.566)$			
h_c (mm)	h_t (mm)	d (mm)	TIPOL.	A_p (mm ²)	D_{E1} (N/mm)	LONG. PRELOSA (l_{pl})				LONG. PRELOSA (l_{pl})			
						3.00m	3.50m	4.00m	4.50m	3.00m	3.50m	4.00m	4.50m
20	80	35	T-3 ³	21.21	1.35 (Tabla 3.18)	1	1	1	1	1	1	1	1
			T-5 ³	58.89			1	1	1		1	1	1
			T-3 ⁵	35.35		1	1	1	1	1	1	1	1
			T-5 ⁵	98.15			1	1	1		1	1	1
			T-3 ² :5 ¹	33.77		1	1	1	1	1	1	1	1
			T-3 ¹ :5 ²	46.33			1	1	1		1	1	1
			T-3 ³ :5 ²	60.47			1	1	1		1	1	1
			T-3 ² :5 ³	73.03			1	1	1		1	1	1
30	90		T-3 ³	21.21	1.47 Tabla 3.18)	1	1	1	1	1	1	1	1
			T-5 ³	58.89		1	1	1	1	1	1	1	
			T-3 ⁵	35.35		1	1	1	1	1	1	1	
			T-5 ⁵	98.15			1	1	1		1	1	1
			T-3 ² :5 ¹	33.77		1	1	1	1	1	1	1	
			T-3 ¹ :5 ²	46.33		1	1	1	1		1	1	1
			T-3 ³ :5 ²	60.47		1	1	1	1		1	1	1
			T-3 ² :5 ³	73.03			1	1	1		1	1	1
40	100		T-3 ³	21.21	1.59 (Tabla 3.18)	1	1	1	1	1	1	1	1
			T-5 ³	58.89		1	1	1	1	1	1	1	1
			T-3 ⁵	35.35		1	1	1	1	1	1	1	1
			T-5 ⁵	98.15			1	1	1		1	1	1
			T-3 ² :5 ¹	33.77		1	1	1	1	1	1	1	1
			T-3 ¹ :5 ²	46.33		1	1	1	1	1	1	1	1
			T-3 ³ :5 ²	60.47		1	1	1	1	1	1	1	1
			T-3 ² :5 ³	73.03			1	1	1		1	1	1

El Rol de la Prefabricación Abierta y el Pretensado y su potencial dentro del Sector de la Vivienda Social.
Una Propuesta para la solución del Sistema Estructural Horizontal de la Vivienda

Tabla 3.23 Cantidad de puntales que requiere la Tipología de losa **PPCC: 6/60:35** durante el vaciado de la carpeta

DATOS: $h_{pl} = 65mm$ (Tabla 3.19) $b_{virtual} = 364mm$ $d_s = 25.4mm$ (Anexo 3) $(d = h_{pl} - d_s = 39.6mm)$ $f'_c = 25MPa$ ($\beta_1 = 0.85$) $\gamma_{SD} = 1.2$ $k_{bal} = 0.003/(f_{pu}/E_p - 0.004)$													
DATOS DE LA PRELOSA						CANTIDAD DE PUNTALES							
HORMIGÓN			ACERO		CARGA	$f_{pu} = 1\,770MPa$ $(k_{bal} = 0.619)$				$f_{pu} = 1\,860MPa$ $(k_{bal} = 0.566)$			
h_c (mm)	h_t (mm)	d (mm)	TIPOL.	A_p (mm ²)	D_{E1} (N/mm)	LONG. PRELOSA (l_{pl})				LONG. PRELOSA (l_{pl})			
						3.00m	3.50m	4.00m	4.50m	3.00m	3.50m	4.00m	4.50m
20	85	39.6	T-3 ³	21.21	1.41 (Tabla 3.18)	1	1	1	1	1	1	1	1
			T-5 ³	58.89				1	1			1	1
			T-3 ⁵	35.35		1	1	1	1		1	1	1
			T-5 ⁵	98.15				1	1			1	1
			T-3 ² :5 ¹	33.77		1	1	1	1	1	1	1	1
			T-3 ¹ :5 ²	46.33			1	1	1		1	1	1
			T-3 ³ :5 ²	60.47				1	1			1	1
			T-3 ² :5 ³	73.03				1	1			1	1
30	95		T-3 ³	21.21	1.53 (Tabla 3.18)	1	1	1	1	1	1	1	1
			T-5 ³	58.89			1	1	1			1	1
			T-3 ⁵	35.35		1	1	1	1	1	1	1	1
			T-5 ⁵	98.15				1	1			1	1
			T-3 ² :5 ¹	33.77		1	1	1	1	1	1	1	1
			T-3 ¹ :5 ²	46.33			1	1	1		1	1	1
			T-3 ³ :5 ²	60.47			1	1	1			1	1
			T-3 ² :5 ³	73.03			1	1	1		1	1	1
40	105		T-3 ³	21.21	1.65 (Tabla 3.18)	1	1	1	1	1	1	1	1
			T-5 ³	58.89			1	1	1		1	1	1
			T-3 ⁵	35.35		1	1	1	1	1	1	1	1
			T-5 ⁵	98.15				1	1			1	1
			T-3 ² :5 ¹	33.77		1	1	1	1	1	1	1	1
			T-3 ¹ :5 ²	46.33			1	1	1		1	1	1
			T-3 ³ :5 ²	60.47			1	1	1		1	1	1
			T-3 ² :5 ³	73.03			1	1	1		1	1	1

El Rol de la Prefabricación Abierta y el Pretensado y su potencial dentro del Sector de la Vivienda Social.
Una Propuesta para la solución del Sistema Estructural Horizontal de la Vivienda

Tabla 3.24 Cantidad de puntales que requiere la Tipología de losa **PPCC: 6/60:40** durante el vaciado de la carpeta

DATOS: $h_{pl} = 70mm$ (Tabla 3.19) $b_{virtual} = 374mm$ $d_s = 27.7mm$ (Anexo 3) $(d = h_{pl} - d_s = 42.3mm)$ $f'_c = 25MPa$ ($\beta_1 = 0.85$) $\gamma_{sD} = 1.2$ $k_{bal} = 0.003/(f_{pu}/E_p - 0.004)$													
DATOS DE LA PRELOSA						CANTIDAD DE PUNTALES							
HORMIGÓN			ACERO		CARGA	$f_{pu} = 1\,770MPa$ $(k_{bal} = 0.619)$				$f_{pu} = 1\,860MPa$ $(k_{bal} = 0.566)$			
h_c (mm)	h_t (mm)	d (mm)	TIPOL.	A_p (mm ²)	D_{E1} (N/mm)	LONG. PRELOSA (l_{pl})				LONG. PRELOSA (l_{pl})			
						3.00m	3.50m	4.00m	4.50m	3.00m	3.50m	4.00m	4.50m
20	85	42.3	T-3 ³	21.21	1.47 (Tabla 3.18)	1	1	1	1	1	1	1	1
			T-5 ³	58.89				1	1			1	1
			T-3 ⁵	35.35			1	1	1		1	1	1
			T-5 ⁵	98.15				1	1				1
			T-3 ² :5 ¹	33.77		1	1	1	1		1	1	1
			T-3 ¹ :5 ²	46.33			1	1	1		1	1	1
			T-3 ³ :5 ²	60.47				1	1			1	1
			T-3 ² :5 ³	73.03				1	1			1	1
30	95		T-3 ³	21.21	1.59 Tabla 3.18)	1	1	1	1	1	1	1	1
			T-5 ³	58.89				1	1			1	1
			T-3 ⁵	35.35		1	1	1	1	1	1	1	1
			T-5 ⁵	98.15				1	1			1	1
			T-3 ² :5 ¹	33.77		1	1	1	1	1	1	1	1
			T-3 ¹ :5 ²	46.33			1	1	1		1	1	1
			T-3 ³ :5 ²	60.47				1	1			1	1
			T-3 ² :5 ³	73.03			1	1	1			1	1
40	105		T-3 ³	21.21	1.71 (Tabla 3.18)	1	1	1	1	1	1	1	1
			T-5 ³	58.89			1	1	1		1	1	1
			T-3 ⁵	35.35		1	1	1	1	1	1	1	1
			T-5 ⁵	98.15				1	1			1	1
			T-3 ² :5 ¹	33.77		1	1	1	1	1	1	1	1
			T-3 ¹ :5 ²	46.33			1	1	1		1	1	1
			T-3 ³ :5 ²	60.47			1	1	1			1	1
			T-3 ² :5 ³	73.03			1	1	1		1	1	1

El Rol de la Prefabricación Abierta y el Pretensado y su potencial dentro del Sector de la Vivienda Social.
Una Propuesta para la solución del Sistema Estructural Horizontal de la Vivienda

3.6.2 DETERMINACIÓN DE LA CANTIDAD DE PUNTALES PARA ASEGURAR EL ESTADO LÍMITE DE RESISTENCIA A CORTANTE

BASE DE CÁLCULO: $V_u \leq \phi V_n$ Siendo $\phi = 0.75$

$$V_u = \zeta q l_{pl} = \zeta (\gamma_{SD} \cdot D_{E1}) l_{pl}$$

$$V_n = 0.17 \sqrt{f'_c} (b_{virtual}) d \quad (\text{Despreciando el efecto favorable de las compresiones provocadas por el pretensado})$$

Entonces, para cada caso de apuntalamiento, definido por el coeficiente (ζ), se debe cumplir que:

$$\zeta (\gamma_{SD} \cdot D_{E1}) l_{pl} \leq 0.75 V_n \Rightarrow \zeta \leq 0.1275 \frac{(b_{virtual}) d \sqrt{f'_c}}{(\gamma_{SD} \cdot D_{E1}) l_{pl}}$$

Tabla 3.25 Coeficiente para evaluar el Cortante Elástico máximo que tiene lugar durante el apuntalamiento de la carpeta

ETAPA	VARIANTE DE APUNTALAMIENTO	SEPARACIÓN ENTRE PUNTALES	V_{max}	ζ
VACIADO CARPETA	SIN PUNTAL	l_{pl}	$V_{max} = \zeta (D_{E1}) l_{pl}$	1/2
	UN PUNTAL	$l_{pl}/2$		3/8
	DOS PUNTALES	$l_{pl}/3$		2/5

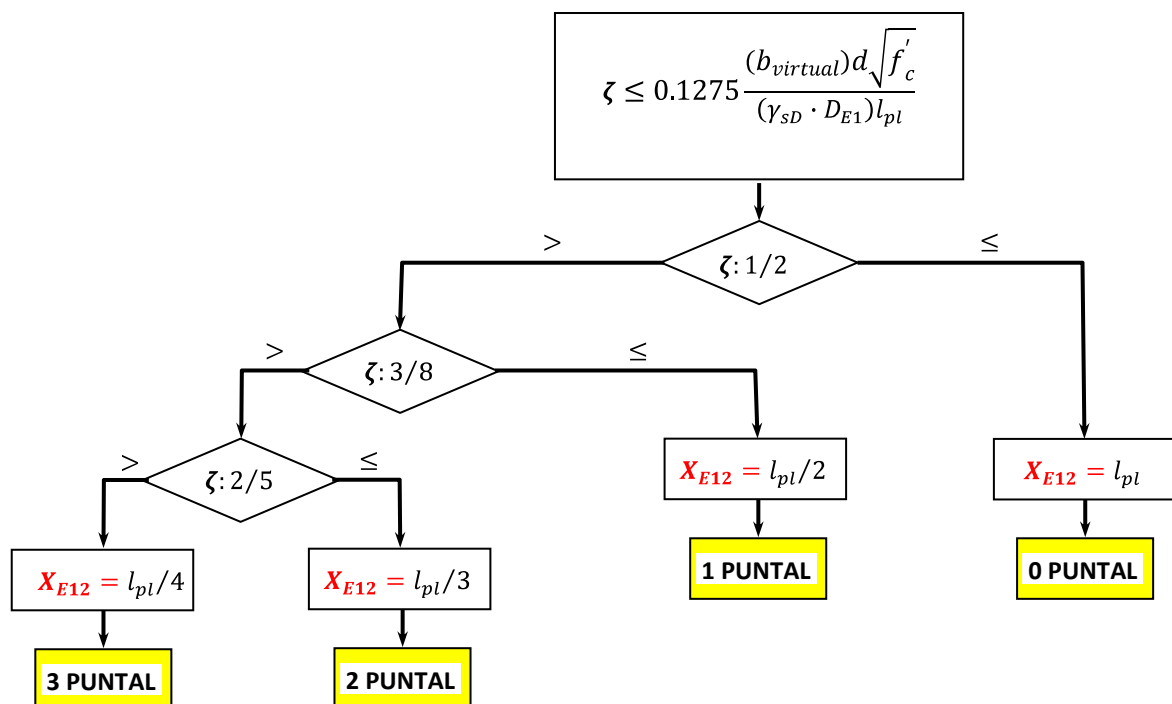


Fig. 3.16 Procedimiento para determinar la separación entre puntales que satisfaga El E.LU de resistencia a Cortante durante el vaciado de la carpeta

Para el Estado Límite de Cortante los cálculos confirman que ninguna tipología de losa requiere apuntalamiento. Sea, por ejemplo, la verificación del caso más desfavorable referido a:

- ☞ Losa de menor sección transversal (PPCC: 6/60:30 $\Rightarrow b_{virtual} = 354mm ; d = 35mm$)
- ☞ Longitud máxima: ($l_{pl} = 4.50m$)
- ☞ Carpeta de mayor espesor ($h_c = 40mm \Rightarrow D_{e1} = 1.59 N/mm$)

$$V_u = \zeta(\gamma_{SD} \cdot D_{E1})l_{pl} = \frac{1}{2}(1.2)(1.59 N/mm)(4500mm) = 4\,293N$$

$$V_n = 0.17\sqrt{f'_c}(b_{virtual})d = 0.17\sqrt{25MPa}(354mm)(35mm) = 10\,532N$$

Se comprueba que sin la necesidad de recurrir a puntales ($\zeta = 1/2$) se satisface la condición para el Estado Límite de Cortante, o sea, $V_u < 0.75V_n$. En efecto: **4 293N << 7 899N**.

CONCLUSIÓN: El cumplimiento de la base de cálculo del Estado Límite de Resistencia a Cortante durante el vaciado de la carpeta no exige apuntalamiento de la prelosa.

3.6.3 DETERMINACIÓN DE LA CANTIDAD DE PUNTALES PARA ASEGURAR EL CUMPLIMIENTO DE LAS TENSIONES NORMALES

Considerar la sección resistente que se describe en §3.5.2 para esta etapa, simplifica notoriamente el análisis por el carácter simétrico de la sección rectangular. Si además se comprende la objetividad de revisar las tensiones normales que se originan a nivel de sus fibras extremas sólo para el momento flector máximo, el procedimiento se simplifica aún más y responde entonces al esquema que se ilustra en la Figura 3.17, a partir de las siguientes definiciones:

FIBRA SUPERIOR: $f_{cs} = \frac{P_e}{A_{pl}} + \frac{P_e \cdot e_o}{W_{E1}} + \frac{M_{DE1}}{W_{E1}}$

FIBRA INFERIOR: $f_{ci} = \frac{P_e}{A_{pl}} - \frac{P_e \cdot e_o}{W_{E1}} - \frac{M_{DE1}}{W_{E1}}$

Siendo:

$$M_{DE1} = \lambda(D_{E1})l_{pl}^2$$

$$P_e = 0.65f_{pu}A_p$$

$$e_o = v'_{E1} - d_s$$

Máxima Tracción: $[f_t] = -0.5\sqrt{f'_c} = -0.5\sqrt{25MPa} = -2.5MPa$

Máxima Compresión: $[f_c] = 0.45f'_c = 0.45(25MPa) = 11.25MPa$

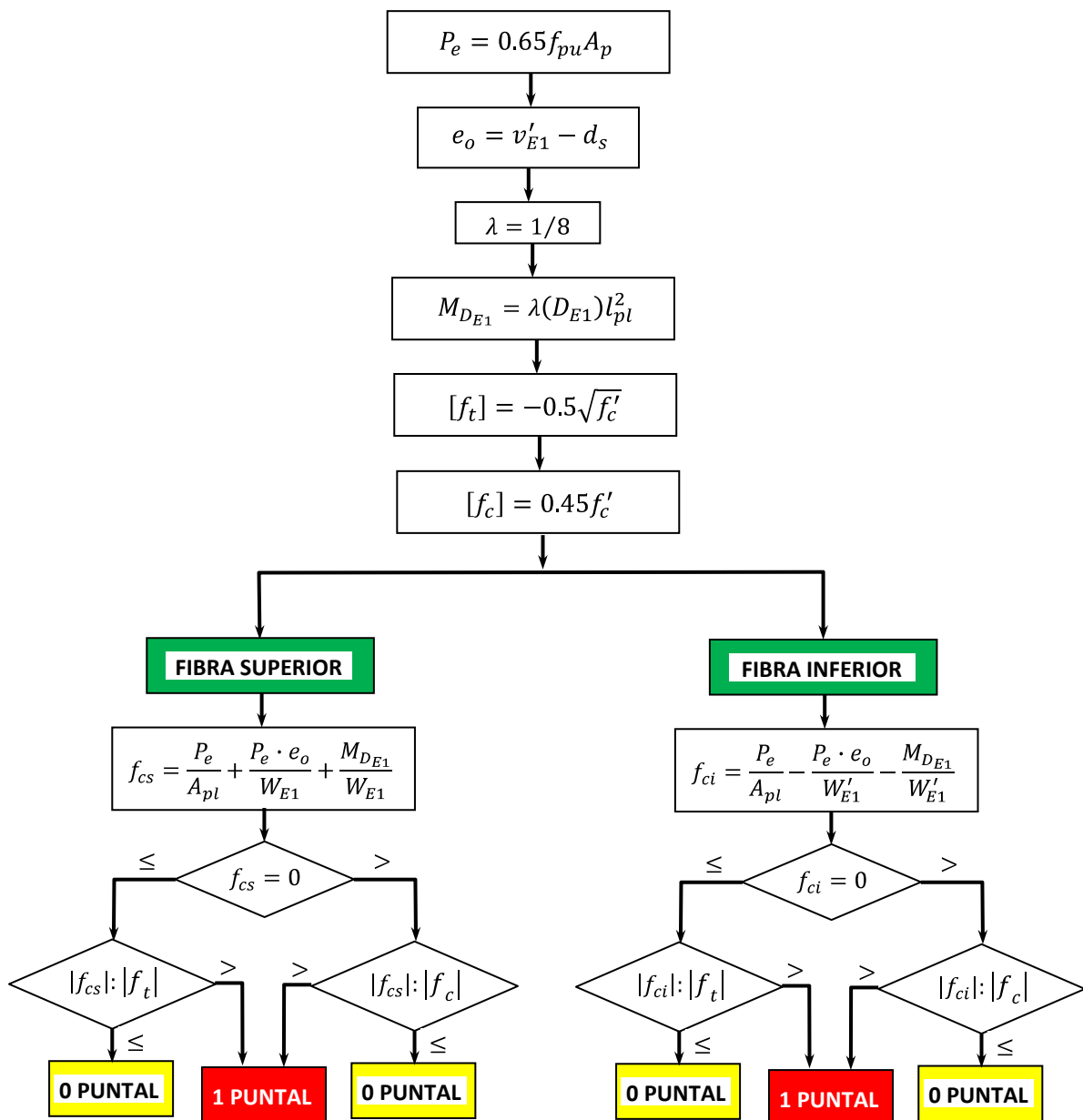


Fig. 3.17 Procedimiento para determinar la separación entre puntales que satisfaga el cumplimiento de las tensiones normales durante el vaciado de la carpeta

En la **Tabla 3.26** se resumen los resultados de la evaluación de las tensiones normales a nivel de las fibras extremas de la sección durante el vaciado de la carpeta. Los cálculos confirman que a pesar de haberse considerado las condiciones más adversas de trabajo (mayor longitud de la prelosa, acero de menor resistencia y por tanto menores precompresiones del pretensado, y el elemento trabajando en toda su longitud, es decir, sin recurrir a al apuntalamiento de la pieza), todas las tensiones que tienen lugar son de compresión, como reflejo del pretensado “cuasi” centrado que corresponde a esta etapa, y más aún, la mayor de las tensiones es del orden de la mitad de la tensión límite que puede admitirse: $(f_{c,max} < [f_c] ; 6.09MPa < 11.25MPa)$.

Tabla 3.26 Evaluación de las tensiones normales a nivel de las fibras extremas de la sección durante la etapa de vaciado de la carpeta

SIN PUNTAL ($M_{D_{E1}} = D_{E1}l_{pl}^2/8$) ; $l_{pl} = 4500mm$; $P_u = 1\ 770MPa$												
TENSIONES LÍMITES: $[f_t] = -2.5MPa$ (TRACCIÓN) $[f_c] = 11.25MPa$ (COMPRESIÓN)				PPCC: 6/60:30 $e_o = 5mm$ $W_{E1} = -W'_{E1} = 6\ 372\ 000mm^3$			PPCC: 6/60:35 $e_o = 7.1mm$ $W_{E1} = -W'_{E1} = 8\ 330\ 292mm^3$			PPCC: 6/60:40 $e_o = 7.3mm$ $W_{E1} = -W'_{E1} = 10\ 690\ 167mm^3$		
TIPOL.	A_p (mm^2)	P_e (N)	h_c (mm)	$M_{D_{E1}}$ ($N.mm$)	TENSIONES FIBRA		$M_{D_{E1}}$ ($N.mm$)	TENSIONES FIBRA		$M_{D_{E1}}$ ($N.mm$)	TENSIONES FIBRA	
					SUPERIOR	INFERIOR		SUPERIOR	INFERIOR		SUPERIOR	INFERIOR
					f_{cs} (N/mm^2)	f_{ci} (N/mm^2)		f_{cs} (N/mm^2)	f_{ci} (N/mm^2)		f_{cs} (N/mm^2)	f_{ci} (N/mm^2)
T-3 ³	21.21	24 402	20	3 417 188	1,71	0,59	3 569 063	1,73	0,57	3 720 938	1,75	0,55
T-5 ³	58.89	67 753			3,78	2,60		3,81	2,58		3,83	2,56
T-3 ⁵	35.35	40 670			2,48	1,35		2,51	1,32		2,53	1,30
T-5 ⁵	98.15	112 922			5,95	4,70		5,97	4,67		5,99	4,65
T-3 ² :5 ¹	33.77	38 852			2,40	1,26		2,42	1,24		2,45	1,22
T-3 ¹ :5 ²	46.33	53 303			3,09	1,93		3,11	1,91		3,14	1,89
T-3 ³ :5 ²	60.47	69 571			3,87	2,69		3,89	2,66		3,92	2,64
T-3 ² :5 ³	73.03	84 021			4,56	3,36		4,59	3,33		4,61	3,31
T-3 ³	21.21	24 402	30	3 720 938	1,75	0,55	3 872 813	1,78	0,52	4 024 688	1,80	0,50
T-5 ³	58.89	67 753			3,83	2,56		3,85	2,53		3,88	2,51
T-3 ⁵	35.35	40 670			2,53	1,30		2,56	1,28		2,58	1,25
T-5 ⁵	98.15	112 922			5,99	4,65		6,02	4,63		6,04	4,60
T-3 ² :5 ¹	33.77	38 852			2,45	1,22		2,47	1,19		2,49	1,17
T-3 ¹ :5 ²	46.33	53 303			3,14	1,89		3,16	1,86		3,19	1,84
T-3 ³ :5 ²	60.47	69 571			3,92	2,64		3,94	2,62		3,97	2,59
T-3 ² :5 ³	73.03	84 021			4,61	3,31		4,63	3,29		4,66	3,26
T-3 ³	21.21	24 402	40	4 024 688	1,80	0,50	4 176 563	1,82	0,48	4 328 438	1,85	0,45
T-5 ³	58.89	67 753			3,88	2,51		3,90	2,48		3,93	2,46
T-3 ⁵	35.35	40 670			2,58	1,25		2,60	1,23		2,63	1,21
T-5 ⁵	98.15	112 922			6,04	4,60		6,07	4,58		6,09	4,55
T-3 ² :5 ¹	33.77	38 852			2,49	1,17		2,52	1,15		2,54	1,12
T-3 ¹ :5 ²	46.33	53 303			3,19	1,84		3,21	1,81		3,23	1,79
T-3 ³ :5 ²	60.47	69 571			3,97	2,59		3,99	2,57		4,01	2,54
T-3 ² :5 ³	73.03	84 021			4,66	3,26		4,68	3,24		4,71	3,21

CONCLUSIÓN: El cumplimiento de las tensiones normales durante el vaciado de la carpeta no exige apuntalamiento de la prelosa.

3.6.4 DETERMINACIÓN DE LA CANTIDAD DE PUNTALES PARA ASEGURAR EL CUMPLIMIENTO DE LA FLECHA

La comprobación del Estado Límite de Deformación consiste en verificar el cumplimiento de la siguiente condición:

$$\delta_{max} \leq \Delta_{adm}$$

Siendo:

δ_{max} : Flecha máxima, normal al eje de la pieza, originada por la carga característica D_{E1} .
Depende de las condiciones de trabajo de la pieza (con o sin apuntalamiento)

Δ_{adm} : Flecha admisible que establece el Reglamento de Cálculo Estructural con el que se trabaje. Aquí se adoptan los valores límites que se muestran en la **Tabla 3.27**.

Tabla 3.27 Límites impuestos a la deformación (flecha) máxima que se admite¹¹.

TIPO DE ELEMENTO	DEFLEXIÓN CONSIDERADA	LÍMITE DE DEFLEXIÓN
Cubiertas planas que no soporten ni estén ligadas a elementos no estructurales susceptibles de sufrir daños debido a deflexiones grandes	Deflexión inmediata debida a la carga viva L	$\Delta_{adm} = l/180$
Entrepisos que no soporten ni estén ligados a elementos no estructurales susceptibles de sufrir daños debido a deflexiones grandes	Deflexión inmediata debida a la carga viva L	$\Delta_{adm} = l/360$
Sistemas de Entrepisos o Cubiertas que soporten o estén ligados a elementos no estructurales susceptibles de sufrir daños debido a deflexiones grandes	La parte de la deflexión total que ocurre después de la unión de los elementos no estructurales (la suma de la deflexión a largo plazo debida a todas las cargas permanentes, y la deflexión inmediata debida a cualquier carga adicional)	$\Delta_{adm} = l/480$
Sistemas de Entrepisos o Cubiertas que soporten o estén ligados a elementos no susceptibles de sufrir daños debido a deflexiones grandes		$\Delta_{adm} = l/240$

Dentro de esta etapa, correspondiente al vaciado de la carpeta, se adoptará el valor:

$$\Delta_{adm} = l/240$$

Mientras tanto, para evaluar la flecha originada por la carga característica D_{E1} se considera la siguiente expresión general:

$$\delta_{max} = K \frac{5M_a(l)^2}{48(E_c I)}$$

¹¹ Tomado del ACI 305: 2008. Capítulo 9. Pág. 121

Siendo:

M_a : Momento en el centro del tramo

l : Luz del tramo. Si no se requiere apuntalamiento $l = l_{pl}$. Si se requieren puntales, por ejemplo n , entonces $l = l_{pl}/(n + 1)$

I : Inercia de la sección resistente (depende de si la sección es o no fisurada)

$E_c = 4700\sqrt{f'_c}$ Módulo de deformación del hormigón de la prelosa

K : Coeficiente que toma en cuenta las condiciones de apoyo del elemento. (Ver **Tabla 3.28**)

Tabla 3.28 Valor de K para evaluar la flecha.

CONDICIONES DE APOYO	K
Elemento simplemente apoyado	1.0
Elemento continuo de dos o más luces	$1.2 - 0.2 \frac{M_o}{M_a}$
$M_o = ql^2/8$ M_a : Momento flector en el centro del vano que se analiza	

A partir de la definición general del parámetro K ofrecida en la **Tabla 3.28**, y conociendo que para esta etapa correspondiente al vaciado de la carpeta la carga que actúa es D_{E1} , su adecuación al caso de estudio conduce a los resultados indicados en la **Tabla 3.29**.

Tabla 3.29 Expresión de la flecha máxima δ_{max} para las condiciones de apuntalamiento que pueden tener lugar.

CANT. DE PUNTALES	n	l	M_a	K	δ_{max}
1	0	l_{pl}	$\frac{1}{8} [D_{E1}(l_{pl})^2]$	1.00	$\frac{5}{384} \left[\frac{D_{E1}(l_{pl})^4}{E_c I} \right]$
2	1	$l_{pl}/2$	$\frac{1}{64} [D_{E1}(l_{pl})^2]$	0.80	$\frac{1}{3\,072} \left[\frac{D_{E1}(l_{pl})^4}{E_c I} \right]$
3	2	$l_{pl}/3$	$\frac{1}{120} [D_{E1}(l_{pl})^2]$	0.867	$\frac{4.33}{51\,840} \left[\frac{D_{E1}(l_{pl})^4}{E_c I} \right]$

En las expresiones de δ_{max} que se indican en la **Tabla 3.29**, la inercia a sustituir se selecciona a partir de los criterios que se enuncian en el **Artículo 9.5.4.2** del ACI:

- Para elementos a flexión las deflexiones inmediatas deben ser calculadas por los métodos o fórmulas usuales para deflexiones elásticas, y se permite utilizar el momento de inercia de la sección total de hormigón....para elementos Clase U.....(**Artículo 9.5.4.1**)

- Para los elementos en flexión Clase C y Clase T, los cálculos de deflexión deben basarse en un análisis de la sección agrietada transformada. Se permite que los cálculos se basen en un momento efectivo de inercia I_e , como se lo define la ecuación (9-8)(Artículo 9.5.4.2)

Al verificarse en el epígrafe **§3.6.3** que para la etapa de carga que corresponde al vaciado de la carpeta, la sección de la prelosa se encuentra en todos los casos sometida a esfuerzos de compresión, se puede considerar un pretensado **Clase U** (Uncrack o No Fisurado), y en consecuencia la rigidez a adoptar es precisamente la rigidez no fisurada, o sea:

$$E_c \cdot I = E_c \cdot I_{E1} = (4700\sqrt{f'_c}) \cdot I_{E1}$$

¿Qué sucede en la prelosa **PPCC: 6/60:30** cuando se analiza la mayor longitud ($l_{pl} = 4500mm$), la carpeta que se vacía sobre ella es la de mayor espesor ($D_{E1} = 1.59 N/mm$), y se decide no emplear puntales durante el vaciado?

Considerando que toda la carga actuante es de acción breve (a escasa horas el hormigón vaciado comienza a endurecer), y despreciando la contraflecha que pudiera originar el pretensado (lo que resulta conservador), tratándose de un elemento simplemente apoyado sometido a una carga uniformemente distribuida, la **flecha máxima instantánea** que tiene lugar (δ_{max}) se origina en el centro de su longitud y su magnitud se evalúa mediante la expresión:

$$\delta_{max} = \frac{5}{384} \left[\frac{D_{E1}(l_{pl})^4}{E_c I} \right] = \frac{5}{384} \frac{(1.59 N/mm)(4500mm)^4}{(4700\sqrt{25MPa})(6372000mm^4)} = 56.7mm$$

Mientras que la flecha máxima que se admite es:

$$\Delta_{adm} = \frac{l}{240} = \frac{4500mm}{240} = 18.9mm$$

Este resultado ($\delta_{max} > \Delta_{adm}$) confirma la necesidad de que, para estas condiciones (prelosa de menor rigidez, mayor carga actuante y mayor luz de trabajo), la prelosa debe ser apuntalada. A continuación se comprueba si un solo puntal es suficiente:

$$\delta_{max} = \frac{1}{3072} \left[\frac{D_{E1}(l_{pl})^4}{E_c I} \right] = \frac{1}{3072} \frac{(1.59 N/mm)(4500mm)^4}{(4700\sqrt{25MPa})(6372000mm^4)} = 1.41mm$$

O sea, un solo puntal ubicado a la mitad de la luz es suficiente para reducir significativamente la deformación y aceptar esta posibilidad ($1.41mm \ll 18.9mm$).

Como estos últimos cálculos se refieren a la más desfavorable de las situaciones para esta comprobación (prelosa de menor sección resistente, sometida a la máxima carga y considerando su mayor longitud), se puede cerrar el análisis de la etapa durante la cual se vacía la carpeta, mediante la siguiente

CONCLUSIÓN:

Habiendo definido que durante el vaciado de la carpeta para garantizar:

- a) El **Estado Límite de Resistencia a Cortante (§3.6.2)** no se requiere apuntalamiento,
- b) El **Estado Límite de Servicio asociado a las Tensiones Normales (§3.6.3)** tampoco requiere apuntalamiento,
- c) El **Estado Límite de Servicio asociado a la Deformación (§3.6.4)** requiere para la situación más desfavorable que se analizó sólo un puntal,
- d) El **Estado Límite de Resistencia a Flexión (§3.6.1)** requiere el apuntalamiento que se define en las **Tablas 3.22, 3.23 y 3.24**, para todas las variantes que se investiga, y que en ningún caso va más allá de un puntal,

Entonces, el apuntalamiento de la prelosa durante la construcción de la carpeta se decide, precisamente, a partir de dichas Tablas (**3.22, 3.23 y 3.24**)

3.7 ANÁLISIS DE LA ETAPA DE EXPLOTACIÓN. CÁLCULO DE LA SOBRECARGA MÁXIMA

Se trata ahora de evaluar la máxima sobrecarga L_{E2} que puede soportar la losa por unidad de superficie, cuando sea empleada como entrepiso o cubierta. Esta sobrecarga es adicional a la carga impuesta de carácter permanente (D_{E2}) que se estimara en el epígrafe §3.5.3.

PREMISAS:

- El modelo procura determinar una carga total q y a partir de ella deducir la magnitud de la sobrecarga adicional L_{E2} , de carácter temporal, que puede actuar sobre la losa.
- La carga muerta impuesta que se considera para esta etapa por unidad de longitud, (D_{E2}), corresponde a las que se resumen en la **Tabla 3.19**.
- Para los estados límites de servicio la sobrecarga adicional por unidad de longitud ($L_{E2(l)}$) se determina mediante la expresión:

$$L_{E2(l)} = q - D_{E2}.$$

- Para los estados límites de resistencia se adoptará el siguiente criterio de mayoración:

$$q_u = 1.2(D_{E2}) + 1.6(L_{E2(l)})$$

En consecuencia, se tiene:

$$L_{E2(l)} = \frac{1}{1.6} [q_u - 1.2(D_{E2})] \quad (\text{por unidad de longitud})$$

$$L_{E2} = \frac{L_{E2(l)}}{b} \quad (\text{por unidad de superficie})$$

- La sección resistente a considerar para garantizar tanto los Estados Límites de Servicio como de Resistencia, es de tipología rectangular a la que se incorpora la contribución de la carpeta para definir así una sección compuesta. Sus parámetros básicos se resumen en la **Tabla 3.20**.

