

**CONSTRUCCIÓN DE PUENTES EN COLOMBIA. ESTADO ACTUAL Y
PERSPECTIVAS FUTURAS.**

**GERSON FABIAN LUNA ALARCON
MARIA ANGELICA ALARCON TARAZONA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIA FISICO-MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA
2013**

**CONSTRUCCIÓN DE PUENTES EN COLOMBIA. ESTADO ACTUAL Y
PERSPECTIVAS FUTURAS.**

**GERSON FABIAN LUNA ALARCON
MARIA ANGELICA ALARCON TARAZONA**

**Trabajo de grado modalidad Investigación para optar al título de:
Ingeniero Civil**

**Director:
ÁLVARO VIVIESCAS JAIMES
PhD. Ing. Civil**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIA FISICO-MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA
2013**

AGRADECIMIENTOS

A Dios que me tiene con vida, me da fortaleza y me escucha todos los días de mi vida.

A mi papá con quien siempre conté de forma incondicional, apoyo y consejos los cuales me ayudaron a crecer como persona.

A mi mamá quien ha sido de gran motivación debido a su gran ejemplo de vida que de una forma u otra fue de gran inspiración para convertirme en la persona que soy.

A todos mis hermanos quienes siempre me motivaron para seguir adelante.

Al profesor Viviescas que siempre estuvo disponible para colaborarnos, guiarnos y enseñarnos todo lo referente a este proyecto.

Al profesor Álvaro Rey quien siempre fue un apoyo durante toda mi carrera, dándome consejos valiosos e informándome en el campo de la ingeniería.

María Angélica Alarcón Tarazona

AGRADECIMIENTOS

A Dios porque siempre ha estado presente en mi vida y ha permitido que me encuentre rodeado de grandes personas.

A mi familia, principalmente a mis padres Belisario Luna Remolina y Martha Patricia Alarcón Beltrán ya que siempre han estado a mi lado permitiendo que crezca como persona y enseñándome a valorar las cosas que Dios nos da cada día. Además porque siempre me han apoyado y orientado a largo de mi carrera y vida.

A mi hermano José Leonardo que siempre ha sido un gran amigo incondicional.

Al profesor y amigo Álvaro Viviescas Jaimes, por su apoyo durante gran parte de mi carrera y principalmente por su tiempo y dedicación en la realización de este proyecto de grado.

Gerson Fabián Luna Alarcón.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
1. INTRODUCCION.....	16
2. GENERALIDADES.....	18
2.1 CLASIFICACION DE LOS PUENTES.....	18
3. SISTEMAS CONSTRUCTIVOS EN COLOMBIA.....	20
3.1 VOLADIZOS SUCESIVOS.....	20
3.1.1 INTRODUCCIÓN.....	20
3.1.2 HISTORIA.....	22
3.1.2.1 HISTORIA EN COLOMBIA DE LOS VOLADIZOS SUCESIVOS.....	23
3.1.3 EQUIPOS AUXILIARES PRINCIPALES.....	24
3.1.3.1 CARRO DE AVANCE.....	24
3.1.3.2 TORRE GRUA.....	25
3.1.4 PROCESO CONSTRUCTIVO.....	27
3.1.5 OPERACIONES DE AVANCE.....	28
3.1.5.1 OPERACIONES PRELIMINARES.....	28
3.1.5.1.1 EJECUCION DE LA DOVELA DE PILA O DOVELA “0”.....	28
3.1.5.1.2 COLOCACION DE LOS CARROS DE AVANCE.....	30
3.1.5.2 OPERACIONES BASICAS DE EJECUCION.....	31
3.1.5.2.1 AVANCE DEL CARRO.....	31
3.1.5.2.2 CONSTRUCCION DE LAS DOVELAS.....	32
3.1.6 CAUSAS DE UNA POSIBLE EVOLUCION DE LOS PUENTES EN VOLADIZO SUCESIVO “IN SITU” EN COLOMBIA.....	36
4. TECNICAS MODERNAS PARA LA CONSTRUCCION DE PUENTES DE LUCES MEDIAS.....	39
4.1 VOLADIZOS SUCESIVOS POR DOVELAS PREFABRICADAS.....	39
4.1.1 INTRODUCCION.....	39
4.1.2 HISTORIA.....	40
4.1.3 PROCESO CONSTRUCTIVO.....	42
4.1.3.1 FORMAS DE LAS DOVELAS.....	42
4.1.3.2 JUNTAS.....	43
4.1.3.3 CONSTRUCCIÓN DE LAS DOVELAS.....	44
4.1.3.4 COLOCACION DE DOVELAS.....	52

4.2 PUENTES EMPUJADOS.	55
4.2.1 INTRODUCCION.	55
4.2.2 HISTORIA.	57
4.2.3 PROCESO CONSTRUCTIVO.	57
4.2.3.1 LANZAMIENTO COMPLETO.	58
4.2.3.2 TRANSLACION TRANSVERSAL.	59
4.2.3.3 LANZAMIENTO POR SEGMENTOS.	60
4.2.3.3.1 ELEMENTOS AUXILIARES.....	62
4.2.3.3.1.1 PARQUE DE FABRICACION.....	62
4.2.3.3.1.2 NARIZ DE LANZAMIENTO.....	66
4.2.3.3.1.3 SISTEMA DE EMPUJE.....	68
4.2.3.3.1.4 APOYOS DESLIZANTES.	70
4.2.4 CARACTERISTICAS PRINCIPALES.	71
4.3 PUENTE PRETENSADO EXTRADOSADO.	72
4.3.1 INTRODUCCION.	72
4.3.1.1 CONFIGURACIONES TIPICAS DE LOS CABLES