El procedimiento que se sigue para determinar la magnitud de la sobrecarga impuesta que satisfaga las exigencias de cada uno de los Estados Límites, es sensiblemente similar al que se describiera en el epígrafe §3.6 para definir la cantidad de puntales que son necesarios durante el vaciado de la carpeta. En tal sentido se obviarán comentarios que ya fueron expuestos en aquel momento.

3.7.1 DETERMINACIÓN DE LA SOBRECARGA IMPUESTA PARA ASEGURAR EL ESTADO LÍMITE DE RESISTENCIA A FLEXIÓN

BASE DE CÁLCULO: $M_u \leq \phi M_n$

Siendo:

$$M_u = \frac{1}{8} q_u l_{pl}^2$$

$$M_n = (0.85 f'_c)(\beta_1 c)(b)(d - 0.5 \beta_1 c) \quad \text{con } b = 495 \text{ mm}$$

$$\frac{1}{8} q_u l_{pl}^2 \leq \phi M_n \Rightarrow q_u \leq \frac{8 \phi M_n}{l_{pl}^2}$$

El procedimiento secuencial para determinar la sobrecarga L_{E2} se explica en la **Figura 3.18**, mientras que en las **Tablas 3.30, 3.31 Y 3.32**, se indica la magnitud de la carga L_{E2} para cada variante de prelosa y espesor de carpeta que se investiga.

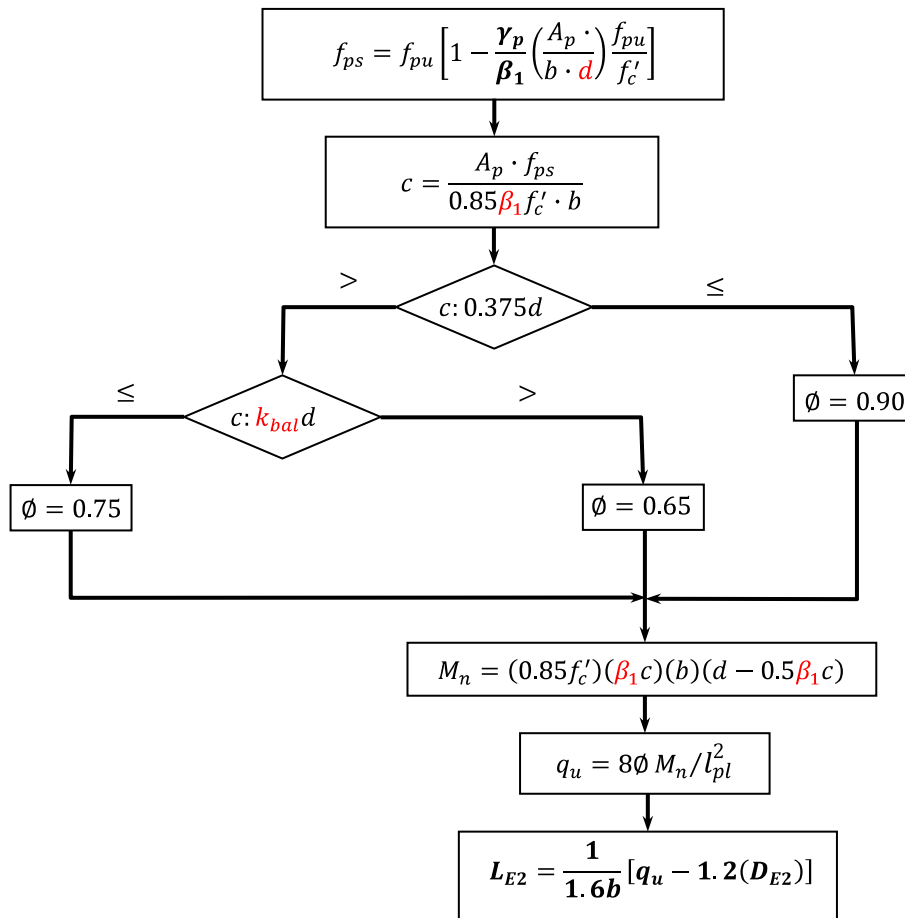


Fig. 3.18 Procedimiento para determinar la sobrecarga impuesta que satisfaga la condición de resistencia a flexión de la sección compuesta prelosa-carpeta.

Tabla 3.30 Sobrecarga impuesta que admite por Flexión la Tipología de losa **PPCC: 6/60:30** durante la explotación de la losa

DATOS: $h_{pl} = 60\text{mm}$ (Tabla 3.19) $b = 495\text{mm}$ $d_s = 25\text{mm}$ (Anexo 3) $(d = h_{pl} - d_s)$ $f'_c = 25\text{MPa}$ ($\beta_1 = 0.85$) $\gamma_{SD} = 1.2$ $k_{bal} = 0.003/(f_{pu}/E_p - 0.004)$													
DATOS DE LA PRELOSA						SOBRECARGA IMPUESTA MÁXIMA POR FLEXIÓN (L_{E2} : kN/m^2)							
HORMIGÓN			ACERO		CARGA	$f_{pu} = 1\,770\text{MPa}$ ($k_{bal} = 0.619$)				$f_{pu} = 1\,860\text{MPa}$ ($k_{bal} = 0.566$)			
h_c (mm)	h_t (mm)	d (mm)	TIPOL.	A_p (mm^2)	D_{E2} (N/mm)	LONG. PRELOSA (l_{pl})				LONG. PRELOSA (l_{pl})			
						3.00m	3.50m	4.00m	4.50m	3.00m	3.50m	4.00m	4.50m
20	80	55	T-3 ³	21.21	1.45 (Tabla 3.20)	-0,23	-0,75	-1,09	-1,32	-0,14	-0,68	-1,04	-1,28
			T-5 ³	58.89		2,73	1,42	0,57	-0,01	2,94	1,57	0,69	0,08
			T-3 ⁵	35.35		0,96	0,12	-0,42	-0,80	1,10	0,23	-0,34	-0,73
			T-5 ⁵	98.15		5,17	3,22	1,95	1,08	5,44	3,42	2,10	1,20
			T-3 ² :5 ¹	33.77		0,83	0,03	-0,49	-0,85	0,97	0,13	-0,42	-0,79
			T-3 ¹ :5 ²	46.33		1,81	0,75	0,06	-0,41	1,99	0,88	0,16	-0,34
			T-3 ³ :5 ²	60.47		2,84	1,50	0,63	0,04	3,05	1,66	0,75	0,13
			T-3 ² :5 ³	73.03		3,68	2,12	1,11	0,41	3,91	2,29	1,24	0,52
30	90	65	T-3 ³	21.21	1.57 (Tabla 3.20)	-0,03	-0,66	-1,06	-1,34	0,08	-0,57	-1,00	-1,29
			T-5 ³	58.89		3,59	2,00	0,98	0,27	3,85	2,20	1,12	0,39
			T-3 ⁵	35.35		1,40	0,40	-0,25	-0,70	1,58	0,53	-0,15	-0,62
			T-5 ⁵	98.15		6,70	4,29	2,73	1,66	7,05	4,55	2,93	1,81
			T-3 ² :5 ¹	33.77		1,25	0,29	-0,34	-0,77	1,42	0,41	-0,24	-0,69
			T-3 ¹ :5 ²	46.33		2,45	1,17	0,34	-0,23	2,67	1,33	0,46	-0,13
			T-3 ³ :5 ²	60.47		3,73	2,11	1,05	0,33	3,99	2,30	1,20	0,45
			T-3 ² :5 ³	73.03		4,78	2,88	1,65	0,80	5,08	3,10	1,82	0,94
40	100	75	T-3 ³	21.21	1.69 (Tabla 3.20)	0,16	-0,56	-1,03	-1,35	0,30	-0,46	-0,95	-1,29
			T-5 ³	58.89		4,45	2,59	1,38	0,56	4,76	2,82	1,56	0,69
			T-3 ⁵	35.35		1,85	0,68	-0,08	-0,60	2,06	0,83	0,04	-0,51
			T-5 ⁵	98.15		8,24	5,37	3,51	2,24	8,67	5,69	3,76	2,43
			T-3 ² :5 ¹	33.77		1,67	0,55	-0,18	-0,68	1,87	0,69	-0,07	-0,59
			T-3 ¹ :5 ²	46.33		3,10	1,60	0,62	-0,05	3,36	1,79	0,77	0,07
			T-3 ³ :5 ²	60.47		4,62	2,71	1,48	0,63	4,93	2,95	1,66	0,77
			T-3 ² :5 ³	73.03		5,89	3,65	2,19	1,20	6,25	3,91	2,40	1,36

Tabla 3.31 Sobrecarga impuesta que admite por Flexión la Tipología de losa **PPCC: 6/60:35** durante la explotación de la losa

DATOS: $h_{pl} = 65\text{mm}$ (Tabla 3.19) $b = 495\text{mm}$ $d_s = 25.4\text{mm}$ (Anexo 3) ($d = h_{pl} - d_s$) $f'_c = 25\text{MPa}$ ($\beta_1 = 0.85$) $\gamma_{SD} = 1.2$ $k_{bal} = 0.003/(f_{pu}/E_p - 0.004)$													
DATOS DE LA PRELOSA						SOBRECARGA IMPUESTA MÁXIMA POR FLEXIÓN (L_{E2} : kN/m^2)							
HORMIGÓN			ACERO		CARGA	$f_{pu} = 1\,770\text{MPa}$ ($k_{bal} = 0.619$)				$f_{pu} = 1\,860\text{MPa}$ ($k_{bal} = 0.566$)			
h_c (mm)	h_t (mm)	d (mm)	TIPOL.	A_p (mm^2)	D_{E2} (N/mm)	LONG. PRELOSA (l_{pl})				LONG. PRELOSA (l_{pl})			
						3.00m	3.50m	4.00m	4.50m	3.00m	3.50m	4.00m	4.50m
20	85	59.6	T-3 ³	21.21	1.51 (Tabla 3.20)	-0,15	-0,71	-1,08	-1,34	-0,04	-0,64	-1,03	-1,29
			T-5 ³	58.89		3,12	1,68	0,75	0,11	3,35	1,85	0,88	0,22
			T-3 ⁵	35.35		1,16	0,24	-0,35	-0,76	1,31	0,36	-0,26	-0,69
			T-5 ⁵	98.15		5,87	3,70	2,30	1,34	6,17	3,93	2,47	1,47
			T-3 ² :5 ¹	33.77		1,01	0,14	-0,43	-0,82	1,17	0,25	-0,34	-0,75
			T-3 ¹ :5 ²	46.33		2,10	0,94	0,18	-0,34	2,30	1,08	0,29	-0,25
			T-3 ³ :5 ²	60.47		3,24	1,77	0,82	0,17	3,47	1,95	0,95	0,27
			T-3 ² :5 ³	73.03		4,18	2,46	1,35	0,59	4,44	2,66	1,50	0,70
30	95	69.6	T-3 ³	21.21	1.63 (Tabla 3.20)	0,05	-0,62	-1,05	-1,35	0,17	-0,53	-0,98	-1,30
			T-5 ³	58.89		3,98	2,27	1,16	0,40	4,26	2,48	1,32	0,52
			T-3 ⁵	35.35		1,60	0,52	-0,18	-0,66	1,79	0,66	-0,07	-0,57
			T-5 ⁵	98.15		7,40	4,78	3,08	1,92	7,79	5,07	3,30	2,09
			T-3 ² :5 ¹	33.77		1,43	0,40	-0,27	-0,73	1,62	0,53	-0,17	-0,65
			T-3 ¹ :5 ²	46.33		2,74	1,36	0,46	-0,15	2,98	1,53	0,60	-0,05
			T-3 ³ :5 ²	60.47		4,13	2,38	1,24	0,46	4,42	2,59	1,40	0,59
			T-3 ² :5 ³	73.03		5,28	3,23	1,89	0,98	5,61	3,47	2,08	1,12
40	105	79.6	T-3 ³	21.21	1.75 (Tabla 3.20)	0,25	-0,52	-1,02	-1,36	0,39	-0,42	-0,94	-1,30
			T-5 ³	58.89		4,84	2,85	1,56	0,68	5,18	3,10	1,75	0,83
			T-3 ⁵	35.35		2,05	0,80	-0,01	-0,56	2,27	0,97	0,12	-0,46
			T-5 ⁵	98.15		8,94	5,86	3,87	2,50	9,41	6,21	4,14	2,71
			T-3 ² :5 ¹	33.77		1,86	0,66	-0,12	-0,65	2,07	0,82	0,00	-0,55
			T-3 ¹ :5 ²	46.33		3,39	1,78	0,74	0,03	3,66	1,99	0,90	0,16
			T-3 ³ :5 ²	60.47		5,02	2,98	1,66	0,76	5,36	3,24	1,86	0,91
			T-3 ² :5 ³	73.03		6,39	3,99	2,44	1,37	6,79	4,28	2,66	1,54

Tabla 3.32 Sobrecarga impuesta que admite por Flexión la Tipología de losa **PPCC: 6/60:40** durante la explotación de la losa

DATOS: $h_{pl} = 70\text{mm}$ (Tabla 3.19) $b = 495\text{mm}$ $d_s = 27.7\text{mm}$ (Anexo 3) $(d = h_{pl} - d_s)$ $f'_c = 25\text{MPa}$ ($\beta_1 = 0.85$) $\gamma_{SD} = 1.2$ $k_{bal} = 0.003/(f_{pu}/E_p - 0.004)$													
DATOS DE LA PRELOSA						SOBRECARGA IMPUESTA MÁXIMA POR FLEXIÓN (L_{E2} : kN/m^2)							
HORMIGÓN			ACERO		CARGA	$f_{pu} = 1\,770\text{MPa}$ ($k_{bal} = 0.619$)				$f_{pu} = 1\,860\text{MPa}$ ($k_{bal} = 0.566$)			
h_c (mm)	h_t (mm)	d (mm)	TIPOL.	A_p (mm^2)	D_{E2} (N/mm)	LONG. PRELOSA (l_{pl})				LONG. PRELOSA (l_{pl})			
						3.00m	3.50m	4.00m	4.50m	3.00m	3.50m	4.00m	4.50m
20	90	62.3	T-3 ³	21.21	1.57 (Tabla 3.20)	-0,14	-0,73	-1,12	-1,38	-0,03	-0,65	-1,06	-1,33
			T-5 ³	58.89		3,31	1,80	0,82	0,15	3,55	1,98	0,96	0,26
			T-3 ⁵	35.35		1,23	0,28	-0,35	-0,77	1,40	0,40	-0,25	-0,70
			T-5 ⁵	98.15		6,24	3,95	2,47	1,45	6,57	4,19	2,65	1,60
			T-3 ² :5 ¹	33.77		1,09	0,17	-0,43	-0,84	1,25	0,29	-0,34	-0,77
			T-3 ¹ :5 ²	46.33		2,23	1,01	0,21	-0,33	2,44	1,16	0,33	-0,24
			T-3 ³ :5 ²	60.47		3,44	1,89	0,89	0,21	3,69	2,08	1,03	0,32
			T-3 ² :5 ³	73.03		4,43	2,63	1,45	0,65	4,72	2,83	1,61	0,77
30	100	72.3	T-3 ³	21.21	1.69 (Tabla 3.20)	0,06	-0,63	-1,09	-1,40	0,19	-0,54	-1,01	-1,34
			T-5 ³	58.89		4,17	2,38	1,22	0,43	4,47	2,60	1,39	0,56
			T-3 ⁵	35.35		1,68	0,56	-0,17	-0,67	1,88	0,70	-0,06	-0,59
			T-5 ⁵	98.15		7,77	5,03	3,25	2,03	8,18	5,33	3,48	2,21
			T-3 ² :5 ¹	33.77		1,51	0,43	-0,27	-0,75	1,70	0,57	-0,17	-0,67
			T-3 ¹ :5 ²	46.33		2,87	1,43	0,50	-0,15	3,12	1,61	0,64	-0,03
			T-3 ³ :5 ²	60.47		4,33	2,50	1,31	0,50	4,63	2,72	1,48	0,64
			T-3 ² :5 ³	73.03		5,54	3,39	2,00	1,04	5,89	3,65	2,19	1,19
40	110	82.3	T-3 ³	21.21	1.81 (Tabla 3.20)	0,26	-0,54	-1,05	-1,41	0,41	-0,43	-0,97	-1,34
			T-5 ³	58.89		5,03	2,97	1,63	0,71	5,38	3,23	1,83	0,87
			T-3 ⁵	35.35		2,13	0,84	0,00	-0,58	2,36	1,01	0,13	-0,47
			T-5 ⁵	98.15		9,31	6,12	4,04	2,62	9,81	6,48	4,32	2,84
			T-3 ² :5 ¹	33.77		1,93	0,69	-0,12	-0,67	2,15	0,85	0,01	-0,57
			T-3 ¹ :5 ²	46.33		3,52	1,86	0,78	0,04	3,81	2,07	0,94	0,17
			T-3 ³ :5 ²	60.47		5,22	3,11	1,74	0,80	5,58	3,37	1,94	0,95
			T-3 ² :5 ³	73.03		6,65	4,16	2,54	1,43	7,06	4,46	2,77	1,62

Conociendo que en las **Tablas 3.30, 3.31 y 3.32** las celdas en rojo corresponden a tipologías de prelosa y de refuerzo que no admiten ninguna sobrecarga de explotación (resultan valores de L_{E2} negativos), mientras que las verdes admiten sólo valores de sobrecarga por debajo de 1.5 kN/m^2 , poco usual especialmente en soluciones de entrepiso, se adopta la siguiente:

CONCLUSIÓN:

Eliminar las tipologías de refuerzo **T-3³**, **T-3⁵** y **T-3²:5¹** del surtido de elementos ya que la insuficiencia de refuerzo que presentan limita considerablemente las posibilidades de carga del elemento, aun en luces pequeñas. De esta forma se decide fabricar sólo las losas con las siguientes tipologías de refuerzo: **T-5³**, **T-5⁵**, **T-3¹:5²**, **T-3³:5²**, y **T-3²:5³**.

En total resultan 15 variantes diferentes cuyas capacidades de carga dependerán del espesor de la carpeta que se vacía “in situ”. Como el análisis se realizó para tres (3) espesores, se cuenta con 45 secciones resistentes diferentes cuya capacidad de carga, si es que este es el Estado Límite que predomina, se puede determinar mediante el empleo de las **Tablas 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, 5.6 y 5.7** que se incluyen en el **Capítulo 5**.

3.7.2 DETERMINACIÓN DE LA SOBRECARGA IMPUESTA PARA ASEGURAR EL ESTADO LÍMITE DE RESISTENCIA A CORTANTE

BASE DE CÁLCULO: $V_u \leq \phi V_n$ Siendo $\phi = 0.75$

$V_u = 0.5q_u l_{pl}$ (La prelosa es simplemente apoyada y la carga es uniforme)

$V_n = 0.17bd\sqrt{f'_c}$ (Despreciando el efecto favorable de las compresiones provocadas por el pretensado)

$$\therefore 0.5q_u l_{pl} = 0.75 \left[0.17bd\sqrt{f'_c} \right] \Rightarrow q_u = 0.255bd \frac{\sqrt{f'_c}}{l_{pl}}$$

$$L_{E2(l)} = \frac{1}{1.6} [q_u - 1.2(D_{E2})] \text{ (por unidad de longitud)}$$

$$L_{E2} = \frac{L_{E2(l)}}{b} \text{ (por unidad de superficie)}$$

Se observa que la sobrecarga máxima (L_{E2}) que garantiza el Estado Límite de Cortante es independiente de la Tipología de armado, sólo depende de las dimensiones de la sección resistente de la prelosa. Las **Tablas 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, 5.6 y 5.7** del **Capítulo 5** ofrecen la magnitud de esta carga.

3.7.3 DETERMINACIÓN DE LA SOBRECARGA IMPUESTA PARA ASEGURAR EL CUMPLIMIENTO DE LAS TENSIONES NORMALES

El procedimiento es análogo al que se describe en el epígrafe §3.6.3, solo que la modificación de la sección resistente que se adopta para esta etapa, exige un cambio en las propiedades mecánicas que deben ser consideradas en la expresión general de Navier que se emplea para evaluar las tensiones normales originadas tanto por la fuerza de pretensado, así como por la carga impuesta que corresponden a la etapa que se analiza.

El modelo analítico procura determinar la carga máxima de servicio que garantice el cumplimiento de las tensiones límites fijadas, lo mismo la de tracción que pudiera originarse en la fibra superior de la sección (q_{2t}), como la de máxima compresión a nivel de la fibra inferior (q_{2c}), debiéndose seleccionar de ambas la mayor.

TENSIONES ADMISIBLES

Máxima Tracción: $[f_t] \geq -0.5\sqrt{f'_c} = -0.5\sqrt{25MPa} = -2.5MPa$

Máxima Compresión: $[f_c] \leq 0.45f'_c = 0.45(25MPa) = 11.25MPa$

TENSIONES ORIGINADAS POR LA CARGAS

FIBRA SUPERIOR: $|f_{cs}| \leq \frac{P_e}{A_{E2}} - \frac{P_e \cdot e_o}{W_{E2}} + \frac{M_{DE2}}{W_{E2}}$

FIBRA INFERIOR: $f_{ci} \leq \frac{P_e}{A_{E2}} + \frac{P_e \cdot e_o}{W'_{E2}} - \frac{M_{DE2}}{W'_{E2}}$

Siendo:

$$A_{E2} = 495 \cdot h_t$$

$$M_{DE2} = 0.125(q_2)l_{pl}^2$$

$$P_e = 0.65f_{pu}A_p$$

$$e_o = v'_{E1} - d_s$$

$$-2.5MPa = \frac{P_e}{A_{E2}} - \frac{P_e \cdot e_o}{W_{E2}} + \frac{0.125(q_{2t})l_{pl}^2}{W_{E2}} \Rightarrow q_{2t} = \frac{8W_{E2}}{l_{pl}^2} \left(2.5MPa - \frac{P_e}{A_{E2}} + \frac{P_e \cdot e_o}{W_{E2}} \right)$$

$$11.25MPa = \frac{P_e}{A_{E2}} + \frac{P_e \cdot e_o}{W'_{E2}} - \frac{0.125(q_{2c})l_{pl}^2}{W'_{E2}} \Rightarrow q_{2c} = \frac{8W'_{E2}}{l_{pl}^2} \left(\frac{P_e}{A_{E2}} + \frac{P_e \cdot e_o}{W'_{E2}} - 11.25MPa \right)$$

Seleccionando la mayor de ambas cargas (q_{2t} ó q_{2c}) y denotándola por q_2 , la sobrecarga máxima que asegura este estado límite se evalúa mediante la expresión:

$$L_{E2} = [q_2 - D_{E2}]/b \quad (\text{por unidad de superficie})$$

Las **Tablas 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, 5.6 y 5.7** del **Capítulo 5** ofrecen la magnitud de esta carga para los tres espesores de carpeta.

3.7.4 DETERMINACIÓN DE LA SOBRECARGA IMPUESTA PARA ASEGURAR EL CUMPLIMIENTO DE LA FLECHA

CONDICIÓN PARA EL ESTADO LÍMITE DE DEFORMACIÓN: $\delta_{max} \leq \Delta_{adm}$

Se adoptará para esta etapa: $\Delta_{adm} = \frac{l}{200}$

Las analogías y diferencias fundamentales en el análisis de esta etapa respecto de la que ya fue analizada durante el vaciado de la carpeta, son las siguientes:

- a) La deformación total posee una componente elástica instantánea y otra deferida debido al carácter permanente de una parte importante de la carga actuante. Si se considera que el 40% de la carga viva es de carácter permanente (valor apropiado para el caso de viviendas), y se denota por **CP** a toda la carga permanente y por **CT** a la carga temporal, se tiene entonces:

$$\delta_{max} = \delta_{i(CP)} + \delta_{d(CP)} + \delta_{i(CT)} - K\delta_{i(P)}$$

$$\delta_{max} = \delta_{i(CP)} + \lambda\delta_{i(CP)} + \delta_{i(CT)} - K\delta_{i(P)}$$

$$\delta_{max} = (1 + \lambda)\delta_{i(CP)} + \delta_{i(CT)} - K\delta_{i(P)}$$

Siendo:

$\delta_{i(CP)}$: Flecha instantánea originada por la carga permanente **CP**

$\delta_{i(CT)}$: Flecha instantánea originada por la parte instantánea de la carga temporal **CT**

$\delta_{i(P)}$: Flecha instantánea originada por la fuerza inicial de pretensado

λ : Coeficiente que amplifica la flecha instantánea originada por la carga permanente **CP**. Se adoptará $\lambda = 1.5$

K : Coeficiente que amplifica la flecha instantánea originada por la fuerza inicial de pretensado P_i . Se adoptará $K = 2.5$

Entonces:

$$\delta_{max} = 2.5\delta_{i(CP)} + \delta_{i(CT)} - 2.5\delta_{i(P)}$$

Con

$$CP = D_{E2} + 0.4L_{E2}$$

$$P = 0.6L_{E2}$$

$$P_i = 0.75f_{pu}A_p$$

- b) Ya en servicio, a pesar del pretensado, las cargas pueden originar cierto nivel de fisuración del hormigón que degrada la rigidez de la pieza, sin embargo, la evaluación de las tensiones en esta etapa confirmó que en todos los casos la sección se encuentra comprimida, es decir, se trata de un pretensado Clase U, en consecuencia se estimará, conservadoramente, que la rigidez $E_c I_{h2}$ evaluada a partir de la Inercia de la sección homeginizada I_{h2} (transformación del área de acero en otra equivalente de hormigón), resulta de incrementar sólo en un 10% al valor de la rigidez elástica, adoptándose en los cálculos de la flecha una rigidez $K_2 = 1.1E_c I_{E2}$

$$\frac{l_{pl}}{200} = 2.5 \left[\frac{5}{384} \left(\frac{CT \cdot l_{pl}^4}{1.1E_c I_{E2}} \right) \right] + \frac{5}{384} \left(\frac{CT \cdot l_{pl}^4}{1.1E_c I_{E2}} \right) - 2.5 \left(\frac{P_i e_o}{8} \right) \cdot \frac{l_{pl}^2}{1.1E_c I_{E2}}$$

$$\frac{l_{pl}}{200} = 2.5 \left\{ \frac{5}{384} \left[(D_{E2} + 0.4L_{E2}) \frac{l_{pl}^4}{1.1E_c I_{E2}} \right] \right\} + \frac{5}{384} \left[(0.6L_{E2}) \frac{l_{pl}^4}{1.1E_c I_{E2}} \right] - 2.5 \left(\frac{P_i e_o}{8} \right) \cdot \frac{l_{pl}^2}{1.1E_c I_{E2}}$$

Siendo finalmente la sobrecarga impuesta L_{E2} por unidad de longitud:

$$L_{E2} = 0.264 \frac{E_c I_{E2}}{l_{pl}^3} - 1.56D_{E2} + 15 \frac{P_i e_o}{l_{pl}^2}$$

Mientras que por unidad de superficie:

$$L_{E2} = \frac{1}{b} \left[0.264 \frac{E_c I_{E2}}{l_{pl}^3} - 1.56D_{E2} + 15 \frac{P_i e_o}{l_{pl}^2} \right]$$

La evaluación de esta carga para cada tipología de losa y de refuerzo, así como de espesor de carpeta y longitud, se ilustra en las **Tablas 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, 5.6 y 5.7** del **Capítulo 5**.

3.8 TECNOLOGÍA DE PRODUCCIÓN DE LA PRELOSA

Se ha visto ya que la prelosa **PPCC** es un panel de hormigón pretensado de peralte constante, aligerado mediante huecos en el sentido longitudinal. Para la producción de estas tipologías de losas huecas pretensadas se utilizan a nivel mundial, fundamentalmente, dos técnicas: la primera mediante un proceso de extrusión del hormigón de mezcla seca que pasa a través de la propia máquina que lo va colocando sobre una bandeja o molde, a la vez que lo vibra y compacta, mientras la máquina se va desplazando por reacción. El segundo método recurre al empleo de moldes o tubos deslizantes y se fundamenta en el uso de un hormigón de consistencia blanda. Esta investigación propone el empleo de la primera de estas dos técnicas para producir la prelosa **PPCC**.

El elemento debe ser producido con un hormigón de calidad media, preferentemente con resistencia superior o igual a los **25 MPa**. Para la técnica de extrusado se debe emplear una mezcla de consistencia seca con relación Agua-Cemento menor a 0.35. El tamaño máximo de los áridos debe ser generalmente pequeño e inferior a los 12mm.

Por otro lado se emplean en su producción aceros de alto límite elástico que varían sus características en función del fabricante, y a pesar de que este acero no se produce nacionalmente, las principales fuentes de importación (México, Brasil, EE.UU, etc.) sugieren recurrir a las Normas ASTM para su selección. Todos los cálculos estructurales se han realizado para alambres de 3mm y 5mm, con límites de rotura de 1 770 MPa y 1 860 MPa, y grado de relajamiento bajo.

3.8.1 LA PLANTA PARA LA EJECUCIÓN DE LA PRELOSA PPCC. SECUENCIA TECNOLÓGICA

La Planta es una instalación que puede requerir una inversión inicial relativamente baja porque a pesar de recurrir al preesfuerzo, técnica generalmente costosa, los recursos que se involucran son manufacturados bajo determinadas prescripciones técnicas y mecánicas, evadiendo así los costosos equipos que ofrece el mercado para aplicar esta técnica. Definitivamente lo que se procura es reproducir una Planta Industrial de pretesado tanto cuanto sea posible, pero a una escala asumible por costos de inversión relativamente bajos. Se requiere entonces de los siguientes elementos para dicha Planta:

- ☞ **Lecho de vaciado**
- ☞ **Aditamentos de anclaje**
- ☞ **Cabezales de Anclaje**
- ☞ **Equipo de tesado mecánico**
- ☞ **Máquina de encofrado deslizante para la colocación y vibrado del hormigón**
- ☞ **Equipo de corte**

LECHO DE VACIADO

La **Figura 3.19** ilustra un ejemplo del lecho existente actualmente en el Centro de Estudios de Construcción y Arquitectura Tropical (CECAT) ubicado en el Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría” (ISPJAE) de La Habana, Cuba, que el Autor tuvo la posibilidad de visitar. En este lecho se pueden ejecutar diversas tipologías de elemento, más allá de la propia prelosa PPCC. Se observa en la foto la parte de los moldes que son fijos en la Planta y contruados de hormigón con una adecuada terminación para garantizar la propia terminación del elemento que ha de construirse sobre él.



La longitud de este lecho puede ser variable y dependerá fundamentalmente de la tensión inicial de tesado que puede alcanzarse con el equipo de tesado que luego se describe. El caso que se ilustra es con lechos de **34m** de longitud, para estirar los alambres a una elongación aproximada de **5.6mm/1m**, y alcanzar así la tensión inicial de tesado que se requiere.

ADITAMENTOS DE ANCLAJE



Se pueden aprovechar los propios aditamentos de anclaje para el pretensado que se comercializan en el mercado, que a más de encontrarse a precios razonablemente bajos, son reutilizables repetidas veces con un bajo nivel de depreciación¹², por lo que la inversión se llega a amortizar rápidamente. La **Figura 3.20** ilustra uno de los aditamentos de anclaje que pueden encontrarse en el mercado para la tecnología del pretensado, basado en el efecto de cuña. Se trata de un cono hembra y otro macho, ambos metálicos, para alambres de 3mm y 5mm.

¹² Durante una visita que realizaron el Autor y el Director de esta Investigación el 20 de septiembre del 2008 a la Planta DITELME S.A, situada en la Ciudad de Guayaquil, su Gerente General manifestó que los conos de anclaje para pretensado que allí utilizan se emplean en más de 1 000 ocasiones.



Mientras que la **Figura 3.21** muestra la forma de disponer el alambre en este sistema de anclaje. La efectividad se alcanza cuando se hace penetrar el cono macho en el interior del hembra, hasta que el primero se cierra lo suficiente mientras penetra, llegando a coartar el deslizamiento del alambre una vez que se haya sido estirado en la magnitud que estipule el cálculo estructural de la prelosa.

CABEZALES DE ANCLAJE



Estos cabezales se ubican en ambos extremos de cada línea, lecho de producción o senda de vaciado. Una variante puede ser como la que se observa en la **Figura 3.22**, contruidos a partir de una plancha metálica de 10 a 12mm de espesor para asegurar su indeformabilidad mientras se esté introduciendo contra ellos la tensión a los alambres.

En cada cabezal se practican orificios dispuestos en tal posición que al pasar el acero de alto límite elástico por ellos, de extremo a extremo de la línea, puedan reproducirse las diferentes tipologías de refuerzo que se ilustraron en la **Figura A3.5** que se incluye en el **ANEXO 3**, en cuanto a cantidad y posición de los alambres que se requieran para cada caso. De esta manera no hay necesidad de cambiar estos cabezales de una a otra tipología de armado.

EQUIPO DE TESADO MECÁNICO

La propuesta sustituye los costosos equipos de tesado (gatos) por un aditamento creado en el ISPJAE, que se construye con escasos recursos. Se trata de un cuerpo metálico trapezoidal con suficiente rigidez como para impedir su deformación mientras se introduce la tensión para estirar los alambres. Este aditamento posee en su eje de simetría un orificio roscado por el que pasa un tornillo sinfín que nace de una plancha que es la que se apoya contra el cabezal, sin llegar a deslizarse.



Fig. 3.23

El cuerpo trapezoidal posee un barra central maquinada hexagonalmente en su extremo para asemejar la cabeza de un tornillo ordinario, de manera que pueda utilizarse una llave para enroscar e introducir así la tensión en el cable. Partiendo de que el tesado se realiza por un solo extremo de la línea de producción, el procedimiento secuencial para introducir la tensión previa en el alambre se puede describir brevemente de la manera siguiente:

Se extiende cada alambre de extremo a extremo de la línea haciéndolos pasar por los orificios ubicados en los dos cabezales de anclaje, de acuerdo a la tipología de refuerzo que se seleccione en cada situación. En uno de estos cabezales extremos y para cada alambre, se sitúan los anclajes debidamente “cerrados” contra él, mientras que en el otro cabezal, precisamente por el que se va a introducir la tensión, se sitúan igualmente aditamentos de anclaje pero sin llegar a cerrarlos completamente como para permitir que luego de que cada uno pase a través del cuerpo metálico trapezoidal que funciona como gato, y debidamente anclados contra el propio cabezal, puedan ser estirados de dos en dos hasta eliminar su catenaria.

Una vez que esto suceda se corren los anclajes que se desplazaran en el extremo por el que se tesa, hasta pegarlos nuevamente al cabezal por el que se está estirando y se cierran, pero sólo lo suficiente como para permitir el ulterior estiramiento de dichos cables. El procedimiento se repite con otros dos, hasta eliminar la catenaria de todos los alambres, debiendo seleccionarse las parejas de alambres que se ubiquen en posiciones simétricas respecto del centroide del cabezal. Sólo cuando se logre eliminar la catenaria de todos los alambres es que se comienza a introducir la tensión inicial de tesado, de la manera que se ilustra en la **Figura 3.23**, mediante un proceso de rosca sinfín. La tensión que se introduce se va controlando mediante la evaluación del alargamiento que experimenta el cable al accionar con la llave de apriete sobre el tornillo sinfín del mecanismo.

Para ello, y a partir de eliminada la catenaria, ha de medirse la magnitud que se va separando del cabezal el aditamento de anclaje que fue cerrado sólo lo suficiente como para mantener la tensión que lo lograra, pero que permita a la vez que el alambre se estire más a partir de aquella tensión. Por ejemplo, el corrimiento absoluto de cada anclaje, si se deseara introducir una tensión inicial del 75% del límite convencional de fluencia de un acero con $f_{pu} = 1\,770\text{MPa}$, y la distancia entre cabezales de anclaje en las líneas de producción es de 34.00m, sería evaluado así:

$$f_{pi} = 0.75f_{pu} = 0.75(1\,770\text{MPa}) = 1\,328\text{MPa} \text{ (Tensión inicial de tesado)}$$

$$\varepsilon_{pi} = \frac{f_{pi}}{E_p} = \frac{1\,328\text{MPa}}{2 \cdot 10^5\text{MPa}} = 0.0066$$

$$\Delta_{pi} = (\varepsilon_{pi} \cdot l) = (0.0066)(34.00\text{m}) = 0.22\text{m} \text{ (Elongación del alambre durante el tesado)}$$

Es decir, cuando este equipo de tesado logre separar cada anclaje **22cm** desde el cabezal mediante el proceso de roscado del tornillo sinfín, vencida antes la catenaria de cada alambre, se estaría introduciendo una tensión inicial de tesado de **1 328 MPa**, la que caería luego de producidas las pérdidas diferidas a un valor aproximado de **1 130 MPa**, si estas pérdidas se estimaran en un 15%.



La **Figura 3.24** ilustra cómo quedan ya estirados y anclados todos los alambres en un tipo de losa que no es precisamente la preloso **PPCC**, aunque para esta la situación es bien similar, modificándose sólo la ubicación de los alambres. Obsérvese que al vaciar el hormigón, endurecido este, y transferida la fuerza de tesado, los aditamentos de anclaje pueden recuperarse y reutilizarse nuevamente. En la práctica esta transferencia puede estarse realizando a las 72hrs si se asegura un adecuado curado.

MÁQUINA DE ENCOFRADO DESLIZANTE PARA LA COLOCACIÓN Y VIBRADO DEL HORMIGÓN

Las **Figuras 3.25 y 3.26** muestran un prototipo de máquina producida en el CECAT que como puede observarse va montada sobre ruedas para facilitar su desplazamiento a lo largo de la línea de producción. La máquina posee una cuba dentro de la cual se va colocando el hormigón para luego vibrarlo por medio de tres agujas de inmersión que ella posee, hasta alcanzar la trabajabilidad suficiente como para que dicho hormigón sea luego fácilmente extendido sobre el molde fijo del lecho.

La máquina se sitúa inicialmente por uno de los extremos del lecho (los alambres pretensados ya han sido estirados y anclados contra los cabezales) y se va trayendo hacia el otro extremo mediante un cable que se enrolla en un polipasto (ver **Figura 3.27**), procurando asegurar un desplazamiento a velocidad constante. Una mínima especialización de estas labores puede asegurar una velocidad que puede oscilar entre **1 y 1.5m/min**, es decir, la operación de colocación, vibrado y compactación del hormigón extendido en un lecho de **34.00m**, puede realizarse en aproximadamente entre 35 y 50min.



La baja relación A/C que se utiliza facilita que la máquina, sirviendo de molde y extrusando al hormigón que va colocando, pueda ir desplazándose sobre el hormigón extendido sin riesgo a que se disgregue. En el caso de la **Prelosa PPCC** la propia máquina va asegurando la superficie superior que se ha considerado para ella (semicírculos de radio 30mm).

EQUIPO DE CORTE

El pretesado a escala industrial exige normalmente una sierra viajera con disco de diamante para cortar las piezas a la longitud requerida, alternativa que puede resultar onerosa pues el disco de diamante se va desgastando al cortar lo mismo hormigón que acero, y resultan ser caros en el mercado. Para atenuar este gasto, durante la colocación del hormigón se van situando separadores a lo largo del lecho de vaciado a distancias que se correspondan con la longitud que cada proyecto demande, de manera que el acero a nivel de estos separadores queda prácticamente desnudo y puede ser posteriormente cortado mediante un equipo de oxicorte elemental.

3.8.2 SECUENCIA DE OPERACIONES EN UNA PLANTA TÍPICA DE PRODUCCIÓN DE LA PRELOSA

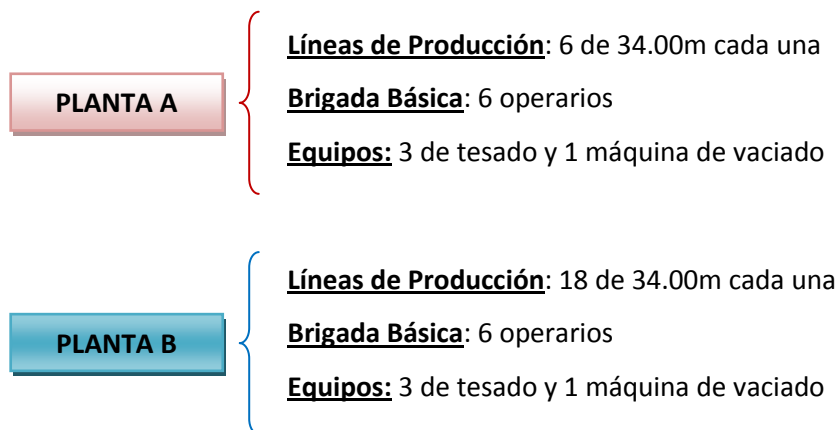
El proceso de producción de la prelosa puede responder a la siguiente secuencia de operaciones, indicando los tiempos aproximados que requiere un operario en cada una:

- 01:** Limpieza del lecho de vaciado (**0.15hr x Operario x Línea**)
- 02:** Aplicación de algún producto en la superficie inferior del lecho que facilite luego el desmolde de la prelosa (**0.15hr x Operario x Línea**)
- 03:** Colocación de los alambres a través de los cabezales atendiendo a la tipología de armado de que se trate (diámetro, cantidad y posición de los alambres) (**0.3hr x Operario x Línea**)
- 04:** Tesado y anclaje de los alambres (**2hr x Operario x Línea**)
- 05:** Colocación y compactación del hormigón (**1.2hr x Operario x Línea**)
- 06:** Curado (a partir de la primera hora de colocado el hormigón)
- 07:** Destese y corte de las armaduras (a las **72hr** de colocado el hormigón)
- 08:** Transporte de las prelosas producidas al sitio de almacenaje.

Son estos tiempos los que sirven de base para el diseño del área de producción de la Planta a partir de un rendimiento que se fije.

3.8.3 CRITERIOS GENERALES PARA LA CONCEPCIÓN DEL PATIO DE PRODUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE PLANTA

A manera de ilustración, se consideraran producciones para viviendas cuyos espacios conduzcan a una luz de **4.00m**, valor apropiado para los estándares de las viviendas económicas. Siendo este el caso se pueden obtener ocho (8) prelosas en cada línea de producción de **34m** de longitud, luego de situar convenientemente los separadores que permitan interrumpir la colocación del hormigón cada 4.00m. Si el ancho de la prelosa es de **0.50m** (valor adoptado para asegurar la manipulación del elemento sin requerir equipos especiales de izaje), se obtendría por cada línea de producción una superficie de total de **16.00m²** (8x4.00mx0.50m). A continuación se ofrece un análisis para estimar el rendimiento promedio de dos alternativas de Planta con similares recursos, y diferente cantidad de líneas de producción:



Como en ambas variantes se cuenta con tres equipos de tesado, las primeras cuatro operaciones descritas en la **Sección § 3.8.2 (O1–O4)** pueden realizarse simultáneamente en tres líneas (situando 2 operarios en cada una), y requiriéndose un tiempo total para todas ellas de **1.5hr** aproximadamente. Propiciando que toda la brigada participe en la elaboración del hormigón, a continuación se colocaría este material en la Línea 1, requiriendo 2 operarios un tiempo estimado de **0.6hr** para completar esta operación. La única máquina de vaciado que se posee en ambas variantes (para propiciar el menor costo inicial en tangibles) se trasladaría luego a la siguiente Línea, y a su emplazamiento se está destinando **0.20hr**. La **Figura 3.28** ilustra cómo es posible que al cabo de **4hr** se haya colocado el hormigón en las tres primeras líneas. Si se establecen jornadas laborales de **8hr** efectivas, esta brigada, con estos recursos, estaría completando seis líneas y produciendo así **96m²** de superficie de entrepiso o cubierta en sólo media jornada, según se observa en la propia **Figura 3.28**. Como son seis las líneas que posee la Planta de la primera variante, concluidas estas cinco primeras operaciones el proceso tecnológico se detiene tres días para poder destesar, durante los cuales sólo habría que asegurar el curado y los operarios pueden dedicarse a otras labores menos exigentes.

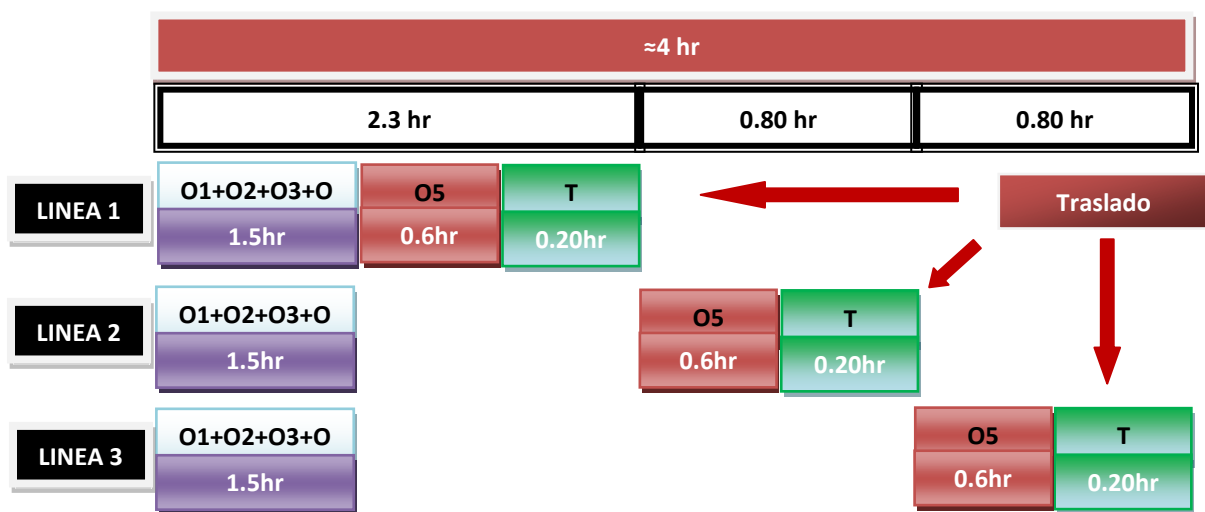


Fig. 3.28 Secuencia de operaciones para producir 48m² de losa en tres líneas durante las primeras 4hr con sólo una máquina.

El rendimiento para la primera variante de Planta (**19.2m²/día**) se refleja en la **Tabla 3.33**.

Tabla 3.33 Ciclo de producción para realizar dos vaciados consecutivos sobre un mismo lecho cuando la Planta posee 6 líneas de producción.

Día	1	2	3	4	5*	6	7	8	9	10*
Actividad	Vaciado de las 6 Líneas	Curado	Curado	Curado	Destese	Nuevo vaciado de las 6 Líneas	Curado	Curado	Curado	Destese
					(96m ²)					(96m ²)
	Producción Total para un ciclo de 10 días									192m ²

***Luego de cortada toda la armadura se retiran las losas del lecho de vaciado y se trasladan a la zona de almacenamiento en la Planta.**

En definitiva, al cabo de **10 días** laborales se producen **192m²** de superficie de prelosa que permitirían resolver, para viviendas de 60m², la cubierta de 3.2 viviendas/Planta, o la solución estructural de entrepiso y cubierta para 1.6 viviendas de dos niveles /Planta de igual superficie en igual tiempo. Al cabo de 11 meses, considerando 24 días laborales, se estarían garantizando 84 viviendas de un nivel (con una superficie de 60m²), o 42 de dos niveles con igual superficie por piso, sólo con una Planta de seis líneas de producción.

Como la productividad estuvo determinada no por los recursos, sino por los tres días que habría que esperar para transferir la fuerza de pretensado (de ahí que los costos directos de inversión sean relativamente bajos), ya para la segunda variante (**PLANTA B**), que concibe 18 lechos de vaciado, la productividad se incrementaría apreciablemente como se ilustra en la **Tabla 3.34**.

Es decir, en esta segunda variante al cabo de 7 días laborales se producen 288m² de superficie de prelosa para un rendimiento de **(41m²/día)**, duplicando así el de la primera variante y permitiendo resolver la cubierta de 4.8 viviendas de un nivel de 60m²/Planta, o la solución estructural de entrepiso y cubierta para 2.4 viviendas de dos niveles de igual superficie/Planta, en ese tiempo.

Tabla 3.34 Ciclo de producción cuando la Planta posee 18 líneas de producción.

Día	1	2	3	4	5*	6*	7*
Actividad	Vaciado de 6 Líneas	Curado	Curado	Curado	Destese		
					(96m ²)		
Actividad		Vaciado de otras 6 Líneas	Curado	Curado	Curado	Destese	
						(96m ²)	
Actividad			Vaciado de otras 6 Líneas	Curado	Curado	Curado	Destese
							(96m ²)
Producción Total para un ciclo de 7 días							288m ²

3.9 CONCLUSIONES PARCIALES DEL CAPÍTULO

- 1) Luego de aplicar los principios de los Estados Límites de Resistencia y Servicio a las dos etapas de carga que se consideran para el elemento que se estudia, se concluye que:
 - a) Durante la etapa de explotación el estado límite más restrictivo corresponde al Estado Límite de Resistencia a Flexión, o sea, la sobrecarga impuesta máxima que puede actuar sobre las losas construidas con el elemento PPCC, es precisamente la que demanda este estado. Para los restantes, lo mismo en servicio que agotamiento, la carga pudiera ser mayor.
 - b) Debido a la precisión del párrafo anterior el surtido inicial que se sometiera a estudio se redujo, eliminando de él las tres tipologías de armado de menor área de acero. Definitivamente se propone producir las siguientes variantes de losas:

1	PPCC: 6/60:30: T-5 ³ /1770:C20
2	PPCC: 6/60:30: T-5 ⁵ /1770:C20
3	PPCC: 6/60:30: T-3 ¹ :5 ² /1770:C20
4	PPCC: 6/60:30: T-3 ³ :5 ² /1770:C20
5	PPCC: 6/60:30: T-3 ² :5 ³ /1770:C20

6	PPCC: 6/60:30: T-5 ³ /1770:C30
7	PPCC: 6/60:30: T-5 ⁵ /1770:C30
8	PPCC: 6/60:30: T-3 ¹ :5 ² /1770:C30
9	PPCC: 6/60:30: T-3 ³ :5 ² /1770:C30
10	PPCC: 6/60:30: T-3 ² :5 ³ /1770:C30

11	PPCC: 6/60:30: T-5 ³ /1770:C40
12	PPCC: 6/60:30: T-5 ⁵ /1770:C40
13	PPCC: 6/60:30: T-3 ¹ :5 ² /1770:C40
14	PPCC: 6/60:30: T-3 ³ :5 ² /1770:C40
15	PPCC: 6/60:30: T-3 ² :5 ³ /1770:C40

16	PPCC: 6/60:35: T-5 ³ /1770:C20
17	PPCC: 6/60:35: T-5 ⁵ /1770:C20
18	PPCC: 6/60:35: T-3 ¹ :5 ² /1770:C20
19	PPCC: 6/60:35: T-3 ³ :5 ² /1770:C20
20	PPCC: 6/60:35: T-3 ² :5 ³ /1770:C20

21	PPCC: 6/60:35: T-5 ³ /1770:C30
22	PPCC: 6/60:35: T-5 ⁵ /1770:C30
23	PPCC: 6/60:35: T-3 ¹ :5 ² /1770:C30
24	PPCC: 6/60:35: T-3 ³ :5 ² /1770:C30
25	PPCC: 6/60:35: T-3 ² :5 ³ /1770:C30

26	PPCC: 6/60:35: T-5 ³ /1770:C40
27	PPCC: 6/60:35: T-5 ⁵ /1770:C40
28	PPCC: 6/60:35: T-3 ¹ :5 ² /1770:C40
29	PPCC: 6/60:35: T-3 ³ :5 ² /1770:C40
30	PPCC: 6/60:35: T-3 ² :5 ³ /1770:C40

31	PPCC: 6/60:40: T-5 ³ /1770:C20
32	PPCC: 6/60:40: T-5 ⁵ /1770:C20
33	PPCC: 6/60:40: T-3 ¹ :5 ² /1770:C20
34	PPCC: 6/60:40: T-3 ³ :5 ² /1770:C20
35	PPCC: 6/60:40: T-3 ² :5 ³ /1770:C20

36	PPCC: 6/60:40: T-5 ³ /1770:C30
37	PPCC: 6/60:40: T-5 ⁵ /1770:C30
38	PPCC: 6/60:40: T-3 ¹ :5 ² /1770:C30
39	PPCC: 6/60:40: T-3 ³ :5 ² /1770:C30
40	PPCC: 6/60:40: T-3 ² :5 ³ /1770:C30

41	PPCC: 6/60:40: T-5 ³ /1770:C40
42	PPCC: 6/60:40: T-5 ⁵ /1770:C40
43	PPCC: 6/60:40: T-3 ¹ :5 ² /1770:C40
44	PPCC: 6/60:40: T-3 ³ :5 ² /1770:C40
45	PPCC: 6/60:40: T-3 ² :5 ³ /1770:C40

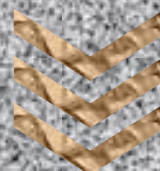
A las que habría que adicionar las mismas tipologías escritas en las Tablas anteriores, pero ahora con el empleo del alambre de 1 860MPa, resultando finalmente **90 variantes** diferentes.

- c) La influencia del grado de acero es poco significativa en la capacidad de carga del elemento.
- d) A partir de la luz de 3.00m, prácticamente todas las variantes requieren ser apuntaladas durante el vaciado de la carpeta, sólo que un puntal ubicado a la mitad de su longitud es suficiente en todos los casos.

CAPÍTULO IV



VALIDACIÓN ECONÓMICA DEL PRODUCTO PPCC Y SU COMPETITIVIDAD EN EL MERCADO REGIONAL.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA

ÁREA DE LA ENERGÍA, LAS INDUSTRIAS Y LOS RECURSOS
NATURALES NO RENOVABLES

4.1 INTRODUCCIÓN

En este Capítulo se evalúa la competitividad económica de la prelosa objeto de investigación con el fin de demostrar la conveniencia de utilizarla en la solución estructural de las placas de entrepiso y cubierta dentro de los Programas VIS. En realidad el análisis se limita sólo a la evaluación de los **costos directos de materiales** de esta variante, para compararlos con los costos de algunas otras soluciones de uso más generalizado en la provincia de Loja, a saber:

Variante 1: Losa maciza de hormigón armado

Variante 2: Losa Alivianada

Variante 3: NOVALOSA

Variante 4: PPCC

En la evaluación que se ofrece se ha decidido ignorar en todos los casos los costos indirectos, más otros rubros incluidos en los costos directos como son **equipos** y **mano de obra**. Esta decisión se fundamenta en la siguiente razón: evitar sobrevaloraciones a favor de la prelosa cuando aun no ha sido empleada en la región, a pesar de que algunas bondades a su favor resultan evidente como por ejemplo: agilidad en el proceso constructivo de las placas con la consecuente reducción de los plazos de ejecución (la prelosa es un elemento prefabricado que se construye y almacena en las cantidades que justifique la demanda local y, además, de fácil manipulación), reducción significativa de los encofrados comparables sólo con la NOVALOSA pero muy inferior al que requieren las losas macizas y alivianadas, reducción de los costos de mantenimiento (con la prelosa la durabilidad se incrementa como consecuencia del pretensado que se introduce), etc. Los precios unitarios que se adoptan en esta evaluación corresponden a los que fijara la Cámara de la Construcción de Loja en el mes de Agosto de 2008, algunos de los cuales se relacionan en la **Tabla 4.1**.

Tabla 4.1 Precios Unitarios fijados en Agosto de 2008 por la CCL

Rubro	Unidad	Costo Directo (usd/unidad)
Materiales para encofrado de losa de 15cm de espesor (dos usos)	m^2	5.05
Hormigón simple de $f'_c = 21MPa$	m^3	73.95
Hormigón simple de $f'_c = 25MPa$ ¹	m^3	81.5
Acero natural (hormigón armado)	kg	2.38
Acero ALE (hormigón pretensado) ²	kg	2.85
Malla ARMEX (4.5mmx30cmx30cm)	m^2	1.73
Bloque de alivianamiento	u	0.45
Plancha de acero colaborante (steel deck) 1x6/0.7	m^2	3.34
Perfiles de refuerzo 5cmx10cm (para el sistema NOVALOSA)	m	5.06

¹ En realidad este hormigón no aparece en el listado de "Costo de Materiales Ecuador" que distribuye la Cámara de la Construcción de Loja. El valor fijado es el resultado de evaluar en la función que rige la tendencia a partir de los costos de las tres calidades que se indican en el listado, a saber: $Costo = 1.985f'_c + 31.88$, que para un hormigón de $f'_c = 25MPa$, conduce a \$81.5usd/ m^3 .

² El listado de "Costo de Materiales Ecuador" que distribuye la Cámara de la Construcción de Loja no ofrece los costos del acero de alto límite elástico (el pretensado prácticamente no se emplea en el país). Sin embargo, el Gerente General de la Planta de Prefabricado "PRECRETO", perteneciente al Consorcio DITELME S.A (Distribuidora de Elementos Estructurales), situada en el Km. 19 Vía a la Costa, en la Ciudad de Guayaquil, importador en el país de acero pretensado, comunicó al autor que lo adquiere en México a un precio estable que no supera en un 20% el del acero ordinario.

Para evaluar el peso del acero, incluido el de alto límite elástico, se va a considerar una densidad de 7800 kg/m^3 , de manera que un metro lineal de acero pesa lo siguiente:

$$P = (7800 \text{ kg/m}^3) \cdot a_s \cdot l$$

Siendo:

a_s : Área de la sección transversal de la barra de refuerzo que se utiliza

l : Longitud total del acero (evaluada aquí por cada m^2 de losa)

4.2 EVALUACIÓN DE LOS COSTOS DIRECTOS DE MATERIALES

Se definen las siguientes condiciones generales de Proyecto:

Luz de trabajo: $l = 4.50 \text{ m}$

Carga muerta impuesta: $D_{\text{piso}} = 1 \text{ kN/m}^2$, $D_{\text{tabique}} = 1 \text{ kN/m}^2$

Sobrecarga Impuesta: $L = 1.5 \text{ kN/m}^2$

4.2.1 LOSA MACIZA DE 12cm

Se va a considerar una placa de entrepiso para una vivienda de dos niveles que se diseña para las siguientes condiciones de proyecto:

Calidad de hormigón: $f'_c = 21 \text{ MPa}$

Calidad de Acero: $f_y = 420 \text{ MPa}$ (G60)

Armadura Principal: Barra No.3 ($d_b = 10 \text{ mm}$, $a_s = 71 \text{ mm}^2$)

Armadura Secundaria (retracción y temperatura): Barra No.3 ($d_b = 10 \text{ mm}$, $a_s = 71 \text{ mm}^2$)

Recubrimiento neto de la armadura: $r_n = 20 \text{ mm}$

Se considera que la losa presenta apoyos simples, o sea, que no posee refuerzo negativo sobre los apoyos, de manera que valga la comparación con una losa análoga resuelta a partir del empleo de la solución compuesta **PPCC**.

DISEÑO POR RESISTENCIA DE LA LOSA

$$h_o = \frac{l}{20} = \frac{450 \text{ cm}}{20} = 0.225 \text{ (Con este espesor dado en el Art. 9.5.2.1 del ACI 318:05, se evade comprobar el estado límite de deformación)}$$

No obstante, se fijará $h_o = 12 \text{ cm}$, lo que obliga a verificar el estado límite de deformación.

ARMADURA PRINCIPAL

$$q_u = 1.2(pp + D_{\text{piso}} + D_{\text{tabique}}) + 1.6L = 8.3 \text{ kN/m}$$

$$M_u = 0.125 q_u l^2 = 19.2 \text{ kN.m}$$

$$A_s = 5.74 \text{ cm}^2, A_{s\text{min}} = 3.2 \text{ cm}^2$$



$$esp. = 12cm \text{ (No. 3)}$$

ARMADURA SECUNDARIA

$$esp. = 22cm \text{ (No. 3)}$$

EVALUACIÓN DE LOS COSTOS DIRECTOS DE MATERIALES PARA 1m² DE LOSA

a) Encofrado: Se requiere 1m²

b) Volumen de hormigón

$$V_{hormigón} = h_o(1.0m)(1.0m) = (0.12m)(1.0m)(1.0m) = 0.12m^3$$

c) Acero

c.1) Acero principal

$$l_{total} = \left(\frac{1m}{esp.}\right) \cdot 1m = \left(\frac{1m}{0.12m}\right) \cdot 1m = 8.3m$$

$$Peso = (7800 \text{ kg/m}^3)(71 \cdot 10^{-6}m^2)(8.3m) = 4.60kg$$

c.2) Acero secundario

$$l_{total} = \left(\frac{1m}{esp.}\right) \cdot 1m = \left(\frac{1m}{0.22m}\right) \cdot 1m = 4.55m$$

$$Peso = (7800 \text{ kg/m}^3)(71 \cdot 10^{-6}m^2)(4.55m) = 2.52kg$$

d) Costo Directo

$$Costo_{(LM)} = Costo \text{ Encofrado} + Costo \text{ Hormigón} + Costo \text{ acero}$$

$$Costo_{(LM)} = [(1m^2)(5.05 \text{ usd/m}^2)] + [(0.12m^3)(73.95 \text{ usd/m}^3)] \\ + [(4.60kg + 2.52kg)(2.85 \text{ usd/kg})]$$

$$Costo_{(LM)} = 5.05usd + 8.87usd + 20.29usd$$

$$Costo_{(LM)} = 34.21 \text{ usd/m}^2$$



4.2.2 LOSA ALIVIANADA DE 15cm

Se va a considerar la losa de menor espesor de las que se emplean en la región (15cm), considerando su empleo en luces propias de las VIS.

EVALUACIÓN DE LOS COSTOS DIRECTOS DE MATERIALES PARA 1m² DE LOSA

a) **Encofrado:** Se requiere 1m²

b) **Volumen de hormigón:** 0.118m³

Se ha deducido de este volumen el que ocupan los 4 bloques de alivianamiento de 4(0.40m)(0.20m)(0.10m) = 0.032m³ que se colocan en cada m² de losa.

c) **Acero**

c.1) **Acero principal:** 6.00m, Diámetro No.4 (12mm)

$$Peso = (7800 \text{ kg/m}^3)(129 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2)(6.0 \text{ m}) = 6.04 \text{ kg}$$

c.2) **Acero secundario:** Malla ARMEX (4.5mmx30cmx30cm): 1m²

d) **Bloques de Alivianamiento:** 4u

e) **Costo Directo en Ecuador:**

$$Costo_{(LA)} = Costo \text{ Encofrado} + Costo \text{ Hormigón} + Costo \text{ Bloques} + Costo \text{ acero}$$

$$\begin{aligned} Costo_{(LM)} &= [(1 \text{ m}^2)(5.05 \text{ usd/m}^2)] + [(0.118 \text{ m}^3)(73.95 \text{ usd/m}^3)] + [(4 \text{ u})(0.45 \text{ usd/u})] \\ &\quad + [(6.04 \text{ kg})(2.85 \text{ usd/kg}) + (1 \text{ m}^2)(1.73 \text{ usd/m}^2)] \\ &= 5.05 \text{ usd} + 8.73 \text{ usd} + 1.8 \text{ usd} + 19.94 \end{aligned}$$

$$Costo_{(LM)} = \mathbf{34.52 \text{ usd/m}^2}$$

4.2.3 NOVALOSA DE 15cm

EVALUACIÓN DE LOS COSTOS DIRECTOS DE MATERIALES PARA 1m² DE LOSA

a) Encofrado: 0

b) Volumen de hormigón: 0.15m³ de $f'_c = 21MPa$

c) Acero

c.1) Plancha de Acero Colaborante (Stell Deck): 1m²

c.2) Perfiles de refuerzo 5cmx10cm: 3.0m

c.3) Acero secundario: Malla ARMEX (4.5mmx30cmx30cm): 1m²

d) Costo Directo en Ecuador:

$$\text{Costo}_{(NL)} = \text{Costo Hormigón} + \text{Costo acero}$$

$$\begin{aligned}\text{Costo}_{(NL)} &= [(0.15m^3)(73.95 \text{ usd}/m^3)] \\ &\quad + [(1m^2)(3.34 \text{ usd}/m^2) + (3.0m)(5.06 \text{ usd}/m) + (1m^2)(1.73 \text{ usd}/m^2)] \\ &= 11.09\text{usd} + 20.25\text{usd}\end{aligned}$$

$$\text{Costo}_{(NL)} = \mathbf{31.34 \text{ usd}/m^2}$$

4.2.4 PPCC

Recurriendo a las Tablas de Selección que se incluyen en el **ANEXO 5**, para las condiciones de proyecto que fueron definidas al inicio de este análisis, se pueden seleccionar varias tipologías, entre ellas la tipología **PPCC30:6/60:T-5⁵ /1770:C30**, capaz de resistir una sobrecarga viva de 1.66 kN/m² (Consultar Tabla A5.3), mayor que la carga viva de proyecto (1.5 kN/m²).

EVALUACIÓN DE LOS COSTOS DIRECTOS DE MATERIALES PARA 1m² DE LOSA

a) Encofrado: 0

b) Volumen de hormigón (en 1m² de losa entran dos prelosas)

$$V_{prelosa} = (2A_{pl}) \cdot 1m = 2(21\,218mm^2 \cdot 10^{-6}) \cdot 1m = 0.042m^3 \quad (f'_c = 25MPa)$$

$$V_{carpeta} = [(h_{pl} + h_c) \cdot 1m - (2A_{pl})] \cdot 1m$$

$$V_{carpeta} = [(0.06 + 0.03) \cdot 1m - 2(21\,218mm^2 \cdot 10^{-6})] \cdot 1m = 0.048m^3 \quad (f'_c = 25MPa)$$

$$V_{total} = 0.042m^3 + 0.048m^3 = 0.09m^3$$

c) Acero

c.1) Principal en la prelosa (ALE)

Como en $1m^2$ de losa entran dos prelosas y cada prelosa de esta tipología presenta cinco alambres de 3mm, se tendrá:

$$\therefore l_{total} = 2prelosas \left(5 \frac{u}{prelosa} \right) \cdot 1m = 10m$$

$$Peso = (7800 \text{ kg}/m^3)(98.15 \cdot 10^{-6} m^2)(10m) = 7.6kg$$

c.2) Acero Secundario en la carpeta

En la carpeta se propone utilizar Malla ARMEX (4.5mmx30cmx30cm)

d) Costo Directo en Ecuador:

$$Costo_{(PPCC)} = Costo \text{ Encofrado} + Costo \text{ Hormigón} + Costo \text{ acero}$$

$$Costo_{(PPCC)} = 0 + [(0.09m^3)(81.5 \text{ usd}/m^3)] + [(7.6kg)(2.85 \text{ usd}/kg) + (1m^2)(1.73 \text{ usd}/m^2)]$$

$$Costo_{(PPCC)} = 0 + 7.33usd + 23.39usd$$

$$Costo_{(PPCC)} = \mathbf{30.72 \text{ usd}/m^2}$$

La **Tabla 4.2** resume los costos directos de materiales para cada una de las cuatro variantes analizadas en el Trabajo, indicando además el costo relativo de las tres variantes que hoy se emplean en la región respecto de la nueva variante que puede ser introducida a partir de la prelosa PPCC.

Tabla 4.2 Costos directos de materiales por m^2 de losa construida

VARIANTE	COSTOS DIRECTOS ³ (usd/m ²)				
	ENCOFRADO ⁴	HORMIGÓN	ACERO	TOTAL	RELATIVO
PPCC30:6/60: T-5 ⁵ /1770:C30	0	7.34	23.38	30.72	1.00
LOSA MACIZA	5.05	8.87	20.15	34.21	1.11
LOSA ALIVIANADA DE 15cm	5.05	10.51 ⁵	19.94	34.52	1.12
NOVALOSA DE 15cm	0	11.09	20.25	31.34	1.02

³ En estos costos no se incluye el recurso tiempo como tampoco el equipamiento que se requiere para la ejecución de las labores constructivas.

⁴ No incluye el apuntalamiento

⁵ Incluye precio de los bloques de hormigón



4.3 CONCLUSIONES PARCIALES DEL CAPÍTULO

Las evaluaciones realizadas confirman la ventaja económica de la prelosa PPCC como elemento estructural principal para solucionar placas, lo mismo de entepiso que de cubierta, dentro de los Programas VIS. Si bien los resultados refieren cierto ahorro en los costos directos de materiales a pesar de haber fijado a la prelosa el hormigón más resistente y en consecuencia más caro, y haberse empleado en ella un acero también más caro, existen otras razones que justifican la conveniencia de su introducción en el mercado regional dada la agilidad que imprimiría a la construcción masiva de viviendas, a la reducción significativa de encofrado (incidencia directa en el concepto de sustentabilidad y la preservación del equilibrio ecológico en la medida en que se requiera menos el empleo de la madera en la construcción), a la prolongación de los plazos de mantenimiento a causa de la mayor durabilidad que garantiza el pretensado, etc.

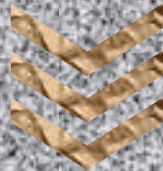
No obstante, la introducción de esta novedosa variante exigiría una inversión inicial de capital para montar las Plantas de producción de la prelosa, incluyendo los equipos que permitan el tesado de los alambres y la colocación continua del hormigón mediante un proceso de extrusado.

Durante la investigación el autor tuvo la posibilidad de visitar en dos ocasiones Cuba y pudo conocer que esta tecnología de producción ya ha sido aplicada en ese país para producir losas Cajón pretesadas, viguetas pretensadas y otros elementos, experiencia que puede ser transferida al Ecuador para producir esta nueva variante.

CAPÍTULO V

CÁLCULO DE LA SOBRECARGA MÁXIMA PARA GARANTIZAR EL ESTADO LÍMITE DE DEFORMACIÓN									
Rm	24								
E	200000								
fct	24								
fct	24								
fct	24								
fct	24								
fct	24								
fct	24								
fct	24								

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS Y CONCLUSIONES FINALES.



1859

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA

ÁREA DE LA ENERGÍA, LAS INDUSTRIAS Y LOS RECURSOS
NATURALES NO RENOVABLES

5.1 RESULTADOS FINALES. ANÁLISIS

A partir de resultados alcanzados durante el análisis estructural y tecnológico que se expone en el Capítulo III de la Tesis, y la factibilidad económica tratada en el Capítulo IV, se concluye que la variante de elemento que concentró la atención de esta investigación es pertinente para la región y su introducción en el sector de la construcción contribuiría a mejorar la eficacia de los Programas de Vivienda de Interés Social en Ecuador.

El resultado final de la investigación se ofrece mediante un juego de siete (7) Tablas que permiten seleccionar la mejor variante de prelosa para cada condición de proyecto, a partir de la sobrecarga que puede soportar cada una por encima de la carga que corresponde al peso propio del elemento, de la carpeta (según sea su espesor) y de una sobrecarga impuesta debida a las terminaciones de piso o cubierta, estimada en el trabajo en 1 kN/m^2 . Adicionalmente se indica la información que permite decidir si el elemento seleccionado requiere o no ser apuntalado durante la etapa de vaciado de la carpeta. Las Tablas que se incluyen son las siguientes:

PARA DEFINIR LA CANTIDAD DE PUNTALES EN LA ETAPA DE VACIADO DE LA CARPETA

TABLA	TIPOLOGÍA DE PRELOSA	TIPO DE ACERO	ESPESOR DE LA CARPETA
5.1	PPCC: 6/60:30	$f_{pu} = 1770\text{MPa}$	20mm
	PPCC: 6/60:35		30mm
	PPCC: 6/60:40	$f_{pu} = 1860\text{MPa}$	40mm

PARA DEFINIR LA SOBRECARGA MÁXIMA DÚRANTE LA EXPLOTACIÓN DE LA LOSA

TABLA	TIPOLOGÍA DE PRELOSA	TIPO DE ACERO	ESPESOR DE LA CARPETA
5.2	PPCC: 6/60:30 PPCC: 6/60:35 PPCC: 6/60:40	$f_{pu} = 1770\text{MPa}$	20mm
5.3	PPCC: 6/60:30 PPCC: 6/60:35 PPCC: 6/60:40	$f_{pu} = 1770\text{MPa}$	30mm
5.4	PPCC: 6/60:30 PPCC: 6/60:35 PPCC: 6/60:40	$f_{pu} = 1770\text{MPa}$	40mm
5.5	PPCC: 6/60:30 PPCC: 6/60:35 PPCC: 6/60:40	$f_{pu} = 1860\text{MPa}$	20mm
5.6	PPCC: 6/60:30 PPCC: 6/60:35 PPCC: 6/60:40	$f_{pu} = 1860\text{MPa}$	30mm



5.7

PPCC: 6/60:30

PPCC: 6/60:35

PPCC: 6/60:40

 $f_{pu} = 1860 MPa$

40mm

5.2 INFORMACIÓN OFRECIDA POR LAS TABLAS DE SELECCIÓN

La función básica de las losas de entrepiso o cubierta es resistir las cargas que sobre ellas actúan. Se refiere básicamente a las cargas de carácter permanente, llamadas también cargas Muertas (D), y las cargas de explotación o uso, conocidas como cargas Vivas (L). Las primeras incluyen, en la etapa de explotación, el peso propio de la prelosa, de la carpeta y las terminaciones, mientras que la carga Viva depende de la función del edificio que se proyecta.

En el caso de las viviendas la carga Viva, definida por las Normas de cada país, se mueve en el intervalo de $(1.5 \text{ kN/m}^2 \div 2.5 \text{ kN/m}^2)$ para entresijos, y de $(0.6 \text{ kN/m}^2 \div 1.5 \text{ kN/m}^2)$ para cubiertas.

Por otro lado las dimensiones de los espacios en las viviendas son variables y dependen de cada proyecto, cuanto mayor es la longitud que debe salvar la losa, y a igualdad de las restantes condiciones, menor es su capacidad de carga.

Finalmente, el elemento estructural estudiado tiene que garantizar su aptitud, lo mismo ante situaciones límites de resistencia, que de servicio.

Observando estas tres precisiones, las Tablas ofrecen la sobrecarga adicional a toda la carga permanente. que es capaz de resistir cada tipo de losa con su gama de refuerzo, y en las cuatro longitudes que se estudiaron, sin sobrepasar los límites que imponen los Estados de Resistencia Última (Flexión y Cortante), y de Servicio (Fisuración y Deformación).

5.2.1 CÓMO EMPLEAR LAS TABLAS DE SELECCIÓN

Se proyecta una vivienda de interés social de dos niveles para la Ciudad de Loja cuyo proyecto arquitectónico define espacios de 4.00m de longitud. Por sus funciones se fija como carga viva para el entrepiso de esta vivienda $L = 1.5 \text{ kN/m}^2$, y el inversionista del programa decide emplear la tecnología PPCC para la solución estructural de la losa de entrepiso.

Luego de una coordinación con el fabricante de la tecnología, accede a las Tablas de selección y comprueba en la **Tabla 5.1** que la losa PPCC: 6/60:30 con el refuerzo T-5⁵ y $f_{pu} = 1770 MPa$, requiere un puntal a la mitad de su longitud durante la etapa de vaciado de la carpeta, mientras que la **Tabla 5.2** permite definir que esta losa es capaz de resistir con una carpeta de sólo 2cm y en una longitud de 4.00m, una sobrecarga de 1.95 kN/m^2 , que resulta la menor de las cargas que garantizan los estados límites últimos de Flexión y Cortante, y los de Servicio de Fisuración y Deformación.



Como el valor de la carga que resiste esta variante de elemento en la longitud que se va a emplear es mayor que la sobrecarga viva de proyecto ($1.95 \text{ kN/m}^2 > 1.5 \text{ kN/m}^2$), la losa puede ser empleada en estas condiciones sin necesidad de realizar cálculo alguno.

Adicionalmente la misma Tabla indica que la variante no debe emplearse en una longitud de 4.50m, aun cuando las cargas que garantizan los estados límites de Cortante, Fisuración y Deformación, son muy superiores al valor de sobrecarga adicional de proyecto.

ACERO	ESPESOR DE LA CARPETA	CANTIDAD DE PUNTALES A EMPLEAR DURANTE EL VACIADO DE LA CARPETA								TABLA 5.1			
		PPCC: 6/60:30				PPCC: 6/60:35				PPCC: 6/60:40			
		3.00	3.50	4.00	4.50	3.00	3.50	4.00	4.50	3.00	3.50	4.00	4.50
T-5 ³	20mm		1	1	1			1	1			1	1
T-5 ⁵				1	1			1	1			1	1
T-3 ¹ :5 ²			1	1	1		1	1	1		1	1	1
T-3 ³ :5 ²			1	1	1			1	1			1	1
T-3 ² :5 ³			1	1	1			1	1			1	1
T-5 ³	30mm	1	1	1	1		1	1	1			1	1
T-5 ⁵			1	1	1			1	1			1	1
T-3 ¹ :5 ²		1	1	1	1		1	1	1		1	1	1
T-3 ³ :5 ²		1	1	1	1		1	1	1			1	1
T-3 ² :5 ³			1	1	1		1	1	1		1	1	1
T-5 ³	40mm	1	1	1	1		1	1	1		1	1	1
T-5 ⁵			1	1	1			1	1			1	1
T-3 ¹ :5 ²		1	1	1	1		1	1	1		1	1	1
T-3 ³ :5 ²		1	1	1	1		1	1	1		1	1	1
T-3 ² :5 ³			1	1	1		1	1	1		1	1	1



TABLA PARA LA SELECCIÓN DE LA PRELOSA ADECUADA A PARTIR DE LA SOBRECARGA VIVA QUE CONSIDERE EL PROYECTO (ES ADICIONAL A UNA CARGA IMPUESTA DE 1kN/m²)			ACERO: $f_{pu} = 1770MPa$ CARPETA: 20mm								TABLA 5.2			
			SOBRECARGA VIVA MÁXIMA (kN/m²)											
			PPCC: 6/60:30				PPCC: 6/60:35				PPCC: 6/60:40			
ACERO	ESTADO LÍMITE	CATEGORÍA	3.00	3.50	4.00	4.50	3.00	3.50	4.00	4.50	3.00	3.50	4.00	4.50
T-5³	ÚLTIMO	FLEXIÓN	2,73				3,12	1,68			3,31	1,80		
		CORTANTE	12,4	10,3	8,8	7,5	13,5	11,3	9,6	8,3	14,2	11,8	10,0	8,7
	SERVICIO	TENSIONES NORMALES	11,2	7,4	5,0	3,3	12,8	8,6	5,9	4,0	14,3	9,7	6,6	4,6
		DEFORMACIÓN	9,2	4,5	1,8	0,1	11,8	6,2	3,00	1,0	14,0	7,6	3,9	1,6
T-5⁵	ÚLTIMO	FLEXIÓN	5,17	3,22	1,95		5,87	3,70	2,30		6,24	3,95	2,47	
		CORTANTE	12,4	10,3	8,8	7,5	13,5	11,3	9,6	8,3	14,2	11,8	10,0	8,7
	SERVICIO	TENSIONES NORMALES	13,5	9,1	6,3	4,4	15,4	10,5	7,3	5,2	16,9	11,6	8,1	5,8
		DEFORMACIÓN	11,8	6,4	3,3	1,3	14,9	8,5	4,7	2,3	17,0	9,9	5,6	3,0
T-3¹:5²	ÚLTIMO	FLEXIÓN	1,81				2,10				2,23			
		CORTANTE	12,4	10,3	8,8	7,5	13,5	11,3	9,6	8,3	14,2	11,8	10,0	8,7
	SERVICIO	TENSIONES NORMALES	10,4	6,9	4,6	3,0	12,0	8,0	5,4	3,6	13,4	9,0	6,2	4,2
		EFORMACIÓN	8,34	3,9	1,3	-0,3	10,8	5,5	2,4	0,5	13,0	6,9	3,4	1,2
T-3³:5²	ÚLTIMO	FLEXIÓN	2,84	1,50			3,24	1,77			3,44	1,89		
		CORTANTE	12,4	10,3	8,8	7,5	13,5	11,3	9,6	8,3	14,2	11,8	10,0	8,7
	SERVICIO	TENSIONES NORMALES	11,3	7,5	5,1	3,4	12,9	8,7	5,9	4,1	14,4	9,7	6,7	4,6
		DEFORMACIÓN	9,3	4,6	1,8	0,1	11,9	6,3	3,0	1,0	14,1	7,7	4,0	1,7
T-3²:5³	ÚLTIMO	FLEXIÓN	3,68	2,12			4,18	2,46			4,43	2,63		
		CORTANTE	12,4	10,3	8,8	7,5	13,5	11,3	9,6	8,3	14,2	11,8	10,0	8,7
	SERVICIO	TENSIONES NORMALES	12,0	8,0	5,5	3,7	13,8	9,3	6,4	4,4	15,2	10,3	7,2	5,0
		DEFORMACIÓN	10,1	5,2	2,3	0,5	12,9	7,0	3,6	1,4	15,1	8,4	4,5	2,1

NOTAS:

- 1) La celda en verde indica que la prelosa no debe emplearse en las longitudes en que se aplica el color
- 2) La celda en rojo define la máxima sobrecarga viva que admite la prelosa en cada longitud



TABLA PARA LA SELECCIÓN DE LA PRELOSA ADECUADA A PARTIR DE LA SOBRECARGA VIVA QUE CONSIDERE EL PROYECTO (ES ADICIONAL A UNA CARGA IMPUESTA DE 1kN/m^2)			ACERO: $f_{pu} = 1770\text{MPa}$ CARPETA: 30mm								TABLA 5.3			
			SOBRECARGA VIVA MÁXIMA (kN/m^2)											
			PPCC: 6/60:30				PPCC: 6/60:35				PPCC: 6/60:40			
ACERO	ESTADO LÍMITE	CATEGORÍA	3.00	3.50	4.00	4.50	3.00	3.50	4.00	4.50	3.00	3.50	4.00	4.50
T-5 ³	ÚLTIMO	FLEXIÓN	3,59	2,00			3,98	2,27			4,17	2,38		
		CORTANTE	14,9	12,4	10,6	9,1	16,0	13,4	11,4	9,9	14,2	11,8	10,0	8,7
	SERVICIO	TENSIONES NORMALES	14,6	9,9	6,8	4,7	16,4	11,2	7,8	5,5	18,1	12,4	8,7	6,1
		DEFORMACIÓN	14,3	7,7	3,9	1,5	17,4	9,7	5,3	2,6	20,1	11,5	6,5	3,4
T-5 ⁵	ÚLTIMO	FLEXIÓN	6,70	4,29	2,73	1,66	7,40	4,78	3,08	1,92	7,77	5,03	3,25	2,03
		CORTANTE	14,9	12,4	10,6	9,1	16,0	13,4	11,4	9,9	14,2	11,8	10,0	8,7
	SERVICIO	TENSIONES NORMALES	17,4	12,0	8,4	6,0	19,5	13,5	9,5	6,8	21,3	14,7	10,5	7,6
		DEFORMACIÓN	17,8	10,3	5,9	3,1	21,3	12,6	7,5	4,3	24,1	14,4	8,7	5,1
T-3 ¹ :5 ²	ÚLTIMO	FLEXIÓN	2,45				2,74				2,87			
		CORTANTE	14,9	12,4	10,6	9,1	16,0	13,4	11,4	9,9	14,2	11,8	10,0	8,7
	SERVICIO	TENSIONES NORMALES	13,7	9,2	6,3	4,3	15,4	10,5	7,2	5,0	17,0	11,6	8,1	5,7
		DEFORMACIÓN	13,2	6,9	3,3	1,0	16,1	8,8	4,6	2,0	18,9	10,5	5,8	2,8
T-3 ³ :5 ²	ÚLTIMO	FLEXIÓN	3,73	2,11			4,13	2,38			4,33	2,50		
		CORTANTE	14,9	12,4	10,6	9,1	16,0	13,4	11,4	9,9	14,2	11,8	10,0	8,7
	SERVICIO	TENSIONES NORMALES	14,7	10,0	6,9	4,8	16,5	11,3	7,9	5,5	18,2	12,5	8,7	6,2
		DEFORMACIÓN	14,4	7,8	4,0	1,6	17,6	9,9	5,4	2,6	20,3	11,6	6,6	3,4
T-3 ² :5 ³	ÚLTIMO	FLEXIÓN	4,78	2,88	1,65		5,28	3,23	1,89		5,54	3,39	2,00	
		CORTANTE	14,9	12,4	10,6	9,1	16,0	13,4	11,4	9,9	14,2	11,8	10,0	8,7
	SERVICIO	TENSIONES NORMALES	15,6	10,6	7,4	5,2	17,5	12,0	8,4	6,0	19,2	13,2	9,3	6,7
		DEFORMACIÓN	15,5	8,6	4,6	2,1	18,8	10,8	6,1	3,2	21,5	12,5	7,3	4,0

NOTAS:

- 1) La celda en verde indica que la prelosa no debe emplearse en las longitudes en que se aplica el color
- 2) La celda en rojo define la máxima sobrecarga viva que admite la prelosa en cada longitud



TABLA PARA LA SELECCIÓN DE LA PRELOSA ADECUADA A PARTIR DE LA SOBRECARGA VIVA QUE CONSIDERE EL PROYECTO (ES ADICIONAL A UNA CARGA IMPUESTA DE 1kN/m²)			ACERO: $f_{pu} = 1770MPa$ CARPETA: 40mm								TABLA 5.4			
			SOBRECARGA VIVA MÁXIMA (kN/m²)											
			PPCC: 6/60:30				PPCC: 6/60:35				PPCC: 6/60:40			
ACERO	ESTADO LÍMITE	CATEGORÍA	3.00	3.50	4.00	4.50	3.00	3.50	4.00	4.50	3.00	3.50	4.00	4.50
T-5³	ÚLTIMO	FLEXIÓN	4,45	2,59			4,84	2,85	1,56		5,03	2,97	1,63	
		CORTANTE	17,4	14,5	12,4	10,7	18,5	15,5	13,2	11,4	19,1	16,0	13,7	11,8
	SERVICIO	TENSIONES NORMALES	18,3	12,6	8,8	6,2	20,3	14,0	9,9	7,1	22,1	15,3	10,8	7,8
		DEFORMACIÓN	20,4	11,6	6,4	3,3	24,1	14,0	8,1	4,5	27,4	16,0	9,5	5,4
T-5⁵	ÚLTIMO	FLEXIÓN	8,24	5,37	3,51	2,24	8,94	5,86	3,87	2,50	9,31	6,12	4,04	2,62
		CORTANTE	17,4	14,5	12,4	10,7	18,5	15,5	13,2	11,4	19,1	16,0	13,7	11,8
	SERVICIO	TENSIONES NORMALES	21,7	15,0	10,7	7,7	24,0	16,7	11,9	8,7	25,8	18,0	12,9	9,4
		DEFORMACIÓN	24,8	14,8	8,9	5,2	28,9	17,5	10,8	6,6	32,2	19,6	12,2	7,6
T-3¹:5²	ÚLTIMO	FLEXIÓN	3,10	1,60			3,39	1,78			3,52	1,86		
		CORTANTE	17,4	14,5	12,4	10,7	18,5	15,5	13,2	11,4	19,1	16,0	13,7	11,8
	SERVICIO	TENSIONES NORMALES	17,2	11,8	8,2	5,8	19,1	13,1	9,2	6,5	20,9	14,4	10,2	7,3
		DEFORMACIÓN	19,0	10,5	5,7	2,6	22,5	12,8	7,2	3,8	25,9	14,9	8,6	4,8
T-3³:5²	ÚLTIMO	FLEXIÓN	4,62	2,71			5,02	2,98	1,66		5,22	3,11	1,74	
		CORTANTE	17,4	14,5	12,4	10,7	18,5	15,5	13,2	11,4	19,1	16,0	13,7	11,8
	SERVICIO	TENSIONES NORMALES	18,5	12,7	8,9	6,3	20,5	14,1	10,0	7,1	22,2	15,4	10,9	7,9
		DEFORMACIÓN	20,6	11,7	6,6	3,4	24,3	14,1	8,2	4,6	27,6	16,2	9,6	5,5
T-3²:5³	ÚLTIMO	FLEXIÓN	5,89	3,65	2,19		6,39	3,99	2,44		6,65	4,16	2,54	
		CORTANTE	17,4	14,5	12,4	10,7	18,5	15,5	13,2	11,4	19,1	16,0	13,7	11,8
	SERVICIO	TENSIONES NORMALES	19,5	13,4	9,5	6,8	21,6	15,0	10,6	7,6	23,4	16,2	11,6	8,4
		DEFORMACIÓN	22,0	12,7	7,3	4,0	25,8	15,2	9,1	5,2	29,1	17,3	10,5	6,2

NOTAS:

- 1) La celda en verde indica que la prelosa no debe emplearse en las longitudes en que se aplica el color
- 2) La celda en rojo define la máxima sobrecarga viva que admite la prelosa en cada longitud



TABLA PARA LA SELECCIÓN DE LA PRELOSA ADECUADA A PARTIR DE LA SOBRECARGA VIVA QUE CONSIDERE EL PROYECTO (ES ADICIONAL A UNA CARGA IMPUESTA DE 1kN/m²)			ACERO: $f_{pu} = 1860MPa$ CARPETA: 20mm								TABLA 5.5			
			SOBRECARGA VIVA MÁXIMA (kN/m²)											
			PPCC: 6/60:30				PPCC: 6/60:35				PPCC: 6/60:40			
ACERO	ESTADO LÍMITE	CATEGORÍA	3.00	3.50	4.00	4.50	3.00	3.50	4.00	4.50	3.00	3.50	4.00	4.50
T-5³	ÚLTIMO	FLEXIÓN	2,94	1,57			3,35	1,85			3,55	1,98		
		CORTANTE	12,4	10,3	8,8	7,5	13,5	11,3	9,6	8,3	14,2	11,8	10,0	8,7
	SERVICIO	TENSIONES NORMALES	11,4	7,6	5,1	3,4	13,0	8,8	6,0	4,1	14,5	9,8	6,8	4,7
		DEFORMACIÓN	9,4	4,6	1,9	0,2	12,0	6,4	3,1	1,1	14,2	7,8	4,0	1,7
T-5⁵	ÚLTIMO	FLEXIÓN	5,44	3,42	2,10		6,17	3,93	2,47		6,57	4,19	2,65	1,60
		CORTANTE	12,4	10,3	8,8	7,5	13,5	11,3	9,6	8,3	14,2	11,8	10,0	8,7
	SERVICIO	TENSIONES NORMALES	13,8	9,3	6,5	4,5	15,7	10,8	7,5	5,3	17,3	11,8	8,3	5,9
		DEFORMACIÓN	12,2	6,7	3,5	1,4	15,3	8,8	4,9	2,5	17,5	10,1	5,9	3,2
T-3¹:5²	ÚLTIMO	FLEXIÓN	1,99				2,30				2,44			
		CORTANTE	12,4	10,3	8,8	7,5	13,5	11,3	9,6	8,3	14,2	11,8	10,0	8,7
	SERVICIO	TENSIONES NORMALES	10,6	7,0	4,7	3,1	12,2	8,1	5,5	3,7	13,6	9,1	6,3	4,3
		EFORMACIÓN	8,5	4,0	1,4	-0,2	11,0	5,6	2,5	0,6	13,2	7,0	3,5	1,3
T-3³:5²	ÚLTIMO	FLEXIÓN	3,05	1,66			3,47	1,95			3,69	2,08		
		CORTANTE	12,4	10,3	8,8	7,5	13,5	11,3	9,6	8,3	14,2	11,8	10,0	8,7
	SERVICIO	TENSIONES NORMALES	11,5	7,6	5,2	3,5	13,1	8,9	6,1	4,1	14,6	9,9	6,8	4,7
		DEFORMACIÓN	9,5	4,7	2,0	0,2	12,2	6,5	3,2	1,1	14,4	7,9	4,1	1,8
T-3²:5³	ÚLTIMO	FLEXIÓN	3,91	2,29			4,44	2,66	1,50		4,72	2,83	1,61	
		CORTANTE	12,4	10,3	8,8	7,5	13,5	11,3	9,6	8,3	14,2	11,8	10,0	8,7
	SERVICIO	TENSIONES NORMALES	12,2	8,2	5,6	3,8	14,0	9,5	6,5	4,5	15,5	10,5	7,3	5,1
		DEFORMACIÓN	10,4	5,4	2,5	0,6	13,2	7,2	3,8	1,6	15,4	8,6	4,7	2,2

NOTAS:

- 1) La celda en verde indica que la prelosa no debe emplearse en las longitudes en que se aplica el color
- 2) La celda en rojo define la máxima sobrecarga viva que admite la prelosa en cada longitud



TABLA PARA LA SELECCIÓN DE LA PRELOSA ADECUADA A PARTIR DE LA SOBRECARGA VIVA QUE CONSIDERE EL PROYECTO (ES ADICIONAL A UNA CARGA IMPUESTA DE 1kN/m²)			ACERO: $f_{pu} = 1860MPa$ CARPETA: 30mm								TABLA 5.6			
			SOBRECARGA VIVA MÁXIMA (kN/m²)											
			PPCC: 6/60:30				PPCC: 6/60:35				PPCC: 6/60:40			
ACERO	ESTADO LÍMITE	CATEGORÍA	3.00	3.50	4.00	4.50	3.00	3.50	4.00	4.50	3.00	3.50	4.00	4.50
T-5³	ÚLTIMO	FLEXIÓN	3,85	2,20			4,26	2,48			4,47	2,60		
		CORTANTE	14,9	12,4	10,6	9,1	16,0	13,4	11,4	9,9	14,2	11,8	10,0	8,7
	SERVICIO	TENSIONES NORMALES	14,8	10,0	6,9	4,8	16,6	11,4	7,9	5,6	18,3	12,6	8,8	6,2
		DEFORMACIÓN	14,5	7,9	4,0	1,6	17,7	10,0	5,5	2,7	20,4	11,7	6,6	3,5
T-5⁵	ÚLTIMO	FLEXIÓN	7,05	4,55	2,93	1,81	7,79	5,07	3,30	2,09	8,18	5,33	3,48	2,21
		CORTANTE	14,9	12,4	10,6	9,1	16,0	13,4	11,4	9,9	14,2	11,8	10,0	8,7
	SERVICIO	TENSIONES NORMALES	17,8	12,2	8,6	6,1	19,9	13,8	9,8	7,0	21,7	15,0	10,7	7,7
		DEFORMACIÓN	18,2	10,6	6,1	3,3	21,8	13,0	7,8	4,5	24,6	14,7	9,0	5,3
T-3¹:5²	ÚLTIMO	FLEXIÓN	2,67				2,98	1,53			3,12	1,61		
		CORTANTE	14,9	12,4	10,6	9,1	16,0	13,4	11,4	9,9	14,2	11,8	10,0	8,7
	SERVICIO	TENSIONES NORMALES	13,9	9,3	6,4	4,4	15,6	10,6	7,3	5,1	17,2	11,8	8,2	5,8
		DEFORMACIÓN	13,4	7,0	3,4	1,1	16,4	9,0	4,7	2,1	19,1	10,7	5,9	2,9
T-3³:5²	ÚLTIMO	FLEXIÓN	3,99	2,30			4,42	2,59			4,63	2,72		
		CORTANTE	14,9	12,4	10,6	9,1	16,0	13,4	11,4	9,9	14,2	11,8	10,0	8,7
	SERVICIO	TENSIONES NORMALES	14,9	10,1	7,0	4,9	16,8	11,5	8,0	5,6	18,5	12,7	8,9	6,3
		DEFORMACIÓN	14,7	8,0	4,1	1,7	17,9	10,1	5,6	2,8	20,6	11,8	6,7	3,6
T-3²:5³	ÚLTIMO	FLEXIÓN	4,76	2,82	1,56		5,61	3,47	2,08		5,89	3,65	2,19	
		CORTANTE	14,9	12,4	10,6	9,1	16,0	13,4	11,4	9,9	14,2	11,8	10,0	8,7
	SERVICIO	TENSIONES NORMALES	15,9	10,8	7,5	5,3	17,8	12,2	8,6	6,1	19,5	13,5	9,5	6,8
		DEFORMACIÓN	15,9	8,9	4,8	2,2	19,2	11,0	6,3	3,4	21,9	12,8	7,5	4,2

NOTAS:

- 1) La celda en verde indica que la prelosa no debe emplearse en las longitudes en que se aplica el color
- 2) La celda en rojo define la máxima sobrecarga viva que admite la prelosa en cada longitud



TABLA PARA LA SELECCIÓN DE LA PRELOSA ADECUADA A PARTIR DE LA SOBRECARGA VIVA QUE CONSIDERE EL PROYECTO (ES ADICIONAL A UNA CARGA IMPUESTA DE 1kN/m²)			ACERO: $f_{pu} = 1860MPa$ CARPETA: 40mm								TABLA 5.7			
			SOBRECARGA VIVA MÁXIMA (kN/m²)											
			PPCC: 6/60:30				PPCC: 6/60:35				PPCC: 6/60:40			
ACERO	ESTADO LÍMITE	CATEGORÍA	3.00	3.50	4.00	4.50	3.00	3.50	4.00	4.50	3.00	3.50	4.00	4.50
T-5³	ÚLTIMO	FLEXIÓN	4,76	2,82	1,56		5,18	3,10	1,75		5,38	3,23	1,83	
		CORTANTE	17,4	14,5	12,4	10,7	18,5	15,5	13,2	11,4	19,1	16,0	13,7	11,8
	SERVICIO	TENSIONES NORMALES	18,6	12,7	9,0	6,4	20,6	14,2	10,0	7,2	22,4	15,5	11,0	7,9
		DEFORMACIÓN	20,7	11,8	6,6	3,4	24,4	14,2	8,3	4,6	27,8	16,3	9,7	5,6
T-5⁵	ÚLTIMO	FLEXIÓN	8,67	5,69	3,76	2,43	9,41	6,21	4,14	2,71	9,81	6,48	4,32	2,84
		CORTANTE	17,4	14,5	12,4	10,7	18,5	15,5	13,2	11,4	19,1	16,0	13,7	11,8
	SERVICIO	TENSIONES NORMALES	22,1	15,4	11,0	7,9	24,4	17,0	12,2	8,9	26,3	18,3	13,2	9,6
		DEFORMACIÓN	25,4	15,2	9,2	5,5	29,5	18,0	11,2	6,9	32,8	20,0	12,6	7,9
T-3¹:5²	ÚLTIMO	FLEXIÓN	3,36	1,79			3,66	1,99			3,81	2,07		
		CORTANTE	17,4	14,5	12,4	10,7	18,5	15,5	13,2	11,4	19,1	16,0	13,7	11,8
	SERVICIO	TENSIONES NORMALES	17,4	11,9	8,3	5,9	19,4	13,3	9,3	6,6	21,1	14,5	10,3	7,4
		DEFORMACIÓN	19,3	10,7	5,8	2,8	22,8	13,0	7,4	3,9	26,1	15,1	8,8	4,9
T-3³:5²	ÚLTIMO	FLEXIÓN	4,93	2,95	1,66		5,36	3,24	1,86		5,58	3,37	1,94	
		CORTANTE	17,4	14,5	12,4	10,7	18,5	15,5	13,2	11,4	19,1	16,0	13,7	11,8
	SERVICIO	TENSIONES NORMALES	18,7	12,8	9,0	6,4	20,7	14,3	10,1	7,3	22,5	15,6	11,1	8,0
		DEFORMACIÓN	20,9	11,9	6,8	3,5	24,6	14,4	8,4	4,7	28,0	16,5	9,8	5,7
T-3²:5³	ÚLTIMO	FLEXIÓN	6,25	3,91	2,40		6,79	4,28	2,66	1,54	7,06	4,46	2,77	1,62
		CORTANTE	17,4	14,5	12,4	10,7	18,5	15,5	13,2	11,4	19,1	16,0	13,7	11,8
	SERVICIO	TENSIONES NORMALES	19,9	13,7	9,7	6,9	22,0	15,2	10,8	7,8	23,8	16,5	11,8	8,5
		DEFORMACIÓN	22,4	13,0	7,6	4,2	26,3	15,6	9,3	5,4	29,6	17,7	10,7	6,4

NOTAS:

- 1) La celda en verde indica que la prelosa no debe emplearse en las longitudes en que se aplica el color
- 2) La celda en rojo define la máxima sobrecarga viva que admite la prelosa en cada longitud

5.3 CONCLUSIONES FINALES

- 1) La atención que va teniendo el desarrollo de programas de vivienda de interés social en el Ecuador justifica que se analicen variantes estructurales que mejoren su durabilidad y sus índices técnico económicos. Si estas reglas se aplican a la concepción del elemento estructural “losa” la intención es más loable por lo que significa la superficie de obra a construir. La **prefabricación** a pequeña o mediana escala y la introducción del **pretensado** están demostrando a nivel mundial que, ignorarlas como técnica, puede frenar y a la vez encarecer cada vez más este desarrollo.
- 2) La tradición ha hecho ver al **pretensado** como una técnica privativa de grupos sociales económicamente sólidos, o de proyectos de tal envergadura que limiten el empleo de las soluciones tradicionales de hormigón armado, sin embargo, en las últimas décadas han comenzado a aparecer interesantes propuestas con esta técnica que ofrecen respuestas de apreciable interés para la solución de entresijos y cubiertas en los programas de vivienda. La prelosa **PPCC** que se presenta como resultado final de esta investigación es un buen ejemplo de cómo el pretensado, introducido mediante una tecnología manual que prescinde de los costosos gatos y que puede ser transferible a la Ciudad de Loja, representa un buen ejemplo de todo cuanto puede hacerse en esta dirección.
- 3) Las probadas ventajas de la **prefabricación** en Plantas Industriales de elementos pretensados deben ser aprovechadas en la elaboración de losas que permitan agilizar los procesos de ejecución de las viviendas. La prelosa **PPCC**, concebida a partir de los principios de la construcción evolutiva, es una alternativa que debe ser considerada en la región pues, además de la reducción en costo de acero e incremento de la durabilidad, con ella se elimina prácticamente el empleo de la madera de encofrado.
- 4) La solución que se propone para resolver el sistema estructural de entresijo o cubierta para los programas de desarrollo de la vivienda, resulta viable técnica y económicamente, confirmando la posibilidad de aplicar la técnica del preesfuerzo sin requerir de las elevadas erogaciones que caracterizan la inversión inicial que exige esta técnica.
- 5) Parece más aconsejable la variante de Planta de 18 líneas de producción, con el fin de asegurar cada **11 meses** de labor la producción de la cubierta de aproximadamente **180 viviendas** de 60m² de un nivel, o de **90 viviendas** de dos niveles con igual superficie, sólo con una Planta y el mínimo equipamiento.
- 6) Si la demanda local lo justifica, estos resultados se pueden incrementar anualmente tantas veces como Plantas se decidan construir, contribuyendo así a la solución progresiva de la incuestionable necesidad de viviendas latente en nuestra región, con una solución estructural que posee, además, las ventajas adicionales que ya se anunciaron al inicio del trabajo (mayor durabilidad, mínimo requerimiento de madera, disminución de los costos directos de acero, etc.)

- 7) El Trabajo profundiza en la evaluación de las pérdidas de tensión del acero pretensado debido a la inexistencia de antecedentes en el mercado de esta tecnología (PPCC). La intención: proporcionar indicadores a los futuros usuarios que permitan una pronta y precisa estimación de las pérdidas, tanto iniciales como diferidas. Los indicadores que se proponen son los siguientes:

$\chi_i = 0.05$ (5%) Estimador para las **pérdidas iniciales**

$\chi_d = 0.10$ (10%) Estimador para las **pérdidas diferidas**

- 8) El proceso constructivo con esta tecnología, empleada tanto en losas de entrepiso como de cubierta, se caracteriza en lo fundamental por el vaciado “in situ” de una carpeta de hormigón que mejora la aptitud de la solución integrada. El estudio realizado acerca de la necesidad de apuntalar la prelosa para garantizar el cumplimiento de las bases de cálculo de los Estados Límites, lo mismo Últimos que de Servicio, permite concluir que **en ningún caso se requiere más de un puntal**, el que debe ser ubicado en el centro de la longitud del elemento. El usuario de esta tecnología puede considerar siempre el empleo de este elemento temporal de apoyo, aun cuando la variante de prelosa a emplear no lo requiera, sin embargo, si decidiera analizar la posibilidad de prescindir de apuntalamiento alguno, debe recurrir a la información que ofrece la **Tablas 5.1**.
- 9) Como resultado de la investigación se cuenta con un surtido de 90 variantes diferentes que pueden adaptarse a las singularidades de una gama amplia de proyectos, con sólo variar el espesor de la propia prelosa, de la carpeta y de la tipología de armado.
- 10) Como se esperaba, las Tablas de Selección que se incluyen este Capítulo confirman que el Estado Límite de Flexión es el más restrictivo de todos cuanto se analizaron, por el carácter superficial del elemento que se analiza. Para todas las tipologías de losa y espesores de carpeta, la sobrecarga límite por Flexión es sensiblemente inferior a la de los restantes Estados Límites.
- 11) Se han elaborado cuatro Libros Electrónicos en EXCEL que facilitarían a los futuros usuarios de esta Tecnología, el análisis de nuevas variantes que puedan dar respuesta a proyectos muy especiales que no puedan ser cubiertos con la amplia biblioteca de elementos que fueron analizados a lo largo de esta investigación.



5.4 RECOMENDACIONES

- 1) Impulsar un Taller en la Ciudad promovido por los Colegios de Arquitectura e Ingeniería Civil en el que pueda debatirse la conveniencia de modular los proyectos de vivienda en la Región, con el fin de propiciar la introducción paulatina de la prefabricación en los programas de vivienda. De llegar a comprenderse la importancia de esta propuesta, que no frenaría en lo absoluto lo que tradicionalmente se viene haciendo, se justificaría adoptar un micromódulo de 500mm que conllevaría a establecer luces múltiplos de dicho valor, es decir, para el caso de viviendas populares de $(6 \times 0.5m = 3.00m)$, $(7 \times 0.50m = 3.50m)$, $(8 \times 0.50m = 4.00m)$, $(9 \times 0.50m = 4.50m)$, etc.
- 2) Realizar un ensayo a escala real del elemento estudiado para comprobar la precisión de los modelos analíticos que han sido empleados a lo largo de esta Investigación. El [ANEXO 5](#) expone el procedimiento para diseñar e instrumentar estos ensayos.

BIBLIOGRAFÍA.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA

ÁREA DE LA ENERGÍA, LAS INDUSTRIAS Y LOS RECURSOS
NATURALES NO RENOVABLES



LIBROS

- ❖ ACI Committee 318, **“Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (ACI 318R-08)”**, American Concrete Institute, 2008.
- ❖ AIDEPLA-2004. **“Proyecto y ejecución de elementos resistentes con alveoplaca”**. España.-2004.
- ❖ Calavera Ruíz, José **“Cálculo, construcción, patología y rehabilitación de forjados de edificaciones unidireccionales y sin vigas”**. Madrid: 5ta Edición, INTEMAC, 2003.- 1025p.
- ❖ Calavera, José. **“Proyecto y cálculo de estructuras de hormigón”**. Tomos I y II. INTEMAC.S.A. España. 1999.
- ❖ CTA Technical Bulletin 74-B6. **“Composite Systems without Roughness”**. 6/1974. 46p.
- ❖ CTA Technical Bulletin 76-B4. **“Composite Systems without Ties. Concrete technology associates”**. 4/1976. 43p.
- ❖ EFHE: **“Instrucción para el proyecto y la ejecución de forjados unidireccionales de hormigón estructural realizados con elementos prefabricados”**. Madrid. España. 7/2002. 48p.
- ❖ EHE-08: **“Instrucción de hormigón estructural. Ministerio de Fomento”**. Madrid. 2008.
- ❖ Eurocode 2: **“Design of concrete structures. General rules and rules for building”**. 12/2004. 225p.
- ❖ FIP: **“Guide to good practice. Composite floor structures”**. FIP. 1998.-58p.
- ❖ Guyon ,Y.: **“ Hormigón Pretensado. Estudio Teórico y Experimental”**. Ed. Dossat. Madrid. 1965.
- ❖ Lorenzo, Pedro **“Introducción al Sistema del Techo. Panorama de Soluciones de Techo y Entrepiso en América Latina”** CYTED. Barcelona. España. 2000.
- ❖ **“Manual para el diseño y selección de losas huecas pretensadas extrusadas”**. Ciudad de La Habana. Cuba. 2007.
- ❖ **“Manual para la selección de losas huecas pretensadas a flexión simple”**. CTDM. Ciudad de La Habana. Cuba. 1991.
- ❖ Maspons, Ricardo **“Prefabricación”** Ed. ENPES. ISPJAE. Cuba. 1989
- ❖ Medina Sánchez, L. **“Prefabricación Ligera”**. Monografía para la Maestría en Estructuras y Materiales. Universidad Mayor de San Andrés. Facultad de Ingeniería. La Paz. Bolivia. 2002
- ❖ Medina Sánchez, L., et.al. **“Sistemas Constructivos Utilizados en Cuba”** Ed. ENPES. ISPJAE. Cuba. 1987



BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

- ❖ NR 082:2004 **“Cálculo de losas compuestas con láminas de acero como encofrado colaborante sometidas a cargas estáticas. Código de buenas prácticas”**. Ciudad de La Habana. Cuba. 2007. 34p.
- ❖ PCI: **“Design Handbook”**. 5th Edition. Chicago, Precast/Prestressed Concrete Institute. 1999. 630p.
- ❖ PCI: **“Manual for the design of hollow core slabs”**. Second Edition. PCI. 1998. 22p.

REVISTAS

- ❖ **“hormi2”** Catálogo del Sistema.
- ❖ **“NOVALOSA. Placa colaborante de Acero”** Documento divulgativo de la Cámara de la Construcción de Loja.
- ❖ **“Revista de la Cámara de la Construcción de Loja”**. Loja. Ecuador. Agosto 2008
- ❖ Suarez, M e Iglesias, J.M. **“Comportamiento a flexión de las vigas de sección compuesta”**. Revista Ing. Civil No. 3 y 5. Ciudad de La Habana. Cuba. 1983. pp. 401-426.
- ❖ Suarez, M e Iglesias, J.M. **“Comportamiento de los elementos de unión en piezas prefabricadas de hormigón armado y pretensado”**. Revista Investigación-Construcción, No. 8. Ciudad de La Habana. Cuba. 1990. pp.17-32. 1990.

TESIS

- ❖ Hernández Sampieri, R., et.al. **“Metodología de la Investigación”**. 3ra Edición. McGraw-Hill Interamericana. Chile. ISBN 970-10-3632-8. **2004**.
- ❖ Hernández Caneiro, J.A. **“Diseño Avanzado de Hormigón Pretensado”**. Monografía para la Maestría en Estructuras y Materiales. Universidad Mayor de San Andrés. Facultad de Ingeniería. La Paz. Bolivia. 2002.
- ❖ Iraola V. **“Diseño de estructuras compuestas con losas huecas pretensadas prefabricadas y losa “in situ”, sometidas a flexión bajo la acción de cargas estáticas”**. Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas. Ciudad de La Habana Cuba. 2009

PÁGINA WEB

- ❖ <http://www.hormi2.com>



UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA

ÁREA DE LA ENERGÍA, LAS INDUSTRIAS Y LOS
RECURSOS NATURALES NO RENOVABLES



El Rol de la Prefabricación Abierta y el Pretensado y su potencial dentro del Sector de la Vivienda Social.

**Una Propuesta para la solución del Sistema Estructural Horizontal de la
Vivienda**

AUTOR: Ing. Bolívar Hernán Maza

DIRECTOR: Dr. Ing. Julio Alberto Hernández Caneiro

ANEXOS

Loja. 2013

ANEXO 1

ESTUDIO PARAMÉTRICO PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE LA PRELOSA

Loja. 2013

A1.1 INTRODUCCIÓN

Se incluye en este Anexo un resumen de los estudios paramétricos pre-proyecto para definir las dimensiones de la sección transversal de la prelosa: ancho (b), cantidad de semicírculos (n_{sc}), radio de los mismos (h_2) y espesor de la prelosa por debajo de dichos semicírculos (h_1), con el fin de asegurar un peso del elemento que garantice su manipulación sin requerir equipos profesionales de izaje (grúas), y a la vez propiedades mecánicas que aseguren su resistencia y serviciabilidad (fisuración y deformación), especialmente dentro de las dos fases o etapas de carga en las que esta sección es exclusivamente la resistente: al transferir el pretensado y durante el vaciado de la carpeta en obra.

A1.2 DEFINICIÓN DE LAS DIMENSIONES DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL DE HORMIGÓN

ANCHO DE LA SECCIÓN

Esta dimensión responde básicamente a la modulación que exista o se establezca para los programas VIS en los que se desee emplear la solución **PPCC**. En estos programas es internacionalmente frecuente considerar micromódulos de 500mm, es decir, asegurar una red a eje cuyas dimensiones sean múltiplos de dicho valor (Ver **Figura A1.1**).

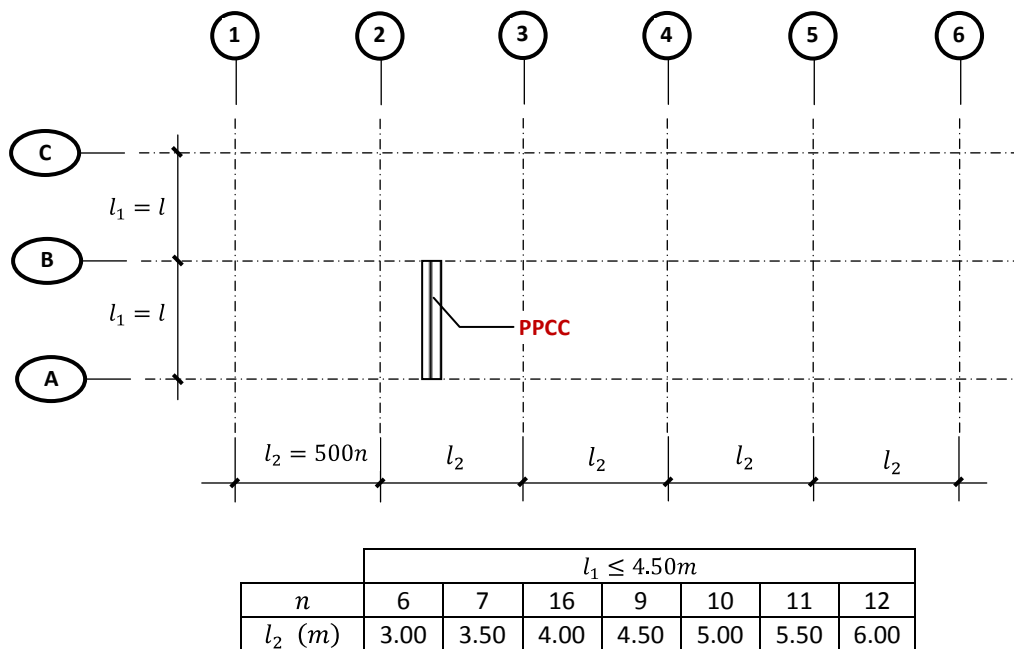


Fig. A1.1 Red Modular deseada para los programas VIS que empleen la prelosa

En esta investigación se fijó un ancho nominal para la prelosa $b = 500mm$, es decir, una vez el micromódulo que se ha adoptado, de manera que en una longitud de 3.00m entrarían 6 unidades, en la de 3.50m, 7 unidades, mientras que en la 4.00m, 8 unidades. No obstante el ancho real de la prelosa se lleva a $b = 495mm$ con el fin de asegurar una tolerancia de montaje de 10mm, propia de las exigencias de la prefabricación.

CANTIDAD Y DIÁMETRO DE LOS DEPRIMIDOS LONGITUDINALES

Los deprimidos longitudinales de la prelosa consisten en la extrusión de cierta cantidad de semicírculos que deben practicarse durante el proceso de fabricación en Planta del elemento, con el fin de restar volumen de hormigón y con ello disminuir peso, pero también para crear una interfase lo suficientemente rugosa como para mejorar la adherencia entre el hormigón de la propia prelosa y el de la carpeta que luego se vacía en obra.

Desde que se iniciara la investigación, se analizaron dos alternativas en cuanto a cantidad de semicírculos que debía poseer la prelosa:

VARIANTE 1: 5 semicírculos interiores y dos cuartos de círculo (uno a cada extremo)
($n_{sc} = 6$)

VARIANTE 2: 6 semicírculos interiores y dos cuartos de círculo (uno a cada extremo)
($n_{sc} = 7$)

La **Figura A1.2** revela estas dos variantes.

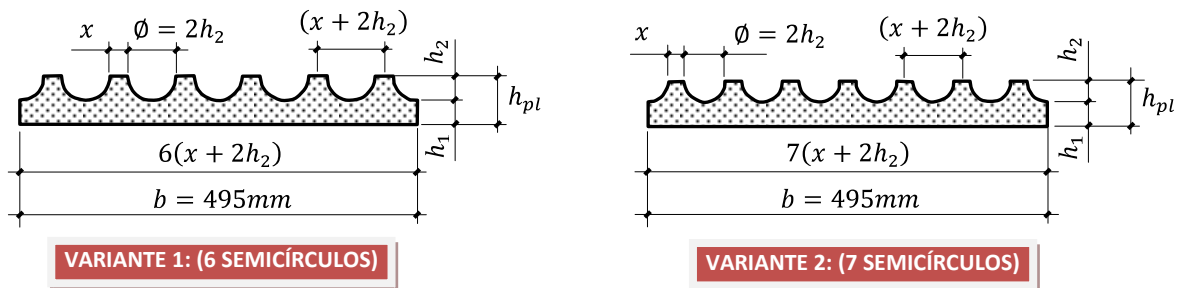


Fig. A1.2 Sección transversal de la prelosa PPCC

Para la **Variante 1:** $b = 6(x + \varnothing) \Rightarrow x = b/6 - \varnothing$

Para la **Variante 2:** $b = 7(x + \varnothing) \Rightarrow x = b/7 - \varnothing$

Para el valor de b fijado en 495mm, la **Tabla A1.1** ofrece el resultado del estudio paramétrico que se realizara para estas dos variables: \varnothing y x .

Tabla A1.1 Valores de x correspondientes a diferentes diámetros de extrusado.

VARIANTE 1 ($n_{sc} = 6$)		
$b = 495mm$		
\emptyset	h_2	x
30	15.0	52.5
35	17.5	47.5
40	20.0	42.5
45	22.5	37.5
50	25.0	32.5
55	27.5	27.5
60	30.0	22.5

VARIANTE 2 ($n_{sc} = 7$)		
$b = 495mm$		
\emptyset	h_2	x
30	15.0	40.71
35	17.5	35.71
40	20.0	30.71
45	22.5	25.71
50	25.0	20.71
55	27.5	15.71
60	30.0	10.71

La decisión de la alternativa más adecuada dependerá mucho del peso que se alcance con cada una, para lo cual se debe completar el predimensionamiento de la sección.



ESPESOR POR DEBAJO DE LOS DEPRIMIDOS LONGITUDINALES

El principio de las secciones compuestas propias de la construcción evolutiva exige asegurar que la sección resistente primaria (generalmente prefabricada), sea estrictamente la necesaria, de manera que con la carpeta vaciada luego, se complete la capacidad resistente que se requiera. La variabilidad de las luces de trabajo en que puede ser empleada la prelosa, y también la posible variabilidad de las cargas de servicio que reconozca el programa de vivienda en que se inserte esta solución, condujo al estudio de tres espesores h_1 diferentes, a saber: $h_{1(1)} = 30mm$, $h_{1(2)} = 35mm$ y $h_{1(3)} = 40mm$.

Estos valores representan sólo una propuesta inicial, el desarrollo de la investigación que se resume en el Capítulo III de la Tesis referido al análisis estructural del elemento, permitirá decidir la competencia de cada uno y descartar aquellos que no resulten aptos.

Con esos valores se puede completar el área de la sección transversal (A_{pl}) de las 14 variantes que se presentaron en la **Tabla A1.1**, siete por cada variante en estudio, y definir así el peso por metro lineal (P_{pl}) de cada una, siendo:

$$A_{pl} = b \cdot h_{pl} - n_{sc} \left(\frac{\pi \emptyset^2}{8} \right)$$

$$P_{pl} = w_{c(pl)} \cdot A_{pl} = 2400 \frac{kg}{m^3} (A_{pl})$$

Tabla A1.2 Peso por metro lineal de las siete prelosas en estudio dentro de la **Variante 1**

VARIANTE 1 ($n_{sc} = 6$)									
$b = 495mm$, $h_{pl} = (h_{1i} + \phi_i/2)/1000$									
ϕ_i (mm)	$h_{1(1)} = 30mm$			$h_{1(2)} = 35mm$			$h_{1(3)} = 40mm$		
	h_{pl} (m)	A_{pl} (m ²)	P_{pl} (kg/m)	h_{pl} (m)	A_{pl} (m ²)	P_{pl} (kg/m)	h_{pl} (m)	A_{pl} (m ²)	P_{pl} (kg/m)
30	0.0450	0.02015	48.37	0.0500	0.02263	54.31	0.0550	0.02510	60.25
35	0.0475	0.02063	49.50	0.0525	0.02310	55.44	0.0575	0.02558	61.38
40	0.0500	0.02098	50.35	0.0550	0.02346	56.29	0.0600	0.02593	62.23
45	0.0525	0.02122	50.92	0.0575	0.02369	56.86	0.0625	0.02617	62.80
50	0.0550	0.02133	51.20	0.0600	0.02381	57.14	0.0650	0.02628	63.08
55	0.0575	0.02134	51.20	0.0625	0.02381	57.14	0.0675	0.02629	63.08
60	0.0600	0.02122	50.92	0.0650	0.02369	56.86	0.0700	0.02617	62.80

Tabla A1.3 Peso por metro lineal de las siete prelosas en estudio dentro de la **Variante 2**

VARIANTE 2 ($n_{sc} = 7$)									
$b = 495mm$, $h_{pl} = (h_1 + \phi_i/2)/1000$									
ϕ_i (mm)	$h_{1(1)} = 30mm$			$h_{1(2)} = 35mm$			$h_{1(3)} = 40mm$		
	h_{pl} (m)	A_{pl} (m ²)	P_{pl} (kg/m)	h_{pl} (m)	A_{pl} (m ²)	P_{pl} (kg/m)	h_{pl} (m)	A_{pl} (m ²)	P_{pl} (kg/m)
30	0.0450	0.01980	47.52	0.0500	0.02228	53.46	0.0550	0.02475	59.40
35	0.0475	0.02015	48.35	0.0525	0.02262	54.29	0.0575	0.02510	60.23
40	0.0500	0.02035	48.84	0.0550	0.02283	54.78	0.0600	0.02530	60.72
45	0.0525	0.02042	49.01	0.0575	0.02290	54.95	0.0625	0.02537	60.89
50	0.0550	0.02035	48.85	0.0600	0.02283	54.79	0.0650	0.02530	60.73
55	0.0575	0.02015	48.35	0.0625	0.02262	54.29	0.0675	0.02510	60.23
60	0.0600	0.01980	47.53	0.0650	0.02228	53.47	0.0700	0.02475	59.41


RESTRICCIÓN DE LA LONGITUD DE LA PRELOSA POR PESO

Ya se ha argumentado que una de las principales restricciones consideradas en esta investigación para definir las dimensiones de la sección transversal de hormigón en la prelosa, es su peso total en las luces en las que el elemento puede ser empleado, asegurando siempre que su manipulación sea factible hasta su colocación en obra sin requerir equipos izajes. Si se acepta que la manipulación es posible por debajo de pesos totales de **250kg**, considerando que cuatro personas pueden movilizar la pieza situándose dos a cada lado del elemento, entonces la máxima longitud ($l_{pl(max)}$) que debe fijarse para cada variante queda regida por la condición:

$$P_{pl} \cdot l_{pl(max)} \leq 250kg \Rightarrow l_{pl(max)} \leq 250kg/P_{pl}$$

Las **Tablas A1.4** y **A1.5** resumen la máxima longitud que debe proponerse para cada variante dentro de la restricción fijada.

Tabla A1.4 Longitud máxima de las siete prelosas en estudio dentro de la **Variante 1**

VARIANTE 1 ($n_{sc} = 6$)						
$b = 495mm$, $l_{pl(max)} \leq 300kg/P_{pl}$						
	$h_{1(1)} = 30mm$		$h_{1(2)} = 35mm$		$h_{1(3)} = 40mm$	
ϕ_i (mm)	P_{pl} (kg/m)	$l_{pl(max)}$ (m)	P_{pl} (kg/m)	$l_{pl(max)}$ (m)	P_{pl} (kg/m)	$l_{pl(max)}$ (m)
30	48.37	5.168	54.31	4.603	60.25	4.149
35	49.50	5.050	55.44	4.509	61.38	4.073
40	50.35	4.965	56.29	4.441	62.23	4.017
45	50.92	4.910	56.86	4.397	62.80	3.981
50	51.20	4.883	57.14	4.375	63.08	3.963
55	51.20	4.882	57.14	4.375	63.08	3.963
60	50.92	4.909	56.86	4.397	62.80	3.981

Tabla A1.5 Longitud máxima de las siete prelosas en estudio dentro de la **Variante 2**

VARIANTE 2 ($n_{sc} = 7$)						
$b = 495mm$, $l_{pl(max)} \leq 300kg/P_{pl}$						
	$h_{1(1)} = 30mm$		$h_{1(2)} = 35mm$		$h_{1(3)} = 40mm$	
ϕ_i (mm)	P_{pl} (kg/m)	$l_{pl(max)}$ (m)	P_{pl} (kg/m)	$l_{pl(max)}$ (m)	P_{pl} (kg/m)	$l_{pl(max)}$ (m)
30	47.52	5.261	53.46	4.676	59.40	4.209
35	48.35	5.171	54.29	4.605	60.23	4.151
40	48.84	5.118	54.78	4.563	60.72	4.117
45	49.01	5.101	54.95	4.550	60.89	4.106
50	48.85	5.118	54.79	4.563	60.73	4.117
55	48.35	5.170	54.29	4.605	60.23	4.151
60	47.53	5.260	53.47	4.676	59.41	4.208

Tabla A1.6 Variación de la longitud máxima de la prelosa al pasar de $n_{sc} = 6$ (V1) a $n_{sc} = 7$ (V2)

ϕ_i (mm)	$h_{1(1)} = 30mm$			$h_{1(2)} = 35mm$			$h_{1(3)} = 40mm$		
	$l_{pl(max)}$ (m)			$l_{pl(max)}$ (m)			$l_{pl(max)}$ (m)		
	V1	V2	Δ (%)	V1	V2	Δ (%)	V1	V2	Δ (%)
30	5.168	5.261	1.80	4.603	4.676	1.59	4.149	4.209	1.45
35	5.050	5.171	2.40	4.509	4.605	2.13	4.073	4.151	1.92
40	4.965	5.118	3.08	4.441	4.563	2.75	4.017	4.117	2.49
45	4.910	5.101	3.89	4.397	4.550	3.48	3.981	4.106	3.14
50	4.883	5.118	4.81	4.375	4.563	4.30	3.963	4.117	3.89
55	4.882	5.170	5.90	4.375	4.605	5.26	3.963	4.151	4.74
60	4.909	5.260	7.15	4.397	4.676	6.35	3.981	4.208	5.70



A1.3 CONCLUSIONES

Hasta aquí, y considerando sólo la influencia de las dimensiones de la sección transversal de la prelosa a partir de la cantidad (n_{sc}) y diámetro (\emptyset) de los deprimidos circulares que han de practicarse, y de su espesor (h_1) por debajo de estos deprimidos, se anotan las siguientes conclusiones:

- a) La influencia del diámetro del deprimido en la longitud máxima que puede alcanzarse con la prelosa para asegurar que su peso no supere los $250kg$, es poco significativa, inclinando la decisión al mayor de los diámetros analizados ($\emptyset = 60mm$) para facilitar el proceso de extrusado durante la ejecución de la prelosa.
- b) A igualdad de las restantes variables, un incremento de la cantidad de deprimidos reduce área de hormigón y en consecuencia el peso de la prelosa, pudiéndose alcanzar una mayor longitud dentro del rango de manipulación del elemento.
- c) La diferencia porcentual que se registra en la longitud máxima que asegura la manipulación de la prelosa para las dos alternativas analizadas en cuanto a cantidad de deprimidos ($n_{sc} = 6$ y $n_{sc} = 7$), va de un mínimo de 1.45% a un máximo de 7.15%, lo que permite aseverar que reducir en uno la cantidad de deprimidos, no limita significativamente la longitud máxima que hace manipulable al elemento.
- d) Aun con la Variante 1, que es la que más reduce la longitud máxima de la prelosa, se pueden alcanzar luces que van desde 3.96m hasta 5.17m, es decir, un intervalo que incluye las luces que poseen los espacios de las viviendas económicas.

Si las características mecánicas de la sección resistente (inercia, módulos de resistencia, eficiencia, etc.) se mejoran con la reducción de la cantidad de deprimidos que significa la Variante 1, aspecto que se incluye en el **Anexo 2**, se justificaría adoptar esta variante para garantizar la tipificación del elemento PPCC.

Respecto de la sección de hormigón, sin incluir aun la tipología del acero de refuerzo, se propone una codificación del tipo **PPCC: $n_{sc}/\emptyset : h_1$** , según los siguientes descriptores:

PPCC: Prelosa Pretesada con Carpeta Colaborante

n_{sc}/\emptyset : Cantidad de deprimidos/diámetro del deprimido circular

h_1 : Espesor de la sección por debajo de los deprimidos

Por ejemplo, el código **PPCC: 6/60: 30**, significa:

PPCC: Prelosa Pretesada con Carpeta Colaborante

6/60: Seis deprimidos de 60mm de diámetro (cinco semicírculos y dos cuartos de círculo)

30: Espesor de la sección por debajo de los deprimidos (30mm)

ANEXO 2

SELECCIÓN DE LA TIPOLOGÍA ÓPTIMA DE SECCIÓN TRANSVERSAL DE LA PRELOSA

Loja. 2013



A2.1 INTRODUCCIÓN

En este Anexo se incluyen los análisis numéricos que permitieron decidir la tipología de la sección transversal de la prelosa que se adoptó en la investigación. Fijar esta tipología exigió hallar respuesta a las siguientes interrogantes:

- ¿Qué resulta más ventajoso para mejorar la capacidad resistente de la sección transversal de la prelosa: 6 ó 7 deprimidos, es decir: $n_{sc} = 6$ ó $n_{sc} = 7$?
- Reconociendo que los deprimidos están representados por semicírculos ¿cuál es el diámetro óptimo desde el punto de vista de resistencia y constructivo?

El criterio que se establece para responder a estas interrogantes, es el siguiente:

Durante el estudio de la etapa de servicio de la prelosa bajo el efecto de las cargas características la influencia de las características geométricas de la sección reviste primordial importancia, pero sobre todo la posición del centroide (v_{pl}) y la inercia centroidal (I_{pl}). Como lo que se procura es definir la cantidad de semicírculos que deben practicarse a la losa, con los cuales se reduce su peso (masa de hormigón) procurando no debilitar sensiblemente sus propiedades geométricas, resultó útil definir un coeficiente de eficiencia que reconociera la competitividad del elemento en cada caso: ($n_{sc} = 6$) ó ($n_{sc} = 7$).

Partiendo de que el ancho de la prelosa se ha fijado constante e igual a $b = 495mm$ en todas las variantes, se definirá el coeficiente adimensional ξ que evalúa la eficiencia de la sección a partir de la siguiente razón:

$$\xi = \frac{I_{pl}}{A_{pl} \cdot b^2} \quad (1)$$

Obsérvese que definido de esta manera, el coeficiente ξ indica cuan grande o pequeña es la inercia centroidal de la sección respecto de su área, es decir, del consumo de hormigón que exige su ejecución. La división por el factor (b^2), que adopta un valor constante por la constancia del ancho de la prelosa, tiene el interés de asegurar que el coeficiente ξ sea adimensional.

Las propiedades geométricas que en definitiva serán evaluadas para la sección transversal de la prelosa, son las siguientes:

- ✓ Área neta de la sección (A_{pl})
- ✓ Posición del centroide (v_{pl} , v'_{pl})
- ✓ Momento de Inercia centroidal (I_{pl})
- ✓ Módulos de resistencia correspondientes a las fibras extremas de la sección (W_{pl} , W'_{pl})

Como estas características evaluadas para una sección rectangular son bien conocidas, el criterio que se propone seguir es circunscribir la prelosa en una sección rectangular de igual ancho y altura a la de aquella, y evaluar dichas magnitudes precisamente en la sección rectangular virtual, para luego sustraer a ellas las que corresponden a cada uno de los semicírculos. Por ser el semicírculo una figura menos tratada en la literatura, se definen aquí sus atributos.

A2.2 EXPRESIONES PARA DEDUCIR LAS PROPIEDADES GEOMÉTRICAS DEL SEMICÍRCULO

La **Figura A2.1** ilustra uno de los semicírculos que aparecen en cada prelosa, todos del mismo radio $r = h_2 = \phi/2$.

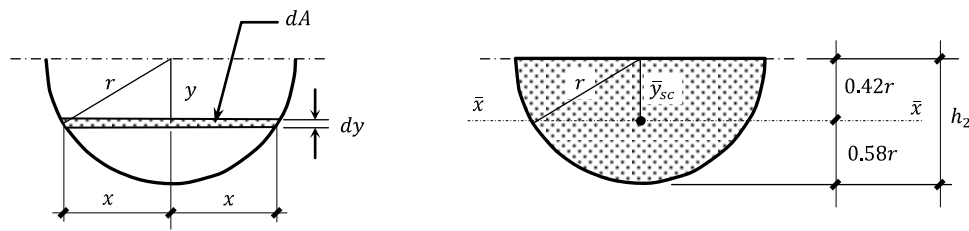


Fig. A2.1 Ubicación del Centroide en uno de los semicírculos de la prelosa

Área de cada Semicírculo

$$A_{sc} = \pi(h_2)^2/2 = 0.5\pi h_2^2 \quad (2)$$

Posición del Centroide de cada Semicírculo

$$\bar{y}_{sc} = S_x/A \quad (\text{Posición del centroide del semicírculo respecto de su diámetro horizontal})$$

Según la **Figura A2.1**:

$$S_x = \int_0^r y dA \quad (\text{Momento Estático del semicírculo respecto de su diámetro horizontal})$$

$$dA = (2x)dy = (2\sqrt{r^2 - y^2})dy \quad (\text{diferencial de área})$$

$$\therefore S_x = \int_0^r 2y(\sqrt{r^2 - y^2}) dy = 2 \left(-\frac{1}{3} \sqrt{(r^2 - y^2)^3} \right) \Big|_0^r = 2 \left(\frac{1}{3} \sqrt{(r^2 - y^2)^3} \right) \Big|_r^0$$

$$S_x = 2r^3/3$$

$$\therefore \bar{y}_{sc} = \frac{2r^3/3}{\pi r^2/2} = 0.42r = 0.42h_2 \quad (3)$$

Inercia Centroidal del Semicírculo

$$I_{\bar{x}} = \int_{-0.58r}^{0.42r} y^2 dA$$

$$I_{\bar{x}} = \int_{-0.58r}^{0.42r} 2y^2 \left(\sqrt{r^2 - y^2} \right) dy = 2 \left(-\frac{y}{4} \sqrt{(r^2 - y^2)^3} \right) + \frac{r^2}{8} \left(y \sqrt{(r^2 - y^2)} + r^2 \arcsen \frac{y}{r} \right) \Big|_0^r$$

$$\therefore I_{\bar{x}} = 0.202r^4 = 0.202(h_2)^4 \quad (4)$$

Definidas así las principales entidades geométricas de los semicírculos que representan los depósitos que se practican a la prelosa durante su ejecución, todas en función de su radio ($r = h_2$), se crean las condiciones para deducir las mismas entidades mecánicas de la prelosa en su conjunto.

A2.3 EXPRESIONES PARA DEDUCIR LAS PROPIEDADES GEOMÉTRICAS DE LA PRELOSA

Área Neta de la Prelosa

$$A_{pl} = bh_{pl} - 0.5n_{sc}\pi h_2^2 \quad (5)$$

Siendo:

$$h_{pl} = h_1 + h_2 \quad (6)$$

Posición del Centroide de la Prelosa

Se determina inicialmente la posición del centroide respecto de la fibra inferior de la prelosa, definida por la variable v'_{pl} , representada en la **Figura A2.2**:

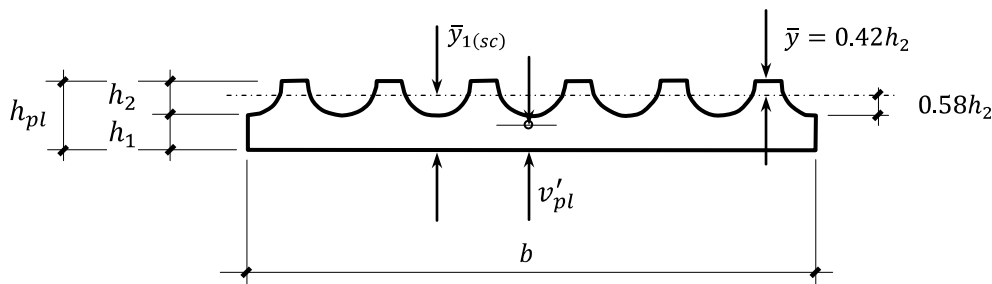


Fig. A2.2 Ubicación del centroide en la Prelosa genérica



$$v'_{pl} = \frac{\sum S_i}{\sum A_i} = \frac{\sum A_i \cdot \bar{y}_i}{\sum A_i} = \frac{\frac{A_{(prelosa)} \cdot \bar{y}_{(prelosa)}}{maciza} - n_{sc} \left[\frac{A_{(sc)} \cdot \bar{y}_{1(sc)}}{maciza} \right]}{\frac{A_{(prelosa)}}{maciza} - n_{sc} [A_{(sc)}]}$$

$$v'_{pl} = \frac{(bh_{pl})(h_{pl}/2) - n_{sc}(\pi h_2^2/2)(\bar{y}_{(sc)})}{bh_{pl} - n_{sc}(\pi h_2^2/2)} = \frac{0.5bh_{pl}^2 - 0.5\pi n_{sc}h_2^2\bar{y}_{1(sc)}}{bh_{pl} - 0.5\pi n_{sc}h_2^2} \quad (7)$$

Siendo:

$$\bar{y}_{1(sc)} = h_{pl} - \bar{y}_{(sc)} = h_{pl} - 0.42h_2 \quad (8)$$

Se verifica que $\bar{y}_{1(sc)}$ es la distancia entre el centroide de los semicírculos a la fibra inferior de la prelosa.

La misma posición del centroide, evaluada ahora respecto de la fibra superior y representada por v_{pl} , viene dada por:

$$v_{pl} = h_{pl} - v'_{pl} \quad (9)$$

Inercia Centroidal de la Prelosa

$$I_{pl} = \left[\bar{I}_{rv} + A_{rv} \left(\frac{h_{pl}}{2} - v'_{pl} \right)^2 \right] - n_{sc} \left[I_{\bar{x}} + A_{sc} (\bar{y}_{1(sc)} - v'_{pl})^2 \right] \quad (10)$$

Siendo:

$\bar{I}_{rv} = bh_{pl}^3/12$ *Inercia Centroidal del rectángulo virtual en el que se inscribe la sección de la prelosa.*

$A_{rv} = bh_{pl}$ *Área del rectángulo virtual en el que se inscribe la sección de la prelosa.*

$I_{\bar{x}} = 0.202(h_2)^4$ *Inercia Centroidal de cada uno de los siete semicírculos que posee la sección de la prelosa.*

$A_{sc} = 0.5\pi h_2^2$ *Área de cada uno de los siete semicírculos que posee la sección de la prelosa.*

Módulos Resistentes de la Sección transversal de la Prelosa

$$\text{Fibra Superior: } W_{pl} = I_{pl}/v_{pl} \quad (11)$$

$$\text{Fibra Inferior: } W'_{pl} = I_{pl}/v'_{pl} \quad (12)$$

Peso por metro lineal de la Prelosa

$$P_{pl} = w_{c(pl)} \cdot A_{pl} \quad (13)$$

Siendo:

$w_{c(pl)}$: Densidad o peso específico del hormigón de la prelosa¹

Deducidas ya las expresiones para evaluar las principales entidades geométricas de la sección transversal de la prelosa, y evaluadas para las mismas dimensiones que se establecieron durante el estudio paramétrico efectuado en el **Anexo 1**, se crean las condiciones para decidir la variante más apropiada de este elemento.

Las **Tablas A2.1** y **A2.2** ofrecen los valores de cada una de estas entidades para las dimensiones que se establecieron en la **Tabla A1.1** del **Anexo 1**, en cuanto a cantidad de semicírculos ($n_{sc} = 6$ ó 7), y diámetro de los mismos ($\varnothing = 30mm, 35mm, \dots, 60mm$), y para un único valor del espesor bajo los semicírculos h_1 , en este caso $h_1 = 30mm$, con el único interés de investigar la influencia de la cantidad de semicírculos, y su diámetro, en la eficiencia de la sección transversal.

Tabla A2.1 Características geométricas de la prelosa **PPCC: 6/Ø: 30**

VARIANTE 1 ($n_{sc} = 6$)									
CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS PARA $(b = 495mm)$ y $(h_1 = 30mm)$									
\varnothing (mm)	h_2 (mm)	h_{pl} (mm)	A_{pl} (mm ²)	v'_{pl} (mm)	v_{pl} (mm)	I_{pl} (mm ⁴)	W_{pl} (mm ³)	W'_{pl} (mm ³)	P_{pl} (kg/m)
30	15.0	45.0	20 154	20.8	24.2	3 082 470	127 351	148 228	48.4
35	17.5	47.5	20 626	21.5	26.0	3 422 225	131 397	159 507	49.5
40	20.0	50.0	20 980	22.0	28.0	3 736 826	133 540	169 723	50.4
45	22.5	52.5	21 216	22.5	30.0	4 008 886	133 504	178 396	50.9
50	25.0	55.0	21 335	22.8	32.2	4 217 162	130 993	184 912	51.2
55	27.5	57.5	21 335	23.0	34.5	4 335 830	125 691	188 482	51.2
60	30.0	60.0	21 218	23.0	37.0	4 333 521	117 261	188 055	50.9

¹ El término $w_{c(pl)}$ representa el peso volumétrico del hormigón y puede adoptarse entre **2400 kg/m³ (24 kN/m³)** y **2500 kg/m³ (25 kN/m³)**, en dependencia del grado de compactación que se logre durante la fabricación del elemento.



Tabla A2.2 Características geométricas de la prelosa **PPCC: 7/Ø: 30**

VARIANTE 2 ($n_{sc} = 7$)									
CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS PARA ($b = 495mm$) y ($h_1 = 30mm$)									
\emptyset (mm)	h_2 (mm)	h_{pl} (mm)	A_{pl} (mm ²)	v'_{pl} (mm)	v_{pl} (mm)	I_{pl} (mm ⁴)	W_{pl} (mm ³)	W'_{pl} (mm ³)	P_{pl} (kg/m)
30	15.0	45.0	19 801	20.5	24.5	2 956 923	120 572	144 410	47.5
35	17.5	47.5	20 145	21.0	26.5	3 231 136	121 969	153 800	48.3
40	20.0	50.0	20 352	21.4	28.6	3 456 115	120 896	161 406	48.8
45	22.5	52.5	20 421	21.7	30.8	3 607 262	117 007	166 459	49.0
50	25.0	55.0	20 353	21.8	33.2	3 653 942	109 926	167 921	48.8
55	27.5	57.5	20 147	21.7	35.8	3 557 962	99 248	164 333	48.4
60	30.0	60.0	19 804	21.3	38.7	3 271 393	84 544	153 549	47.5

Por su parte, la **Tabla A2.3** refiere la magnitud del coeficiente ξ para las dos variantes en estudio, a saber $n_{sc} = 6$ ó $n_{sc} = 7$, considerando que el espesor h_1 es el menor de todos los que serán analizados, es decir, $h_{1(min)} = 30mm$.

Tabla A2.3 Factor de eficiencia para las tipologías **PPCC: 6/Ø: 30** y **PPCC: 7/Ø: 30**

FACTOR DE EFICIENCIA PARA LAS TIPOLOGÍAS PPCC: 6/Ø: 30 Y PPCC: 7/Ø: 30						
CONDICIONES: ($b = 495mm$) y ($h_1 = 30mm$)						
\emptyset (mm)	$n_{sc} = 6$			$n_{sc} = 7$		
	I_{pl} (mm ⁴)	A_{pl} (mm ²)	$\xi \cdot 10^{-4}$	I_{pl} (mm ⁴)	A_{pl} (mm ²)	$\xi \cdot 10^{-4}$
30	3 082 470	20 154	6.24	2 956 923	19 801	6.09
35	3 422 225	20 626	6.77	3 231 136	20 145	6.55
40	3 736 826	20 980	7.27	3 456 115	20 352	6.93
45	4 008 886	21 216	7.71	3 607 262	20 421	7.21
50	4 217 162	21 335	8.07	3 653 942	20 353	7.33
55	4 335 830	21 335	8.29	3 557 962	20 147	7.21
60	4 333 521	21 218	8.34	3 271 393	19 804	6.74

Para eliminar la incertidumbre que puede producir la influencia del espesor de la prelosa por debajo de los deprimidos (h_1), se realiza el mismo análisis para el mayor de los valores que se propone adoptar: $h_{1(max)} = 40mm$. Los resultados se indican en la **Tabla A2.4**.

Tabla A2.4 Factor de eficiencia para las tipologías **PPCC: 6/Ø: 40** y **PPCC: 7/Ø: 40**

FACTOR DE EFICIENCIA PARA LAS TIPOLOGÍAS PPCC: 6/Ø: 40 Y PPCC: 7/Ø: 40						
CONDICIONES: ($b = 495mm$) y ($h_1 = 40mm$)						
\emptyset (mm)	$n_{sc} = 6$			$n_{sc} = 7$		
	I_{pl} (mm ⁴)	A_{pl} (mm ²)	$\xi \cdot 10^{-4}$	I_{pl} (mm ⁴)	A_{pl} (mm ²)	$\xi \cdot 10^{-4}$
30	5 768 035	25 104	9.38	5 568 327	24 751	9.18
35	6 257 342	25 576	9.98	5 960 332	25 095	9.69
40	6 701 472	25 930	10.55	6 275 017	25 302	10.12
45	7 079 201	26 166	11.04	6 482 565	25 371	10.43
50	7 364 930	26 285	11.44	6 546 395	25 303	10.56
55	7 527 929	26 285	11.69	6 421 624	25 097	10.44
60	7 531 343	26 168	11.75	6 052 941	24 754	9.98



Los valores del coeficiente ξ que se observan en las **Tablas A2.3 y A2.4** reflejan que al reducir la cantidad de deprimidos se experimenta un ligero incremento del área de la sección transversal (y con ella de su peso), pero más significativo aun es el incremento de la inercia centroidal respecto del área para los dos valores extremos que se proponen al espesor h_1 : $h_{1(min)} = 30mm$ y $h_{1(max)} = 40mm$. Incluso el mayor valor del coeficiente ξ , que como ya se ha dicho expresa la eficiencia de la prelosa, se obtiene para el valor de $\emptyset = 60mm$:

Para $n_{sc} = 6$, $h_1 = 30mm$ y $\emptyset = 60mm$: $\xi = \xi_{max} = 8.34$

Para $n_{sc} = 6$, $h_1 = 40mm$ y $\emptyset = 60mm$: $\xi = \xi_{max} = 11.75$

La conclusión es la siguiente:

*El estudio paramétrico que se iniciara en el **Anexo 1** y que se completa en este Anexo con la evaluación de las características geométricas para las diferentes tipologías de sección a estudiar, apunta a adoptar la variante de seis deprimidos de 60mm de diámetro cada uno, independientemente de los tres espesores h_1 que se propone utilizar, adoptándose a partir de este momento y durante la continuación de esta investigación, las siguientes tipología de sección transversal:*

PPCC: 6/60: 30

PPCC: 6/60: 35

PPCC: 6/60: 40

A2.4 DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES GEOMÉTRICAS DE LA PRELOSA CORRESPONDIENTE A LAS TIPOLOGÍAS APROBADAS

Se trata ahora de fijar las propiedades geométricas que corresponden a las tres tipologías definidas en el epígrafe anterior, y que constituyen la base de la biblioteca que contendrá los surtidos de elementos prefabricados que se ofrecen como producto final de esta investigación.

Para ello se adoptarán las siguientes expresiones, algunas deducidas ya:

- ❖ Área Neta (A_{pl}) **Expresión (5)**
- ❖ Espesor real (h_{pl}) **Expresión (6)**
- ❖ Posición del centroide respecto de la fibra inferior (v'_{pl}) **Expresión (7)**
- ❖ Posición del centroide respecto de la fibra superior (v_{pl}) **Expresión (9)**
- ❖ Inercia centroidal (I_{pl}) **Expresión (10)**
- ❖ Módulo resistente respecto de la fibra inferior (W'_{pl}) **Expresión (11)**
- ❖ Módulo resistente respecto de la fibra superior (W_{pl}) **Expresión (12)**
- ❖ Peso por metro lineal (P_{pl}) **Expresión (13)**
- ❖ Perímetro de la sección (\hat{P}_{pl}) **Expresión por definir**

El perímetro de la sección representa una variable que influye en las pérdidas por retracción que experimenta el acero pretensado luego de su tesado inicial. Con el interés de conocer su

magnitud en cada una de las tipologías que se definieron, se expone a continuación la expresión que permite su cuantificación, a partir de la **Figura A2.2**:

$$\hat{P}_{pl} = b + 2h_1 + n_{sc}(\pi\phi) + n_{sc}x \quad (\text{Ver la representación de } x \text{ en la Figura A1.2 del Anexo 1})$$

$$\therefore \hat{P}_{pl} = b + 2h_1 + 2n_{sc}\pi h_2 + n_{sc}(b/n_{sc} - \phi)$$

$$\therefore \hat{P}_{pl} = b + 2h_1 + 2n_{sc}\pi h_2 + n_{sc}(b/n_{sc} - 2h_2)$$

Demostrándose finalmente que:

$$\hat{P}_{pl} = 2[b + h_1 + n_{sc}h_2(\pi - 1)] \quad (14)$$

Tabla A2.5 Características geométricas de la prelosa seleccionada bajo el código **PPCC: 6/30: h_1**

TIPOLOGÍA ($n_{sc} = 6$)									
CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS PARA ($b = 495mm$) y ($\phi = 60mm \Rightarrow h_2 = 30mm$)									
h_1 (mm)	h_{pl} (mm)	\bar{P}_{pl} (mm)	A_{pl} (mm ²)	v'_{pl} (mm)	v_{pl} (mm)	I_{pl} (mm ⁴)	W_{pl} (mm ³)	W'_{pl} (mm ³)	P_{pl} (kg/m)
30	60	1 821	21 218	23.0	37.0	4 333 521	117 261	188 055	50.9
35	65	1 831	23 693	25.4	39.6	5 784 897	145 993	227 971	56.9
40	70	1 841	26 168	27.7	42.3	7 531 343	178 210	271 507	62.8

A2.5 CONCLUSIÓN

El estudio paramétrico iniciado en el **Anexo 1** y la consideración del coeficiente de eficiencia ξ que se ha definido en este Anexo, ha permitido seleccionar la prelosa de 5 semicírculos y dos cuartos de círculo ($n_{sc} = 6$) longitudinales, todos de diámetro $\phi = 60mm$, a la que corresponde una sección transversal cuyas características geométricas y peso por metro lineal se incluyen en la **Tabla A2.5**, para los tres espesores h_1 propuestos: 30mm, 35mm y 40mm.

Sólo resta completar el análisis con la definición de la tipología de armado que permita establecer la cantidad y posición de los alambres de alto límite elástico que ha de emplearse, además de su diámetro, aspectos que se trata en el **Anexo 3**.

ANEXO 3

PROPUESTAS DE ARMADO DE LA PRELOSA

Loja. 2013



A3.1 INTRODUCCIÓN

El tercer Anexo aborda los aspectos referidos al refuerzo de la prelosa, reconociendo que se trata de un elemento pretensado en Planta Fija que exige un acero en forma de alambre de alto límite elástico. La diversidad de grados (límite convencional de fluencia) y de diámetro que ofrece el mercado, obliga a establecer valores para ambas entidades mecánicas, lo que adicionado a otras incertidumbres propias de la etapa de pre proyecto precisa responder a las siguientes interrogantes para poder realizar las propuestas de tipologías de armado más coherentes con los criterios estructurales y constructivos.

- a) ¿Qué grados de acero son los más frecuentes en los alambres de alto límite elástico empleados en pretensado?
- b) ¿Qué diámetros resultan apropiados para los alambres que se emplearían en un elemento pretensado del tipo de la **PPCC**, producida preferentemente en una Planta sin las pretensiones de las fábricas industrializadas que suelen construirse para desarrollar la técnica del pretensado?
- c) Reconociendo que el perfil o trazado de los alambres ha de ser recto, es decir, con excentricidad constante a todo lo largo de la prelosa por tratarse de un elemento pretensado ¿Cuál es la ubicación más razonable para los alambres en la altura de la sección transversal de la prelosa?
- d) ¿Qué diseño corresponde a las planchas ubicadas en los extremos del banco de tesado que funcionan como cabezal, contra las cuales han de anclarse luego los alambres estirados antes de la colocación del hormigón?

A3.2 GRADOS DEL ACERO PRETENSADO A EMPLEAR EN LA PRELOSA

La respuesta a la primera de las interrogantes del párrafo anterior es tan diversa como amplio sea el surtido de este tipo de acero en el mercado, lo que puede variar indudablemente de un país a otro. Tratándose de aceros de alto límite elástico resultan ser mucho menos dúctiles y no poseen un límite de fluencia franco, debido fundamentalmente al mayor contenido de carbono¹ que se añade respecto de los aceros naturales empleados en hormigón armado, debiéndose definir para ellos el llamado límite convencional de fluencia o límite de fluencia aparente, y se hace aceptando que este límite se asocia a aquella tensión a la que corresponde una deformación remanente de un dos por mil, es decir, de un 0.2%.

¹ El Grupo FABRICELA_Industria Trefilaria S.A de Portugal comercializa, entre otras producciones, alambres con una tensión de rotura de 1860MPa bajo la siguiente composición mineralógica: Carbono (0.80%), Manganeso (0.64%), Silicio (0.22%), Fósforo (0.006%) y Azufre (0.003%).

Si se deseara estimar la deformación de fluencia ε_{py} del **alambre trefilado**, por ejemplo, caracterizado en la **Tabla A3.1**, al que corresponda un límite de rotura $f_{pu} = 1\,860\text{MPa}$, se debe proceder de la manera siguiente:

$$\text{Para } f_{ps} \geq K_3 f_{py}: \quad \varepsilon_{ps} = \frac{f_{ps}}{E_p} + K_2 \left(\frac{f_{ps}}{f_{py}} - K_3 \right)^5$$

Si $f_{ps} = f_{py} = 0.9 f_{pu}$, entonces $\varepsilon_{ps} = \varepsilon_{py}$, es decir:

$$\varepsilon_{py} = \frac{f_{py}}{E_p} + K_2 \left(\frac{f_{py}}{f_{py}} - K_3 \right)^5 = \frac{0.9(1860)}{1.90 \cdot 10^5} + (0.823)(1 - 0.70)^5$$

$$\varepsilon_{py} = 0.0088 + 0.002 = \mathbf{0.0108} (\approx 1\%)$$

Obsérvese que esta deformación es mayor que aquella evaluada mediante un diagrama que se acepte bilineal como suele proponerse en algunos Reglamentos. Para esta consideración se tendría $\varepsilon_{py} = f_{py}/E_p = 0.0088$.

En esta investigación se han considerado dos de los tipos de alambre que se emplean con más frecuencia en varios países latinoamericanos, identificados en el mercado por su tensión de rotura f_{pu} . En general, los fabricantes que comercializan este producto ofrecen las siguientes leyes tenso deformacionales para cada uno:

ACERO $f_{pu} = 1\,770\text{MPa}$

$$f_{ps}: \begin{cases} (1.9 \cdot 10^5) \cdot \varepsilon_{ps} & \text{Para } \varepsilon_{ps} \leq 0.0076 \\ 1770 - \frac{\gamma_p}{(\varepsilon_{ps} - 0.0064)} & \text{Para } \varepsilon_{ps} > 0.0076 \end{cases}$$

ACERO $f_{pu} = 1\,860\text{MPa}$

$$f_{ps}: \begin{cases} (1.9 \cdot 10^5) \cdot \varepsilon_{ps} & \text{Para } \varepsilon_{ps} \leq 0.0086 \\ 1860 - \frac{\gamma_p}{(\varepsilon_{ps} - 0.007)} & \text{Para } \varepsilon_{ps} > 0.0086 \end{cases}$$

Siendo:



$$\gamma_p: \begin{cases} 0.28 & \text{Para aceros con } f_{py}/f_{pu} \geq 0.90 \\ 0.40 & \text{Para aceros con } 0.85 \leq f_{py}/f_{pu} < 0.90 \\ 0.55 & \text{Para aceros con } 0.80 \leq f_{py}/f_{pu} < 0.85 \end{cases}$$

A3.3 DIÁMETRO DEL ALAMBRE A EMPLEAR EN LA PRELOSA

Tres razones fundamentales justifican el empleo de alambres lisos de diámetros pequeños como refuerzo de la prelosa:

- ☞ Las dimensiones relativamente pequeñas del elemento y especialmente su rebajado espesor.
- ☞ La necesidad de garantizar los recubrimientos mínimos que establecen los reglamentos como protección primaria del acero, recubrimientos que dependen de la agresividad del ambiente y en cierto grado del diámetro del acero, debiendo ser mayores, cuanto mayor es el diámetro.
- ☞ La técnica de tesado que se sugiere emplear, basada en un estiramiento manual del acero para evadir el costo de los gatos de tesado. Resultarían inapropiados los aceros de diámetros elevados a los que habría que aplicar una fuerza difícil de alcanzar mediante esta técnica manual.

Los cálculos previos realizados dentro de la etapa de pre proyecto justificaron la selección de los siguientes dos diámetros:

$$d_{b1} = 3mm \Rightarrow a_{p1} = 7.07mm^2$$

$$d_{b2} = 5mm \Rightarrow a_{p1} = 19.63mm^2$$

Luego se observará que las propuestas de tipologías de armado que se hacen dentro de este Anexo conciben combinar, en un mismo elemento, ambos diámetros. a_p

A3.4 PERFIL DE LOS ALAMBRES

Cuando se recurre a la técnica de pretesado, en la que el estiramiento del acero se realiza previo al vaciado del hormigón, resulta difícil concebir un perfil variable para los alambres aun cuando resultaría lo más efectivo ante la variación de los esfuerzos de flexión que originan luego las cargas exteriores. En el caso de la prelosa que se analiza, con espesores tan reducidos, se refuerza la imposibilidad de un trazado para los alambres que no sea precisamente recto, es decir, se impone siempre un trazado con excentricidad constante a todo lo largo de la pieza. Sin



embargo, sería interesante responder a la siguiente interrogante ¿cuál ha de ser la excentricidad más aconsejable para los alambres?

Antes de ofrecer respuesta, se parte de reconocer que pueden darse tres situaciones diferentes de excentricidad:

- a) Que se trate de un caso de excentricidad nula, es decir, con $e_o = 0$, la que tendría lugar cuando los alambres se sitúen haciendo coincidir el centroide de su distribución con el centroide de la sección transversal de la prelosa, o sea, para la condición: $c_p = v'_{pl}$, siendo c_p la distancia medida desde la fibra más traccionada por la carga exterior (la inferior) al centroide de los alambres en la sección.
- b) Que se trate de un caso de pretensado excéntrico, es decir, $e_o \neq 0$, caso que a su vez puede presentarse de dos maneras diferentes:
 - b.1) Situándose los alambres por encima del centroide de la sección transversal de la prelosa, es decir, $c_p > v'_{pl}$, en cuyo caso se tendrá excentricidad negativa, es decir, $e_o < 0$
 - b.2) Situándose los alambres por debajo del centroide de la sección transversal de la prelosa, es decir, $c_p < v'_{pl}$, y por tanto $e_o > 0$

La **Figura A3.2** muestra una esquematización de estas tres situaciones durante el instante de la transferencia de la fuerza de pretensado inicial P_i .

Los dos casos de perfil recto excéntrico (b.1 y b.2) originan flexión al transferirse la fuerza de pretensado. En el primero el pretensado transferido comprime más a la fibra superior de la sección, pudiendo llegar a traccionar la inferior, lo que no resultaría aconsejable si se tiene en cuenta que luego la carga muerta y viva, excepto la concomitante (peso propio), traccionarían también a la propia fibra inferior.

En el segundo caso acontece exactamente lo contrario, es decir, el pretensado precomprime a la fibra inferior que es precisamente la que luego se verá traccionada por el resto de la carga, incluyendo en este caso la concomitante, lo que resultaría siempre lo más aconsejable, sin embargo, asegurar para el caso que se estudia una protección apropiada para los alambres mediante un adecuado recubrimiento, impide generalmente recurrir a esta alternativa.

Mientras tanto, el Caso (a), correspondiente a un perfil centrado sólo para el pretensado transferido, es decir, cuando aun no se ha ejecutado la carpeta y la sección resistente es exclusivamente la de la prelosa, ofrece la ventaja de no originar flexión al transferirse la fuerza de pretensado P_i , precisamente la etapa en que la sección resistente es la más débil, de ahí su aconsejable preferencia. Para lograrlo habría que asegurar que el recubrimiento mínimo exigido

por los Reglamentos sea inferior al valor de v'_{pl} que, como ya se conoce, posee magnitudes relativamente pequeñas a causa de los reducidos peraltos que se han propuesto para la prelosa.

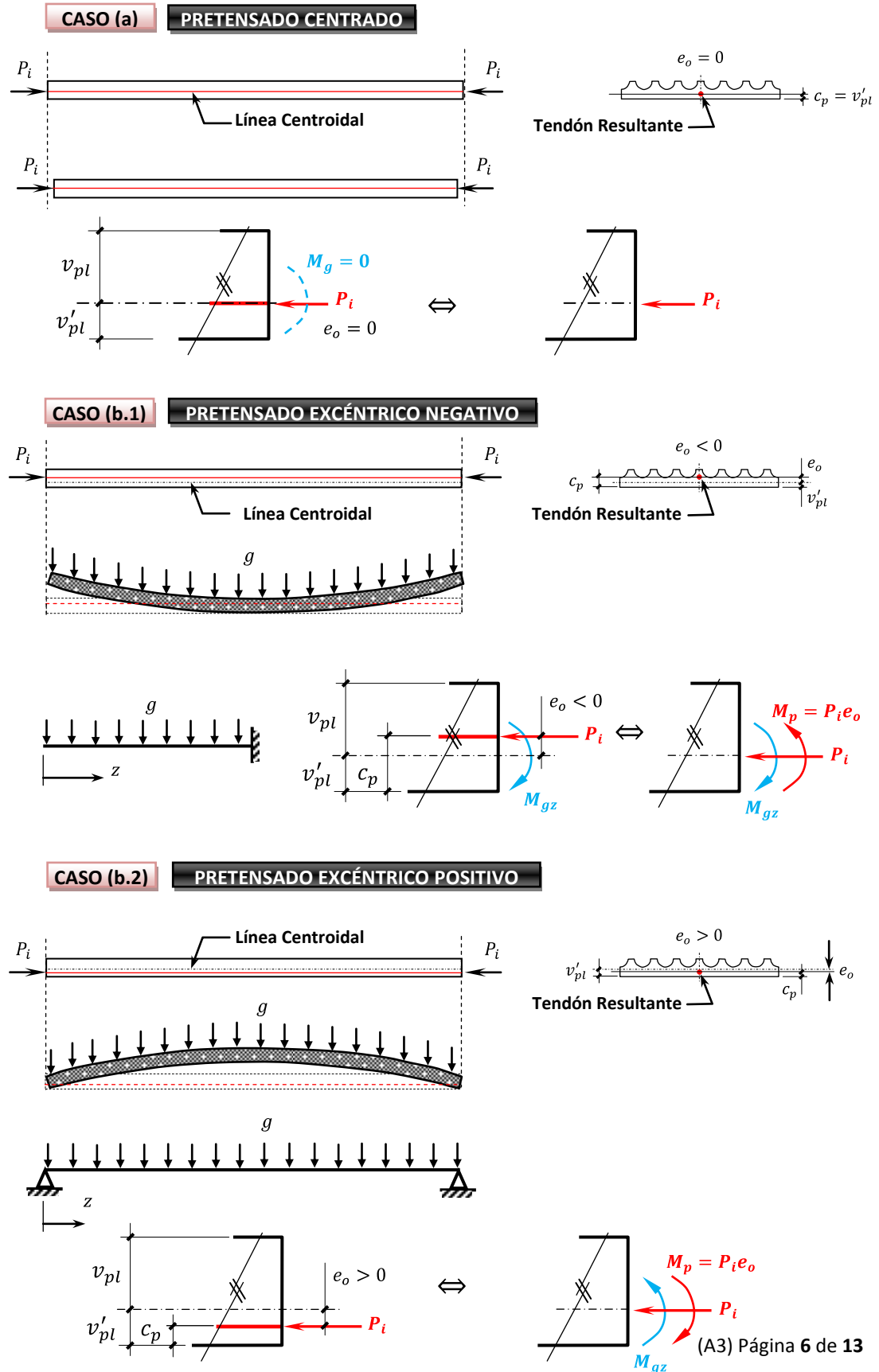


Fig. A3.2 Posibles deformadas de la prelosa durante el destense en función de la excentricidad de los alambres

En resumen, la interrogante ¿cuál ha de ser la excentricidad más aconsejable para los alambres?, puede tener la siguiente respuesta:

Siempre que los valores mínimos de recubrimiento que establecen los Reglamentos puedan asegurar que para la sección transversal que se seleccione para la prelosa, se satisfaga la condición $c_p = e_o$, es decir, pretensado centrado durante la transferencia, prefíerese esta decisión. Sólo cuando ello no sea posible recúrrase al Caso (b.1) de pretensado excéntrico negativo, con tal de asegurar el adecuado recubrimiento de la armadura pretensada.

Se adoptan en este Trabajo los valores mínimos de recubrimiento que fija el ACI 318 que dependen en lo fundamental del tipo de ambiente que rodea al elemento, y que se exponen en el recuadro que a continuación se ofrece.

7.7.2 — Concreto construido en sitio (preesforzado)	
Debe proporcionarse el siguiente recubrimiento mínimo de concreto al refuerzo preesforzado y no preesforzado, a los ductos de postensado y accesorios de los extremos, siempre que no sea inferior al exigido en 7.7.5, 7.7.5.1 y 7.7.7:	
	Recubrimiento Mínimo, mm
(a) Concreto colocado contra el suelo y expuesto permanentemente a él	75
(b) Concreto expuesto a suelo o a la intemperie:	
Paneles de muros, losas, viguetas	25
Otros elementos	40
(c) Concreto no expuesto a la intemperie ni en contacto con el suelo:	
Losas, muros, viguetas	20

Tomado del ACI 318

Como se trata de un elemento-losa construido de hormigón y expuesto a la intemperie, se adoptará un recubrimiento mínimo de **25mm**. Por otro lado, la **Tabla A2.5** incluida en el **Anexo 2** ofrece los valores de v'_{pl} para las tres tipologías de sección transversal que ya se definieran, a saber:

$$\text{PPCC: 6/60:30} \Rightarrow v'_{pl} = 23.0\text{mm}$$

$$\text{PPCC: 6/60:35} \Rightarrow v'_{pl} = 25.4\text{mm}$$

$$\text{PPCC: 6/60:40} \Rightarrow v'_{pl} = 27.7\text{mm}$$

Obsérvese que cumplir con el recubrimiento mínimo requerido hace posible garantizar un pretensado centrado en las tipologías **PPCC: 6/60:35** y **PPCC: 6/60:40**, pero no así para la de

peralte más reducido, es decir, para la tipología **PPCC: 6/60:30**, a la que correspondería un pretensado excéntrico con excentricidad negativa (alambre resultante desplazado hacia arriba del centroide de la sección) de magnitud ($e_o = 23\text{mm} - 25\text{mm} = -2\text{mm}$), en cuyo caso el momento generado por el peso propio de la prelosa como única carga concomitante, genera un momento flector que tracciona la fibra superior.

Sin embargo, con una excentricidad tan pequeña para la tipología **PPCC: 6/60:30**, es poco probable esperar que se adopte en realidad la deformada dibujada en el Caso (b.1) de la **Figura A3.2**, es decir, que el apoyo de la prelosa se de precisamente a la mitad de su longitud al cortarse los alambres. La experiencia de ensayos realizados en el CECAT a otros elementos de similar porte en cuanto a ubicación y cuantía refuerzo, y dimensiones de la sección, permiten predecir una convexidad sólo hacia los extremos de la pieza, en el instante en que se transfiere la fuerza de pretensado. La longitud en que se desarrolla esta convexidad estaría por evaluarse cuando se concierten los ensayos que se prevé realizar en el futuro. Apoyado en la experiencia del Director de la Tesis se adoptará para esta tipología, el esquema de deformación durante el destense que se ilustra en la **Figura A3.3**.

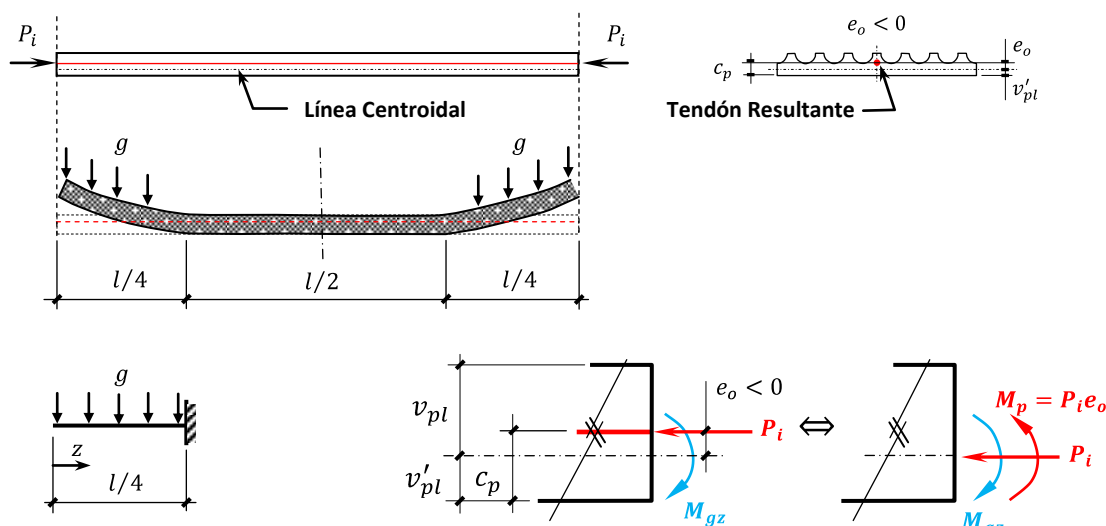


Fig. A3.3 Estimación de la deformada de la prelosa PPCC:6/60:30 durante el destense

A3.5 TIPOLOGÍA DE ARMADO. COMBINACIÓN DE DIÁMETROS

La pluralidad de luces que se presentan en los programas de vivienda, así como la diversidad en magnitud de las cargas de servicio, ya sea de entrepiso o de cubierta, obliga a disponer un refuerzo en la prelosa que reconozca la presencia de al menos tres alambres. La razón es evidente, si se tratase de sólo dos alambres, de perderse la tensión en uno de ellos por una posible pérdida del anclaje que se logra mediante la adherencia natural entre el acero y el hormigón, estaría comprometiéndose un 50% de la capacidad resistente del elemento. Si aconteciera la misma situación cuando se disponen tan siquiera tres alambres, la pérdida de capacidad resistente se reduce al 33%, valor que continúa siendo elevado y que pudiera consumir



también los factores de seguridad que suelen emplearse en los cálculos estructurales, pero que llega a aceptarse.

El estudio de las situaciones extremas que precedió a esta investigación en cuanto a luces ($3.00m \div 4.50m$) y carga viva ($L: 1 kN/m^2 \div 2.5 kN/m^2$), permitió definir las siguientes tipologías de armado, a partir del siguiente código de representación:

T-3ⁿ , T-5^m , T-3ⁿ:5^m

Significando:

T: Tipología de armado

3ⁿ: n alambres de 3mm de diámetro

5^m: m alambres de 5mm de diámetro

Las Tipologías son:

GRUPO 1 (presencia de un sólo diámetro): T-3³ , T-5³ , T-3⁵ , T-5⁵

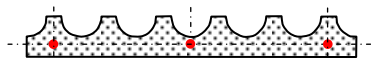
GRUPO 2 (combinación de ambos diámetros): T-3²:5¹ , T-3³:5² , T-3¹:5² , T-3²:5³

Repárese en la suma de los exponentes de las ocho tipologías de armado que acaban de definirse y se concluirá que es siempre 3 ó 5, es decir, ninguna concibe el refuerzo de la prelosa con menos de 3 alambres ni con más de 5, cantidades ambas impares para permitir una distribución simétrica del refuerzo en la sección transversal del elemento, partiendo de que en su eje centroidal se disponga siempre un alambre, y los restantes coincidiendo con el eje de las crestas de la sección, sólo en las dos extremas cuando se trata de 3 alambres, o en las parejas extremas si se trata de 5. La **Figura A3.4** muestra los esquemas de estas ocho tipologías de refuerzo.

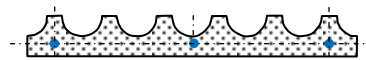
Definitivamente el surtido primario para el estudio de este elemento consta de las ocho tipologías de armado que acaban de describirse.

GRUPO 1

CANTIDAD DE ALMABRES: 3

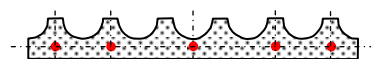


$$PPCC: 6/60 : h_1 : T - 3^3$$

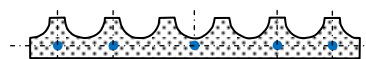


$$PPCC: 6/60 : h_1 : T - 5^3$$

CANTIDAD DE ALMABRES: 5



$$PPCC: 6/60 : h_1 : T - 3^5$$



$$PPCC: 6/60 : h_1 : T - 5^5$$

GRUPO 2

CANTIDAD DE ALMABRES: 3



$$PPCC: 6/60 : h_1 : T - 3^2 : 5^1$$



$$PPCC: 6/60 : h_1 : T - 3^1 : 5^2$$

CANTIDAD DE ALMABRES: 5



$$PPCC: 6/60 : h_1 : T - 3^3 : 5^2$$



$$PPCC: 6/60 : h_1 : T - 3^2 : 5^3$$

Fig. A3.4 Tipologías de refuerzo de la prelosa PPCC. Versión 2.0

A3.6 DISEÑO DE LA PLANCHA-CABEZAL

La Plancha-Cabezal se ubica en los extremos del lecho de vaciado del hormigón y contra ella es que se tesan y anclan los alambres. Su espesor debe ser, como mínimo, de 10mm, a la que se deben practicar cinco orificios, todos de 5.3mm de diámetro, por los que se disponen los alambres. Los tres tipos de Plancha que se conciben y la ubicación de estos orificios en ella, definida por las separaciones horizontales entre los orificios y de sus centroides al lecho de fundición, se ilustran en la **Figura A3.5**.

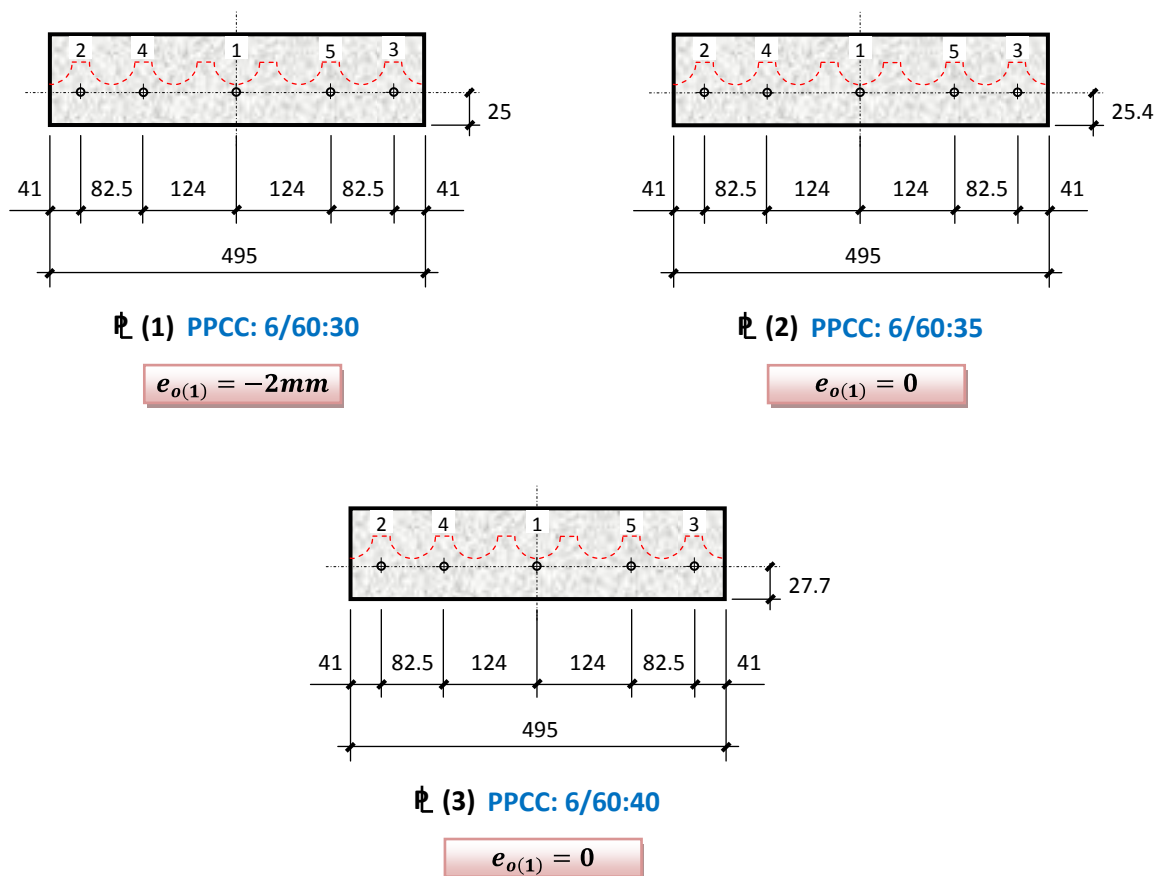


Fig. A3.5 Diseño de la Plancha-Cabezal para las tres tipologías de sección de la prelosa

Cuando se trate de las tipologías de armado que consideran solamente tres alambres, ellos se ubicarán a través de los orificios 1, 2 y 3, para asegurar la mejor distribución del refuerzo, sin descuidar su simetría. Se recomienda que en la Planta Fija que se construya para producir este elemento se deben habilitar al menos tres líneas de producción en cuyos extremos se ubicarán las planchas-cabezales para cada una de las tres tipologías de prelosa que se producen: **PPCC: 6/60:30**, **PPCC: 6/60:35** y **PPCC: 6/60:40**.

A3.7 RESUMEN DE LAS TIPOLOGÍAS DE REFUERZO QUE SE DEFINEN PARA LA PRELOSA

A partir de las tres secciones transversales que se han considerado para la prelosa y las ocho tipologías de refuerzo que acaban de definirse, se parte de un surtido inicial de 48 variantes diferentes, que deben ser convalidadas por los cálculos estructurales que se incluyen en el Capítulo III. Las primeras 24 corresponden al acero de alto límite elástico de grado $f_{pu} = 1\,770\text{MPa}$, que son precisamente las que se ilustran en la **Tabla A3.2**, mientras que las 24 restantes, análogas en código a las anteriores, corresponden al grado de acero $f_{pu} = 1\,860\text{MPa}$.

Tabla A3.2 Variantes de prelosa que definen el surtido primario de este producto para $f_{pu} = 1\,770\text{MPa}$.

$h_1 = 30\text{mm}$
PPCC: 6/60: 30: T-3 ³ /1770
PPCC: 6/60: 30: T-5 ³ /1770
PPCC: 6/60: 30: T-3 ⁵ /1770
PPCC: 6/60: 30: T-5 ⁵ /1770
PPCC: 6/60: 30: T-3 ² :5 ¹ /1770
PPCC: 6/60: 30: T-3 ¹ :5 ² /1770
PPCC: 6/60: 30: T-3 ³ :5 ² /1770
PPCC: 6/60: 30: T-3 ² :5 ³ /1770

$h_1 = 35\text{mm}$
PPCC: 6/60: 35: T-3 ³ /1770
PPCC: 6/60: 35: T-5 ³ /1770
PPCC: 6/60: 35: T-3 ⁵ /1770
PPCC: 6/60: 35: T-5 ⁵ /1770
PPCC: 6/60: 35: T-3 ² :5 ¹ /1770
PPCC: 6/60: 35: T-3 ¹ :5 ² /1770
PPCC: 6/60: 35: T-3 ³ :5 ² /1770
PPCC: 6/60: 35: T-3 ² :5 ³ /1770

$h_1 = 40\text{mm}$
PPCC: 6/60: 40: T-3 ³ /1770
PPCC: 6/60: 40: T-5 ³ /1770
PPCC: 6/60: 40: T-3 ⁵ /1770
PPCC: 6/60: 40: T-5 ⁵ /1770
PPCC: 6/60: 40: T-3 ² :5 ¹ /1770
PPCC: 6/60: 40: T-3 ¹ :5 ² /1770
PPCC: 6/60: 40: T-3 ³ :5 ² /1770
PPCC: 6/60: 40: T-3 ² :5 ³ /1770



A3.8 CONCLUSIONES

- 1) La investigación parte de ocho tipologías de armado diferentes de tal manera que cuatro de ellas consideran sólo tres alambres, mientras las restantes incluyen cinco alambres. La diversidad de tipologías de acero procura diferenciar la fuerza de pretensado entregada para ofrecer un amplio surtido de soluciones que se ajusten a la variedad de cargas y luces que puede presentarse, con indicadores económicos competitivos.
- 2) La ubicación de los alambres garantiza una distribución simétrica respecto al eje centroidal vertical de la sección, para asegurar que no se origine flexión esviada al transferir la fuerza de pretensado. Para minimizar el efecto del tesado no simultáneo de los alambres sobre los cabezales extremos del lecho de tesado, el orden en que debe realizarse el estiramiento de cada alambre debe ser el siguiente:
 - ❖ Cuando se trata de 3 alambres, el orden de tesado es el siguiente: **1-2-3**
 - ❖ Cuando se trata de 5 alambres, el orden de tesado es el siguiente: **1-4-5-2-3**
- 3) Se sugiere ubicar el refuerzo pretensado asegurando que el centroide de su distribución coincida con el de la sección transversal de la prelosa. Sólo cuando el recubrimiento mínimo normado no lo permita, se subirá el acero por encima del centroide de la sección de hormigón, provocando así un pretensado excéntrico negativo, menos deseado que el centrado sugerido.

ANEXO 4

ANEXO 4

EVALUACIÓN DE LAS PÉRDIDAS DE PRETENSADO

Loja. 2013

A4.1 INTRODUCCIÓN

El Anexo resume el cálculo de todas las pérdidas (iniciales y diferidas) evaluadas en la sección extrema de la zona de transición, además de las que tienen lugar en la sección central de la pieza, para las 48 tipologías objeto de investigación. La **Tabla A4.1** resume la caracterización básica de estas 48 tipologías.

Tabla A4.1 Caracterización de las 48 tipologías básicas de prelosas analizadas en el Trabajo

Tipología PPCC	ACERO				SECCIÓN HORMIGÓN DE LA PRELOSA		
	$d_{b(max)}$ (mm)	a_p (mm ²)	p (mm)	e_o (mm)	A_{pl} (mm ²)	I_{pl} (mm ⁴)	p_{pl} (mm)
$f_{pu} = 1\,770MPa$							
6/60:30:T-3 ³ /1770	3	7.07	18.80	-2	21 218	4 333 521	1 255
6/60:30:T-5 ³ /1770	5	19.64	31.42				
6/60:30:T-3 ⁵ /1770	3	7.07	18.80				
6/60:30:T-5 ⁵ /1770	5	19.64	31.42				
6/60:30:T-3 ² :5 ¹ /1770	5	19.64	31.42				
6/60:30:T-3 ¹ :5 ² /1770	5	19.64	31.42				
6/60:30:T-3 ³ :5 ² /1770	5	19.64	31.42				
6/60:30:T-3 ² :5 ³ /1770	5	19.64	31.42				
6/60:35:T-3 ³ /1770	3	7.07	18.80	0	23 693	5 784 897	1 265
6/60:35:T-5 ³ /1770	5	19.64	31.42				
6/60:35:T-3 ⁵ /1770	3	7.07	18.80				
6/60:35:T-5 ⁵ /1770	5	19.64	31.42				
6/60:35:T-3 ² :5 ¹ /1770	5	19.64	31.42				
6/60:35:T-3 ¹ :5 ² /1770	5	19.64	31.42				
6/60:35:T-3 ³ :5 ² /1770	5	19.64	31.42				
6/60:35:T-3 ² :5 ³ /1770	5	19.64	31.42				
6/60:40:T-3 ³ /1770	3	7.07	18.80	0	26 168	7 531 343	1 275
6/60:40:T-5 ³ /1770	5	19.64	31.42				
6/60:40:T-3 ⁵ /1770	3	7.07	18.80				
6/60:40:T-5 ⁵ /1770	5	19.64	31.42				
6/60:40:T-3 ² :5 ¹ /1770	5	19.64	31.42				
6/60:40:T-3 ¹ :5 ² /1770	5	19.64	31.42				
6/60:40:T-3 ³ :5 ² /1770	5	19.64	31.42				
6/60:40:T-3 ² :5 ³ /1770	5	19.64	31.42				
$f_{pu} = 1\,860MPa$							
6/60:30:T-3 ³ /1860	3	7.07	18.80	-2	21 218	4 333 521	1 255
6/60:30:T-5 ³ /1860	5	19.64	31.42				
6/60:30:T-3 ⁵ /1860	3	7.07	18.80				
6/60:30:T-5 ⁵ /1860	5	19.64	31.42				
6/60:30:T-3 ² :5 ¹ /1860	5	19.64	31.42				
6/60:30:T-3 ¹ :5 ² /1860	5	19.64	31.42				
6/60:30:T-3 ³ :5 ² /1860	5	19.64	31.42				
6/60:30:T-3 ² :5 ³ /1860	5	19.64	31.42				



6/60:35:T-3 ³ /1860	3	7.07	18.80	0	23 693	5 784 897	1 265
6/60:35:T-5 ³ /1860	5	19.64	31.42				
6/60:35:T-3 ⁵ /1860	3	7.07	18.80				
6/60:35:T-5 ⁵ /1860	5	19.64	31.42				
6/60:35:T-3 ² :5 ¹ /1860	5	19.64	31.42				
6/60:35:T-3 ¹ :5 ² /1860	5	19.64	31.42				
6/60:35:T-3 ³ :5 ² /1860	5	19.64	31.42				
6/60:35:T-3 ² :5 ³ /1860	5	19.64	31.42				
6/60:40:T-3 ³ /1860	3	7.07	18.80	0	26 168	7 531 343	1 275
6/60:40:T-5 ³ /1860	5	19.64	31.42				
6/60:40:T-3 ⁵ /1860	3	7.07	18.80				
6/60:40:T-5 ⁵ /1860	5	19.64	31.42				
6/60:40:T-3 ² :5 ¹ /1860	5	19.64	31.42				
6/60:40:T-3 ¹ :5 ² /1860	5	19.64	31.42				
6/60:40:T-3 ³ :5 ² /1860	5	19.64	31.42				
6/60:40:T-3 ² :5 ³ /1860	5	19.64	31.42				

$d_{b(max)}$: Mayor de los diámetros de los alambres empleados (3mm ó 5mm)

a_p : Área del alambre de menor diámetro (mm^2)

p : Perímetro adherente del alambre de menor diámetro (mm)

e_o : Excentricidad de los alambres respecto del centroide de la sección de hormigón de la prelosa (mm)

A_{pl} : Área bruta de la sección de hormigón de la prelosa (mm^2)

I_{pl} : Inercia centroidal de la sección de hormigón de la prelosa (mm^4)

p_{pl} : Perímetro de la sección de hormigón de la prelosa (mm)

Las Tablas que se incluyen a continuación ofrecen la magnitud de las pérdidas iniciales, diferidas y totales evaluadas mediante las expresiones que se incluyen en el epígrafe **§3.3** del Trabajo, a partir de las siguientes:

CONSIDERACIONES GENERALES:

- Resistencia del hormigón a los 28 días: ($f'_c = 25MPa$)
- Destense: 3 días ($\beta_j = 0.6$)
- Peso de la carpeta: ($q_c = 60 kg/m = 0.6 N/mm$)
- Sobrecarga muerta impuesta (sin incluir el peso de la carpeta): ($q_s = 100 kg/m = 1 N/mm$)
- Módulo de deformación del acero pretensado: ($E_p = 2 \cdot 10^5 MPa$)
- Humedad relativa ambiental: ($HR = 80\%$)
- Transferencia brusca del pretensado ($\alpha_1 = 1.25$)
- Cemento de endurecimiento normal ($s = 0.25$)
- Relaciones tensionales del acero: ($\xi = f_{py}/f_{pu} = 0.85 \Rightarrow \lambda_t = f_{pj}/f_{pu} = 0.80$)
- La prelosa no posee refuerzo transversal ($\alpha_2 = 1.0$)
- El refuerzo de prelosa es mediante alambres de alto límite elástico ($\alpha_3 = 0.7$ y $\eta_1 = 1.4$)

- En todos los casos el refuerzo en prelosa se sitúa a menos de 250mm de su fondo ($\eta_2 = 1.0$)
- Acero de relajamiento bajo (Para $\lambda_t = 0.80$)

$$f_{pu} = 1770MPa: \begin{cases} K_{re} = 31.9MPa \\ J = 0.037 \\ C = 1.28 \end{cases}$$

$$f_{pu} = 1860MPa: \begin{cases} K_{re} = 34.4MPa \\ J = 0.04 \\ C = 1.28 \end{cases}$$

Se van modificando durante el estudio de las pérdidas:

- Tipología de la prelosa: **PPCC: 6/60:30** , **PPCC: 6/60:35** y **PPCC: 6/60:40**
- Tipología de refuerzo: **T-3³** , **T-5³** , **T-3⁵** , **T-5⁵** , **T-3²:5¹** , **T-3¹:5²** y **T-3²:5³**
- Resistencia última del acero: **$f_{pu} = 1770MPa$ ó $1860MPa$**
- Longitud de la prelosa (las extremas): **$l = 3.00m$ y $4.50m$**
- Sección a analizar:
 - Sección extrema de la zona de transferencia (sólo para la pérdida por acortamiento elástico)
 - Sección central

Tabla A4.2 Pérdida en la **sección extrema de transferencia** en prelosas de longitud **$l = 3.00m$**

TIPOLOGÍA PPCC		$l = 3.0m$		$HR = 80\%$		$q_{sd} = 1.6\,N/m\,m$		$\lambda_t = 0.80$		$f'_c = 25MPa$	
		$f_{pu} = 1770MPa$					$f_{pu} = 1860MPa$				
		INICIAL		DIFERIDA			INICIAL		DIFERIDA		
		Δf_{ES} (MPa)	Δf_{CR} (MPa)	Δf_{SH} (MPa)	Δf_{RE} (MPa)	$\Delta f_{diferida}$ (MPa)	Δf_{ES} (MPa)	Δf_{CR} (MPa)	Δf_{SH} (MPa)	Δf_{RE} (MPa)	$\Delta f_{diferida}$ (MPa)
6/60:30	T-3 ³	14,3	25,6	31,5	37,5	94,6	15,0	26,7	31,5	40,3	98,5
	T-5 ³	39,6	64,8	31,5	34,4	130,7	41,7	68,0	31,5	36,8	136,3
	T-3 ⁵	23,8	40,3	31,5	36,3	108,1	25,0	42,2	31,5	39,0	112,7
	T-5 ⁵	66,1	105,7	31,5	31,2	168,4	69,4	110,9	31,5	33,2	175,6
	T-3 ² :5 ¹	22,7	38,7	31,5	36,4	106,6	23,9	40,5	31,5	39,1	111,1
	T-3 ¹ :5 ²	31,2	51,8	31,5	35,4	118,7	32,8	54,2	31,5	38,0	123,7
	T-3 ³ :5 ²	40,7	66,5	31,5	34,3	132,2	42,8	69,7	31,5	36,7	137,8
	T-3 ² :5 ³	49,2	79,6	31,5	33,2	144,3	51,7	83,4	31,5	35,5	150,4
6/60:35	T-3 ³	12,5	19,4	31,4	37,8	88,6	13,2	20,4	31,4	40,7	92,4
	T-5 ³	34,8	53,8	31,4	35,1	120,3	36,6	56,6	31,4	37,7	125,6
	T-3 ⁵	20,9	32,3	31,4	36,8	100,5	22,0	34,0	31,4	39,6	104,9
	T-5 ⁵	58,0	89,7	31,4	32,3	153,4	61,0	94,3	31,4	34,5	160,1
	T-3 ² :5 ¹	20,0	30,9	31,4	36,9	99,2	21,0	32,4	31,4	39,7	103,5
	T-3 ¹ :5 ²	27,4	42,4	31,4	36,0	109,8	28,8	44,5	31,4	38,7	114,5
	T-3 ³ :5 ²	35,7	55,3	31,4	35,0	121,7	37,6	58,1	31,4	37,5	127,0
	T-3 ² :5 ³	43,2	66,8	31,4	34,1	132,3	45,4	70,2	31,4	36,5	138,0
6/60:40	T-3 ³	11,4	17,6	31,2	38,0	86,8	11,9	18,5	31,2	40,9	90,5
	T-5 ³	31,5	48,8	31,2	35,6	115,5	33,1	51,2	31,2	38,1	120,6
	T-3 ⁵	18,9	29,3	31,2	37,1	97,5	19,9	30,8	31,2	39,8	101,8
	T-5 ⁵	52,5	81,3	31,2	33,0	145,5	55,2	85,4	31,2	35,2	151,8
	T-3 ² :5 ¹	18,1	28,0	31,2	37,2	96,3	19,0	29,4	31,2	40,0	100,5
	T-3 ¹ :5 ²	24,8	38,4	31,2	36,4	105,9	26,1	40,3	31,2	39,0	110,6
	T-3 ³ :5 ²	32,4	50,1	31,2	35,5	116,7	34,0	52,6	31,2	38,0	121,8
	T-3 ² :5 ³	39,1	60,5	31,2	34,6	126,3	41,1	63,5	31,2	37,1	131,8

Tabla A4.3 Pérdida en la sección crítica ($z = l/4$) en prelasas de longitud $l = 3.00m$

TIPOLOGÍA PPCC		$l = 3.0m$		$HR = 80\%$		$q_{sd} = 1.6\,N/m\,m$		$\lambda_t = 0.80$		$f'_c = 25MPa$	
		$f_{pu} = 1770MPa$					$f_{pu} = 1860MPa$				
		INICIAL		DIFERIDA			INICIAL		DIFERIDA		
		Δf_{ES} (MPa)	Δf_{CR} (MPa)	Δf_{SH} (MPa)	Δf_{RE} (MPa)	$\Delta f_{diferida}$ (MPa)	Δf_{ES} (MPa)	Δf_{CR} (MPa)	Δf_{SH} (MPa)	Δf_{RE} (MPa)	$\Delta f_{diferida}$ (MPa)
6/60:30	T-3 ³	15,0	26,7	31,5	37,4	95,6	15,7	27,9	31,5	40,2	99,5
	T-5 ³	40,4	66,0	31,5	34,3	131,8	42,4	69,1	31,5	36,7	137,3
	T-3 ⁵	24,5	41,5	31,5	36,2	109,2	25,7	43,3	31,5	38,9	113,7
	T-5 ⁵	66,8	106,8	31,5	31,1	169,4	70,1	112,0	31,5	33,1	176,6
	T-3 ^{2:5} 1	23,5	39,8	31,5	36,3	107,7	24,6	41,6	31,5	39,0	112,1
	T-3 ^{1:5} 2	31,9	52,9	31,5	35,3	119,7	33,5	55,3	31,5	37,9	124,7
	T-3 ^{3:5} 2	41,4	67,6	31,5	34,2	133,3	43,5	70,8	31,5	36,6	138,9
	T-3 ^{2:5} 3	49,9	80,7	31,5	33,2	145,3	52,4	84,6	31,5	35,4	151,5
6/60:35	T-3 ³	12,5	19,4	31,4	37,8	88,6	13,2	20,4	31,4	40,7	92,4
	T-5 ³	34,8	53,8	31,4	35,1	120,3	36,6	56,6	31,4	37,7	125,6
	T-3 ⁵	20,9	32,3	31,4	36,8	100,5	22,0	34,0	31,4	39,6	104,9
	T-5 ⁵	58,0	89,7	31,4	32,3	153,4	61,0	94,3	31,4	34,5	160,1
	T-3 ^{2:5} 1	20,0	30,9	31,4	36,9	99,2	21,0	32,4	31,4	39,7	103,5
	T-3 ^{1:5} 2	27,4	42,4	31,4	36,0	109,8	28,8	44,5	31,4	38,7	114,5
	T-3 ^{3:5} 2	35,7	55,3	31,4	35,0	121,7	37,6	58,1	31,4	37,5	127,0
	T-3 ^{2:5} 3	43,2	66,8	31,4	34,1	132,3	45,4	70,2	31,4	36,5	138,0
6/60:40	T-3 ³	11,4	17,6	31,2	38,0	86,8	11,9	18,5	31,2	40,9	90,5
	T-5 ³	31,5	48,8	31,2	35,6	115,5	33,1	51,2	31,2	38,1	120,6
	T-3 ⁵	18,9	29,3	31,2	37,1	97,5	19,9	30,8	31,2	39,8	101,8
	T-5 ⁵	52,5	81,3	31,2	33,0	145,5	55,2	85,4	31,2	35,2	151,8
	T-3 ^{2:5} 1	18,1	28,0	31,2	37,2	96,3	19,0	29,4	31,2	40,0	100,5
	T-3 ^{1:5} 2	24,8	38,4	31,2	36,4	105,9	26,1	40,3	31,2	39,0	110,6
	T-3 ^{3:5} 2	32,4	50,1	31,2	35,5	116,7	34,0	52,6	31,2	38,0	121,8
	T-3 ^{2:5} 3	39,1	60,5	31,2	34,6	126,3	41,1	63,5	31,2	37,1	131,8

Tabla A4.4 Pérdida en la sección extrema de transferencia en prelosas de longitud $l = 4.50m$

TIPOLOGÍA PPCC	$l = 4.50m$ $HR = 80\%$ $q_{sd} = 1.6 N/m m$ $\lambda_t = 0.80$ $f'_c = 25MPa$										
	$f_{pu} = 1770MPa$					$f_{pu} = 1860MPa$					
	INICIAL	DIFERIDA				INICIAL	DIFERIDA				
	Δf_{ES} (MPa)	Δf_{CR} (MPa)	Δf_{SH} (MPa)	Δf_{RE} (MPa)	$\Delta f_{diferida}$ (MPa)	Δf_{ES} (MPa)	Δf_{CR} (MPa)	Δf_{SH} (MPa)	Δf_{RE} (MPa)	$\Delta f_{diferida}$ (MPa)	
6/60:30	T-3 ³	14,3	30,0	31,5	37,2	98,8	15,0	31,2	31,5	40,1	102,7
	T-5 ³	39,6	69,3	31,5	34,2	134,9	41,7	72,4	31,5	36,6	140,5
	T-3 ⁵	23,8	44,8	31,5	36,1	112,3	25,0	46,6	31,5	38,8	116,9
	T-5 ⁵	66,1	110,1	31,5	31,0	172,6	69,4	115,3	31,5	33,0	179,8
	T-3 ¹ :5 ¹	22,7	43,1	31,5	36,2	110,8	23,9	44,9	31,5	38,9	115,3
	T-3 ¹ :5 ²	31,2	56,2	31,5	35,2	122,9	32,8	58,6	31,5	37,7	127,9
	T-3 ³ :5 ²	40,7	70,9	31,5	34,1	136,5	42,8	74,1	31,5	36,4	142,0
	T-3 ² :5 ³	49,2	84,0	31,5	33,0	148,5	51,7	87,9	31,5	35,3	154,6
6/60:35	T-3 ³	12,5	19,4	31,4	37,8	88,6	13,2	20,4	31,4	40,7	92,4
	T-5 ³	34,8	53,8	31,4	35,1	120,3	36,6	56,6	31,4	37,7	125,6
	T-3 ⁵	20,9	32,3	31,4	36,8	100,5	22,0	34,0	31,4	39,6	104,9
	T-5 ⁵	58,0	89,7	31,4	32,3	153,4	61,0	94,3	31,4	34,5	160,1
	T-3 ¹ :5 ¹	20,0	30,9	31,4	36,9	99,2	21,0	32,4	31,4	39,7	103,5
	T-3 ¹ :5 ²	27,4	42,4	31,4	36,0	109,8	28,8	44,5	31,4	38,7	114,5
	T-3 ³ :5 ²	35,7	55,3	31,4	35,0	121,7	37,6	58,1	31,4	37,5	127,0
	T-3 ² :5 ³	43,2	66,8	31,4	34,1	132,3	45,4	70,2	31,4	36,5	138,0
6/60:40	T-3 ³	11,4	17,6	31,2	38,0	86,8	11,9	18,5	31,2	40,9	90,5
	T-5 ³	31,5	48,8	31,2	35,6	115,5	33,1	51,2	31,2	38,1	120,6
	T-3 ⁵	18,9	29,3	31,2	37,1	97,5	19,9	30,8	31,2	39,8	101,8
	T-5 ⁵	52,5	81,3	31,2	33,0	145,5	55,2	85,4	31,2	35,2	151,8
	T-3 ¹ :5 ¹	18,1	28,0	31,2	37,2	96,3	19,0	29,4	31,2	40,0	100,5
	T-3 ¹ :5 ²	24,8	38,4	31,2	36,4	105,9	26,1	40,3	31,2	39,0	110,6
	T-3 ³ :5 ²	32,4	50,1	31,2	35,5	116,7	34,0	52,6	31,2	38,0	121,8
	T-3 ² :5 ³	39,1	60,5	31,2	34,6	126,3	41,1	63,5	31,2	37,1	131,8

Tabla A4.5 Pérdida en la sección crítica ($z = l/4$) en prelasas de longitud $l = 4.50m$

TIPOLOGÍA PPCC		$l = 4.50m$		$HR = 80\%$		$q_{sd} = 1.6\ N/m\ m$		$\lambda_t = 0.80$		$f'_c = 25MPa$	
		$f_{pu} = 1770MPa$					$f_{pu} = 1860MPa$				
		INICIAL		DIFERIDA			INICIAL		DIFERIDA		
		Δf_{ES} (MPa)	Δf_{CR} (MPa)	Δf_{SH} (MPa)	Δf_{RE} (MPa)	$\Delta f_{diferida}$ (MPa)	Δf_{ES} (MPa)	Δf_{CR} (MPa)	Δf_{SH} (MPa)	Δf_{RE} (MPa)	$\Delta f_{diferida}$ (MPa)
6/60:30	T-3 ³	15,9	32,6	31,5	37,0	101,1	16,6	33,7	31,5	39,8	105,0
	T-5 ³	41,3	71,8	31,5	34,0	137,3	43,3	74,9	31,5	36,4	142,8
	T-3 ⁵	25,4	47,3	31,5	35,9	114,7	26,6	49,2	31,5	38,5	119,2
	T-5 ⁵	67,7	112,7	31,5	30,8	175,0	71,0	117,9	31,5	32,7	182,1
	T-3 ^{2:5} ¹	24,4	45,6	31,5	36,0	113,2	25,5	47,4	31,5	38,7	117,6
	T-3 ^{1:5} ²	32,8	58,7	31,5	35,0	125,2	34,4	61,2	31,5	37,5	130,2
	T-3 ^{3:5} ²	42,3	73,4	31,5	33,9	138,8	44,4	76,6	31,5	36,2	144,4
	T-3 ^{2:5} ³	50,8	86,5	31,5	32,8	150,8	53,3	90,4	31,5	35,1	156,9
6/60:35	T-3 ³	12,5	19,4	31,4	37,8	88,6	13,2	20,4	31,4	40,7	92,4
	T-5 ³	34,8	53,8	31,4	35,1	120,3	36,6	56,6	31,4	37,7	125,6
	T-3 ⁵	20,9	32,3	31,4	36,8	100,5	22,0	34,0	31,4	39,6	104,9
	T-5 ⁵	58,0	89,7	31,4	32,3	153,4	61,0	94,3	31,4	34,5	160,1
	T-3 ^{2:5} ¹	20,0	30,9	31,4	36,9	99,2	21,0	32,4	31,4	39,7	103,5
	T-3 ^{1:5} ²	27,4	42,4	31,4	36,0	109,8	28,8	44,5	31,4	38,7	114,5
	T-3 ^{3:5} ²	35,7	55,3	31,4	35,0	121,7	37,6	58,1	31,4	37,5	127,0
	T-3 ^{2:5} ³	43,2	66,8	31,4	34,1	132,3	45,4	70,2	31,4	36,5	138,0
6/60:40	T-3 ³	11,4	17,6	31,2	38,0	86,8	11,9	18,5	31,2	40,9	90,5
	T-5 ³	31,5	48,8	31,2	35,6	115,5	33,1	51,2	31,2	38,1	120,6
	T-3 ⁵	18,9	29,3	31,2	37,1	97,5	19,9	30,8	31,2	39,8	101,8
	T-5 ⁵	52,5	81,3	31,2	33,0	145,5	55,2	85,4	31,2	35,2	151,8
	T-3 ^{2:5} ¹	18,1	28,0	31,2	37,2	96,3	19,0	29,4	31,2	40,0	100,5
	T-3 ^{1:5} ²	24,8	38,4	31,2	36,4	105,9	26,1	40,3	31,2	39,0	110,6
	T-3 ^{3:5} ²	32,4	50,1	31,2	35,5	116,7	34,0	52,6	31,2	38,0	121,8
	T-3 ^{2:5} ³	39,1	60,5	31,2	34,6	126,3	41,1	63,5	31,2	37,1	131,8

A4.2 CONCLUSIONES

- En principio, sólo existe necesidad de distinguir entre la **sección de transferencia** y la **crítica**, situada tentativamente a la distancia $l/4$ del apoyo, en el caso de la prelasa de tipología **PPCC:6/60:30**, la única en la que producto de la excentricidad de los alambres puede acontecer una deflexión convexa al transferirse el pretensado. En las dos restantes tipologías, la excentricidad de los alambre es nula y las pérdidas que tienen lugar en ambas secciones son exactamente iguales, pues en dichos casos $M_{gz} = 0$. Sin embargo, los resultados que se ofrecen en las **Tablas A4.2 y A4.3** para la longitud de 3.00m, lo mismo que los que se refieren en las **Tablas A4.4 y A4.5** para la longitud de 4.50m, confirman que la influencia de la flexión caracterizada por el momento $M_{gz} = 0$ es tan pequeña, que a los efectos prácticos se puede considerar que las pérdidas que tienen lugar en ambas secciones son sensiblemente iguales (Ver **Figura A4.1**). Esta conclusión permite considerar un único valor para estimar las pérdidas iniciales y diferidas que se producen.

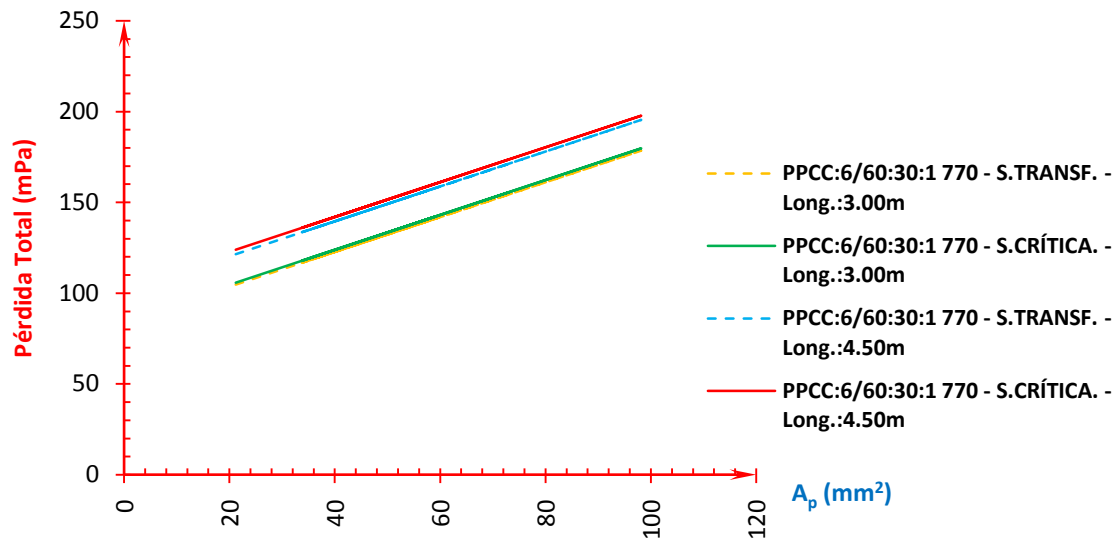


Fig. A4.1 Tendencia de la Pérdida Total evaluada en las secciones de transferencia y crítica.

- 2) Independientemente de la longitud de la pieza, y de la sección en la que se desee evaluar las pérdidas, las mayores, tanto iniciales como diferidas, tienen lugar en la prelosa de sección más débil, reforzada con la mayor área de acero, es decir, la de mayor fuerza de pretensado. La **Figura A4.2** ilustra esta afirmación para la longitud de 3.00m.

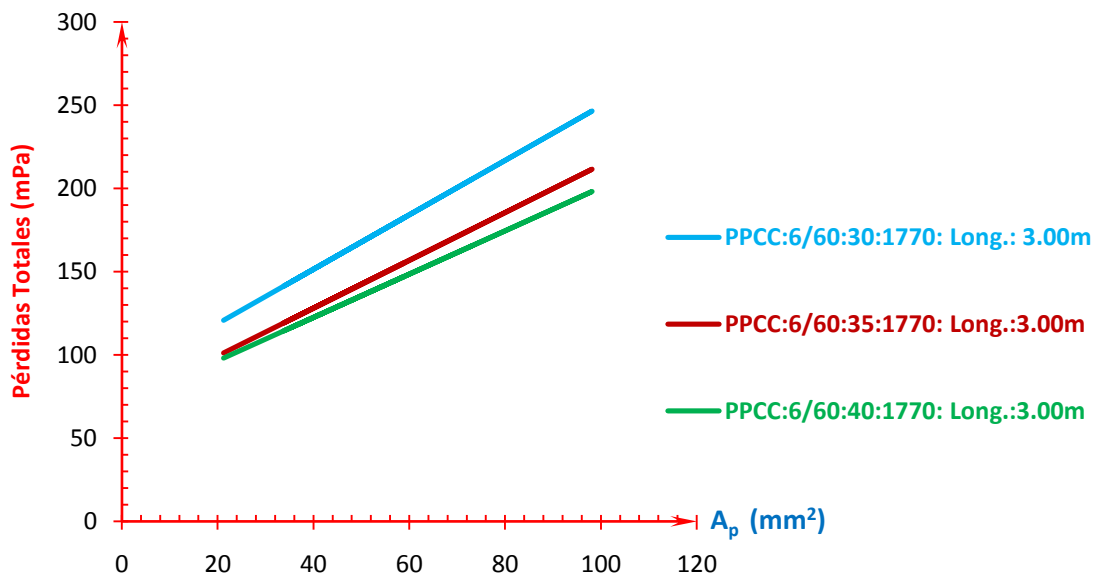


Fig. A4.2 Tendencia de la Pérdida Total cuando se modifica la tipología de prelosa.

- 3) Dentro de todas las causas que originan caídas de tensión en el pretensado, la de mayor incidencia es la debida al **flujo plástico diferido del hormigón**. Para cuantías bajas la menor es la debida a al **acortamiento elástico del hormigón**, que luego crece con el

aumento de la fuerza de pretensado. Las pérdidas por **retracción del hormigón** y **relajación del acero**, ambas diferidas, son las más bajas y resultan prácticamente independiente de la cuantía de acero (Ver **Figura A4.3**).

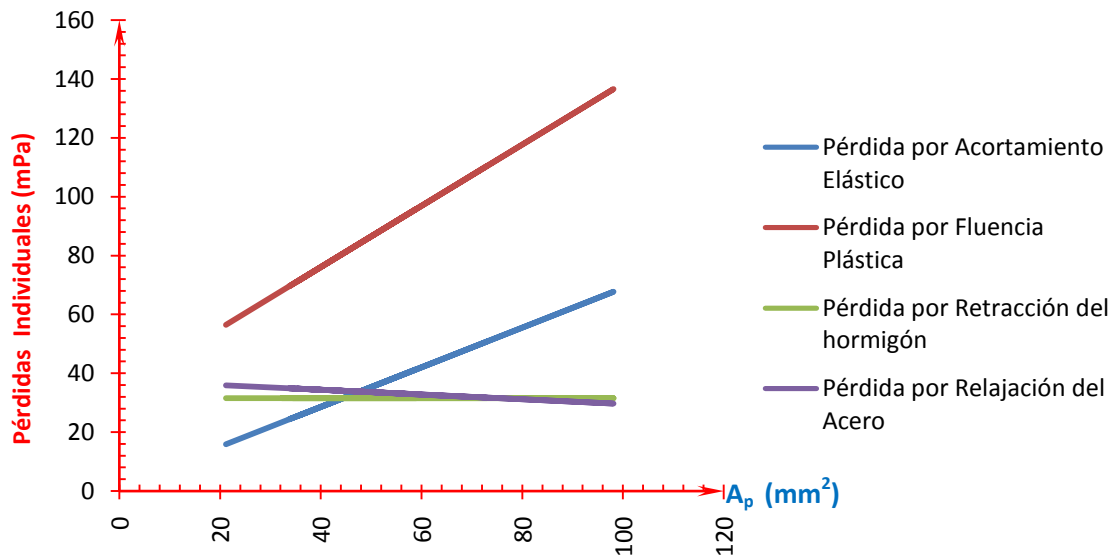


Fig. A4.3 Tendencia de cada Pérdida considerando la tipología PPCC 6/60:30-1 770 (Long.: 3.00m)

- 4) En realidad las pérdidas de tensión que tienen lugar en la prelosa son relativamente bajas respecto de la tensión de rotura del acero que se emplee, especialmente las pérdidas iniciales que deben tenerse en cuenta cuando se compruebe la pieza durante el destense. Los resultados alcanzados durante la evaluación de las pérdidas para las condiciones más generales y frecuentes que pueden presentarse, de hecho, las que condujeron a fijar las variables que intervienen en el modelo a partir de tales condiciones (destense a los 3 días, aceros de relajamiento bajo, humedad relativa ambiental del 80%, etc.), se resumen en las **Tablas A4.2, A4.3, A4.4, y A4.5**. De dichas Tablas se extraen, a manera de ejemplo, las caídas de tensión para el caso de la tipología **PPCC:6/60:30:T:5⁵**, a la que corresponden las mayores pérdidas:

Tabla A4.6 Pérdidas que tienen lugar en la tecnología **PPCC:6/60:30:T:5⁵**

SECCIÓN	f_{pu} (MPa)	LONGITUD (m)	Δf_{ES} (MPa)	$\Delta f_{ES}/f_{pu}$ (%)	$\Delta f_{diferida}$ (MPa)	$\Delta f_{diferida}/f_{pu}$ (%)
Transferencia	1770	3.00	66.1	3.7	168.4	9.5
		4.50	66.1	3.7	172.6	9.8
	1860	3.00	69.4	3.7	175.6	9.4
		4.50	69.4	3.7	179.8	9.7
Crítica	1770	3.00	66.8	3.8	169.4	9.6
		4.50	67.7	3.8	175.0	9.9
	1860	3.00	70.1	3.8	176.6	9.5
		4.50	71.0	3.8	182.1	9.8

Una lectura de los valores que se resumen en la **Tabla A4.6** permite asegurar que:

Para evadir el laborioso proceso de evaluación de las pérdidas que tienen lugar en el elemento que se viene investigando (PPCC), el usuario de esta tecnología puede recurrir a los siguientes coeficientes de reducción de la tensión de rotura (f_{pu}) para estimar las pérdidas iniciales y diferidas que se originan:

$\chi_i = 0.05$ Estimador para las **pérdidas iniciales** en la tecnología **PPCC**

$\chi_d = 0.10$ Estimador para las **pérdidas diferidas totales** en la tecnología **PPCC**

De esta manera la fuerza de pretensado inicial transferida (P_i) y la final efectiva (P_e), pueden calcularse de la manera siguiente:

FUERZA DE PRETENSADO INICIAL

$$\Delta f_{inicial} = \chi_i \cdot f_{pu} \Rightarrow f_{pi} = f_{pj} - \Delta f_{inicial} = \lambda_t f_{pu} - \chi_i \cdot f_{pu} = (\lambda_t - \chi_i) \cdot f_{pu}$$

Para $\lambda_t = 0.80$ y $\chi_i = 0.05$:

$$P_i = f_{pi} A_p = 0.75 f_{pu} A_p$$

FUERZA DE PRETENSADO EFECTIVA

$$\Delta f_{diferida} = \chi_d f_{pu} \Rightarrow f_{pe} = f_{pi} - \Delta f_{diferida} = 0.75 f_{pu} - \chi_d f_{pu} = (0.75 - \chi_d) f_{pu}$$

Para $\chi_d = 0.10$:

$$P_e = f_{pe} A_p = 0.65 f_{pu} A_p$$

- 5) Para una misma tipología en cuanto a sección transversal de la prelosa y variante de armado se refiere, en la sección extrema de la zona de transferencia la pérdida por acortamiento elástico del hormigón (Δf_{ES}) prácticamente no varía, aun cuando se modifique significativamente la longitud de la prelosa, y a pesar de que se cambie la calidad del acero empleado. En efecto, como

$$\Delta f_{ES} = K_{es} \frac{E_p}{E_{ci}} \left\{ 0.9 \left[\frac{P_i}{A_{pl}} + \frac{P_i}{I_{pl}} (e_o)^2 \right] + \frac{M_{gz}}{I_{pl}} e_o \right\}$$



Siendo:

$$M_{gz} = \psi(gl^2) = 0.5(l_{tr}/l)^2 gl^2 = 0.5gl_{tr}^2$$

Al ser tan pequeñas las longitudes de la zona de transferencia (l_{tr}), la influencia del término M_{gz} es prácticamente despreciable.

- 6) Los ensayos que puedan realizarse antes de decidir la producción seriada de esta tecnología, debe confirmar si durante el destense en la variante **PPCC: 6/60:30**, la pieza adopta convexidad al cortarse el acero, y en caso afirmativo evaluar si la longitud que realmente queda en voladizo es $l/4$, para ratificar o rectificar este valor que fue el asumido en el Trabajo.

ANEXO 5

**COMPORTAMIENTO DE LA PRELOSA.
ELEMENTOS TEÓRICOS PARA EL
ENSAYO FÍSICO DEL ELEMENTO**

Loja. 2013



A5.1 DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO FÍSICO DEL ELEMENTO PRELOSA-CARPETA

Durante el desarrollo de la investigación resultó imposible realizar el ensayo físico a flexión de la losa compuesta que resulta de la combinación de la prelosa y la carpeta colaborante que sobre ella se coloca, no porque se ignore el procedimiento, sino por los elevados costos en los que tendría que incurrir el investigador a causa de la inexistencia de los recursos necesarios en la región para construir la prelosa.

En el Ecuador, y muy especialmente en la Ciudad de Loja, no existen prácticamente Plantas de Prefabricación y mucho menos que permitan introducir el pretensado como alternativa de refuerzo, lo que resultaría muy conveniente en un futuro inmediato según pretende demostrar este estudio.

El investigador, junto al Director de la Tesis, realizó una visita en el mes de agosto de 2008 a la Planta de Prefabricado “PRECRETO”, perteneciente al Consorcio DITELME S.A (Distribuidora de Elementos Estructurales), situada en el Km. 19 Vía a la Costa, en la Ciudad de Guayaquil. Esta Planta produce en la actualidad elementos prefabricados de hormigón armado y pretensado, y según manifestara su Gerente General, Ing. Nery Hadatty M., resultaría muy estratégico desarrollar la técnica del pretensado en el País, y llegó a manifestar su interés de colaborar en un futuro en la instrumentación de los ensayos a la PPCC. Este apartado procura explicar el procedimiento que habría que seguir una vez que pueda contratarse el ensayo físico a la prelosa.

DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO:

Se trata del ensayo a un elemento simplemente apoyado sometido a cargas concentradas en el tercio medio de la luz¹. Los corrimientos verticales (flecha) en el centro de la luz y debajo de los puntos de aplicación de cada carga, se deben registrar mediante defórmómetros de carátula de lectura analógica. Además de estos defórmómetros se deben disponer defórmómetros electrónicos (“strain gage”) en tres niveles diferentes dentro de la altura de la sección compuesta que coincide con el centro de la luz, siendo uno de estos niveles el de la armadura pretensada. En los niveles superior e intermedio los “strain gage” se adhieren a la superficie exterior de hormigón en las dos caras laterales de la sección, mientras que los del tercer nivel se adhieren directamente al acero de refuerzo. La Figura A5.1 ilustra la implementación del ensayo físico, observándose que el elemento a ensayar (prelosa+carpeta colaborante) se apoya en cada extremo sobre una barra de acero de 25mm soldada a una viga metálica de gran peralte (rigidez) para simular la condición de simple apoyo que es la forma de trabajo real de la prelosa en el entrepiso o cubierta en que se emplee.

¹ Se considera simplemente apoyado el elemento a ensayar para reproducir exactamente la forma de trabajo de la prelosa dentro del entrepiso o cubierta en que se emplee. Además, se aplican las cargas en el tercio medio para garantizar que todas las secciones situadas entre sus puntos de aplicación se encuentren trabajando a flexión pura (cortante nulo), siempre que se desprecie el peso propio del elemento. Es cierto que la carpeta ofrece cierta continuidad entre las prelosas situadas en el entrepiso o cubierta, pero esta continuidad origina una flexión negativa que es tomada por la armadura que se sitúa precisamente en la carpeta.

Para lograr que el elemento reciba la carga concentrada en el tercio medio, a cada lado de estos apoyos y a la distancia $l/3$, se colocan sendas barras de acero de sección maciza (rodillos) de aproximadamente 3cm de diámetro sobre los que se dispone una viga metálica **I30**. La prensa, de una capacidad superior a las 60ton, aplica la carga mediante un plato en el centro de la luz de esta última viga, de manera que cuando se entrega la carga P , por cada rodillo estará bajando al elemento ensayado la carga $P/2$, precisamente en el tercio medio de la luz.

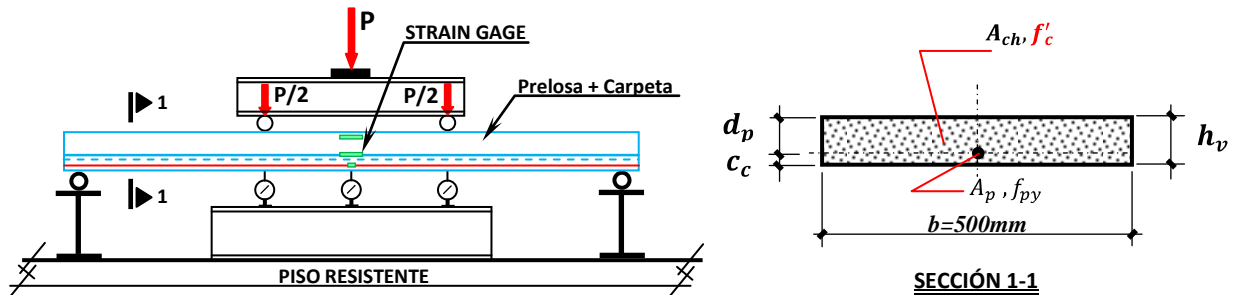


Fig. A5.1 Esquema del ensayo real a la prelosa con la carpeta colaborante.

En la **Figura A5.2** se ofrecen fotos de los “strain gage” que pueden ser utilizados durante el ensayo, lo mismo los que se adhieren exteriormente al hormigón, previa preparación de su superficie y empleo de la resina epoxi compatible con ellos, que los que se adhieren al acero pretensado anterior al vaciado del hormigón de la prelosa. Mientras tanto la **Figura A5.3** refleja la Cámara de Ensayo de control automático que existe en Laboratorio de Ensayo del Centro de Estudio de Construcción y Arquitectura Tropical (CECAT) del ISPJAE, lugar en el que se prevé realizar los ensayos cuando se logre el Proyecto de Financiamiento que se procura actualmente.

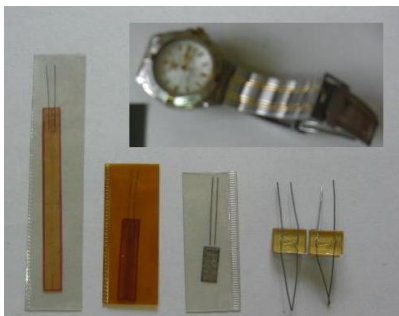


Fig. A5.2 Strain Gages a emplearse en el ensayo



Fig. A5.3 Cámara de Ensayo del CECAT



Fig. A5.4 Defórmetro de Carátula de lectura analógica



PROCEDIMIENTO:

- 1) Una vez estirado el acero pretensado en el banco de tesado y definiendo una longitud efectiva de 4.00m para la prelosa, se limpia bien su superficie en la mitad de esta longitud para adherir al acero, mediante una resina epoxi apropiada, un “strain gage” en cada uno de los que posee la prelosa de acuerdo a la tipología que se decida ensayar. Si la tipología es la **PPCC 6/60:30:T-5³/1770: C30** se trata de tres unidades de acero de 5mm, es decir, se estarían colocando tres “strain gage” de manera que de cada uno saldrán dos alambres calibrados que se conectarán al lector electrónico que registrará la deformación experimentada por el acero en dicha sección para cada escalón de carga. En teoría, como los tres strain gage se sitúan en la misma sección y a un mismo nivel, debe esperarse en todos la misma lectura de deformación, lo que no siempre sucede por las imprecisiones humanas que siempre están presentes, razón por la cual a nivel del refuerzo se considerará como lectura de deformación para cada escalón de carga, el valor promedio de las tres lecturas que se registran en él.

Con antelación se preparan tres probetas de este acero para ensayarlas luego a tracción y determinar el valor medio de su límite convencional de fluencia ($\overline{f_{py}}$):

$$\overline{f_{py}} = \frac{\sum_{i=1}^3 (f_{pyi})}{3}$$

- 2) Se vacía el hormigón de la prelosa, para esta tipología de 6cm de espesor, y se toman al menos seis probetas de esta amasada para luego ensayarlas y determinar el valor medio de su resistencia a compresión ($\overline{f'_{c1}}$):

$$\overline{f'_{c1}} = \frac{\sum_{i=1}^6 (\overline{f'_{ci}})}{6}$$

- 3) Esperado el tiempo estipulado, se corta el acero y se transfiere la fuerza de pretensado a la prelosa.
- 4) Luego se vacía el hormigón de la carpeta que, para la tipología seleccionada, será de 3cm de espesor, y se toman igual seis probetas de esta amasada para ensayarlas posteriormente y determinar el valor medio de su resistencia a compresión ($\overline{f'_{c2}}$):

$$\overline{f'_{c2}} = \frac{\sum_{i=1}^6 (\overline{f'_{ci}})}{6}$$

- 5) Fraguado el hormigón de la carpeta y completado el elemento de sección compuesta (prelosa+carpeta), se vuelve a identificar nuevamente la sección que se sitúa exactamente en la mitad de su longitud, pero ahora exteriormente. Se preparan ambas caras laterales de esta sección hasta lograr una superficie bien pulida y se adhieren a cada una sendos

strain gage en dos niveles diferentes: el primero a 3cm de la superficie superior del elemento, y el segundo a 3cm del anterior nivel (Ver **Figura A5.4**).

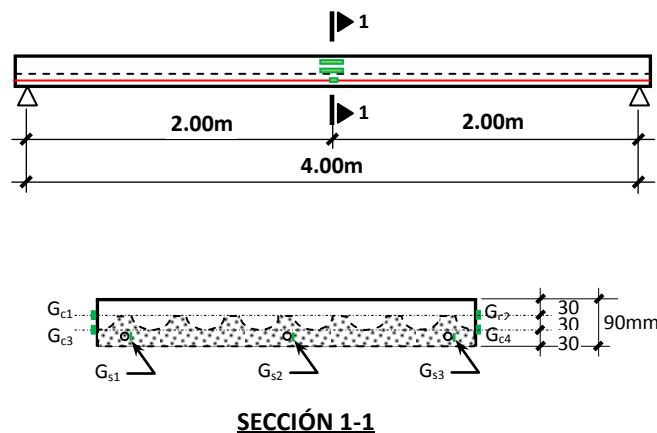


Fig. A5.5 Ubicación de los Strain Gage en el elemento a ensayar.

- 6) Posteriormente se coloca el elemento en la posición de ensayo y se preparan las condiciones para la transmisión de la carga según se describiera en párrafos anteriores. Este el momento de conectar los siete strain gage ya ubicados (tres en el acero y cuatro en la superficie de hormigón) al equipo registrador de deformación o lector electrónico (los hay en el mercado de varios canales). A continuación se disponen los defórmetros de carátula para leer la flecha que tiene lugar, y antes de iniciar el ensayo se ajustará la lectura de estos defórmetros en la posición de flecha nula, es decir, haciendo coincidir la aguja con el valor cero de su escala graduada, anulándose así la flecha que originó el peso propio del elemento y de todos los aditamentos que sobre él se sitúan.
- 7) A partir de esta operación se inicia el ensayo, aplicando el primer escalón de carga (P_1) y esperando al menos tres minutos para que se estabilice la elástica o deformada del elemento para este escalón. Transcurrido ese tiempo se procede a tomar la lectura en cada uno de los tres defórmetros de carátula que se han dispuesto (δ), y a la vez en cada uno de los siete "strain gage" que fueron colocados. Si bien los defórmetros de carátula leen corrimiento vertical (flecha), los "strain gage" miden el acortamiento o alargamiento normal a la sección transversal del elemento que experimenta la fibra a nivel del propio "strain gage".
- 8) El proceso se repite para varios escalones de carga (P_i) y en la medida en que se van tomando las lecturas se va construyendo una tabla como la que a continuación se ilustra:

LECTURA EN LOS DEFÓRMETROS				LECTURA EN LOS STRAIN GAGE									
				HORMIGÓN						ACERO			
ESCALÓN DE CARGA	δ_1	δ_2	δ_3	G_{c1}	G_{c2}	\overline{G}_{n1}	G_{c3}	G_{c4}	\overline{G}_{n2}	G_{s1}	G_{s2}	G_{s3}	\overline{G}_{n3}
P_1						a_1			b_1				c_1
P_2						a_2			b_2				c_2
P_3						a_3			b_3				c_3
.													
.													
..													
P_n						a_n			b_n				c_n

Siendo:

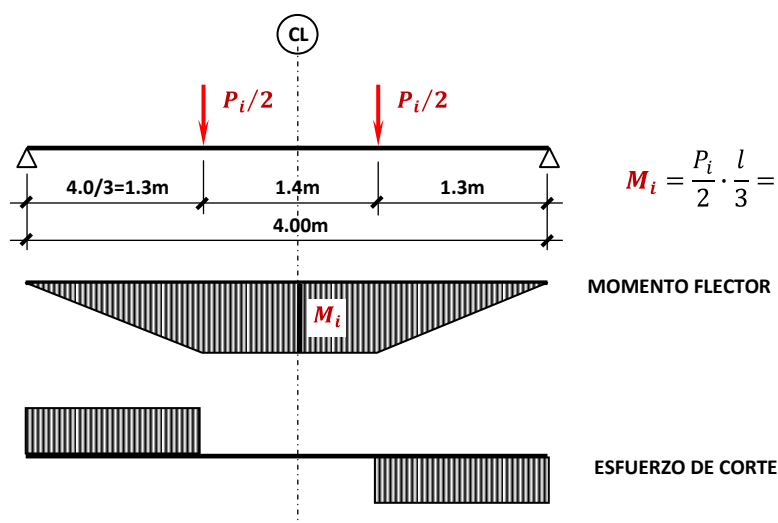
$$a_i = \frac{G_{c1(i)} + G_{c2(i)}}{2}$$

$$b_i = \frac{G_{c3(i)} + G_{c4(i)}}{2}$$

$$c_i = \frac{G_{s1(i)} + G_{s2(i)} + G_{s3(i)}}{3}$$

- 9) Ya en el gabinete se determina para cada escalón de carga P_i que se aplique durante el ensayo, el **momento flector** M_i que dicha carga origina en la sección central del elemento (precisamente en la que fueron ubicados los strain gage y el deformétero de carátula central), además del **giro** φ_i que experimenta dicha sección:

MOMENTO FLECTOR (M_i)



$$M_i = \frac{P_i}{2} \cdot \frac{l}{3} = \frac{P_i}{2} (1.3m) = 0.65P_i$$

Fig. A5.6 Evaluación del Momento Flector para cada Escalón de Carga.

GIRO (φ_i)

La elevada relación **luz/peralte** que posee el elemento ($4.0m/0.09m \approx 44 \gg 2$) permite asegurar que las secciones, todas planas antes de deformarse ($P_0 = 0$), continuarán siéndolo después de la deformación ($P_i \neq 0$), de manera que si se dibujan a escala las deformaciones normales registradas para cada escalón de carga durante el ensayo en cada uno de los tres niveles en que fueron situados los strain gage, (a_i, b_i, c_i), debe resultar una línea recta, lo que confirmaría además la ley de Navier-Bernolli. La **Figura A5.7** ilustra esta idea.

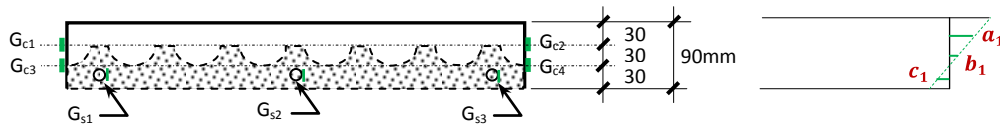


Fig. A5.7 Definición del estado deformacional de la sección para cada escalón de carga.

Producto de las imprecisiones inevitables durante la toma de las lecturas en cada uno de los strain gage, a pesar de ser lecturas digitales, no debe reproducirse exactamente la línea recta que se espera como estado deformacional dentro de cada escalón, recomendándose realizar un ajuste por mínimos cuadrados a la función lineal de mayor convergencia:

$$y_i = (m_i)x + b_i$$

Una vez ajustado el estado deformacional, es decir, conocida la función lineal que lo define, se puede determinar los valores de c_i y ε'_{ci} , para con ellos evaluar φ_i .

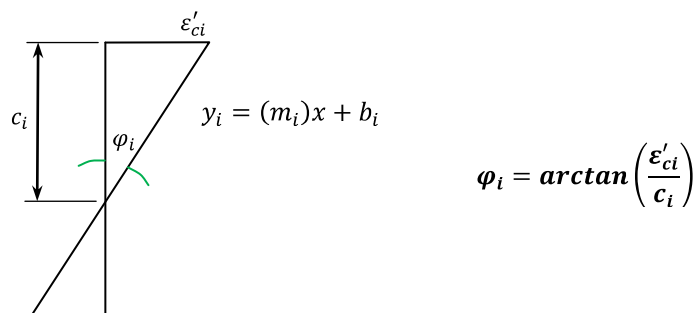


Fig. A5.8 Evaluación del ángulo de giro de la sección para cada escalón de carga.

- Definidos los pares ordenados ($M_i ; \varphi_i$) se construye el gráfico de comportamiento “real” de la sección que se ha analizado.



A5.2 COMPORTAMIENTO TEÓRICO DEL ELEMENTO PRELOSA-CARPETA

La construcción de la **Curva Teórica de Comportamiento** (M vs φ) para la prelosa se construye con el interés de compararla con la **Curva Real** que resulta del ensayo físico descrito en el párrafo anterior.

El comportamiento teórico se basa en dos principios fundamentales reconocidos por los reglamentos y documentos normativos internacionales:

- ☞ Asegurar el equilibrio estático de la sección, igualando la solicitación actuante con aquellas otras que, como respuesta, originan los esfuerzos que tienen lugar lo mismo en el hormigón que en las barras de refuerzo.
- ☞ Garantizar la compatibilidad de deformaciones entre el acero y el, lo que presupone adherencia perfecta entre ambos materiales.

Como el primero de estos dos principios refiere esfuerzos (tensiones) mientras el segundo deformaciones, es evidente que en la solución del problema se deba introducir el juego de ecuaciones constitutivas de los materiales (llamadas también ecuaciones físicas), que se encargan de relacionar, precisamente, tensiones con deformaciones ($\sigma \sim \varepsilon$), es decir, a partir de fijar deformaciones en cada material y definidas sus ecuaciones constitutivas, determinar las tensiones correspondientes en cada uno para finalmente establecer el equilibrio.

Definitivamente la acción de la solicitación actuante (cualquiera sea su tipo) origina en la sección una respuesta que la equilibra (acciones activas equilibradas por las acciones reactivas), lo que para el caso de las solicitaciones normales el equilibrio quedaría expresado de la manera siguiente:

$$\sum \text{Fuerzas Normales} = 0$$

$$\sum \text{Momentos} = 0$$

Resuelto este modelo para diferentes deformaciones que se fijen a nivel de la fibra más comprimida de la sección (ε'_c), se obtiene para la prelosa **PPCC 6/60:30:T-5³/1770: C30** la curva de comportamiento (M vs φ) que se ilustra en la **Figura A5.9**, a la que luego debe suponerse la que resulte del ensayo físico para validar la certeza de los modelos analíticos empleados durante el desarrollo de la investigación.

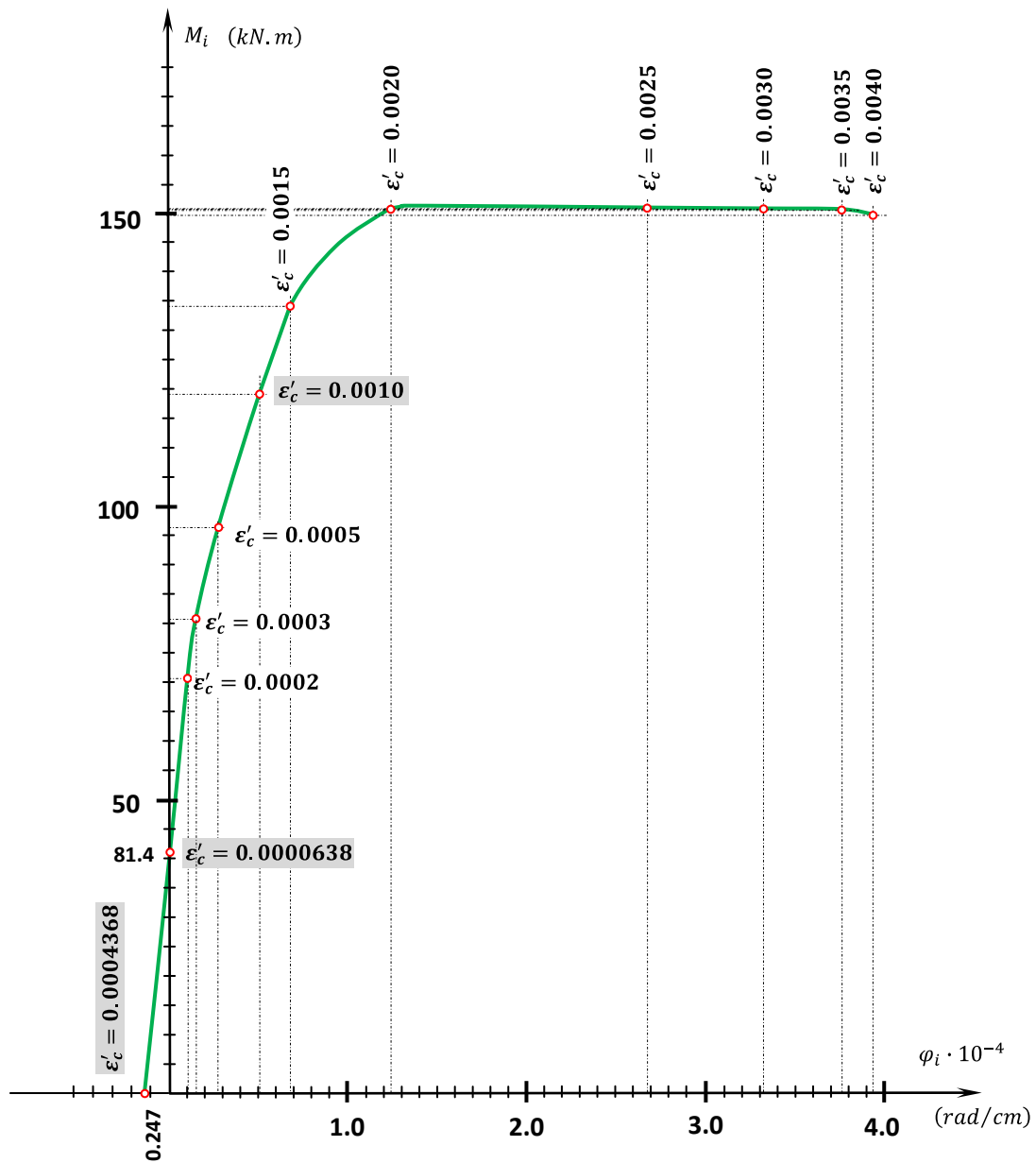


Fig. A5.9 Diagrama de Comportamiento Teórico de la Preloso PPCC 6/60:30:T-5³/1770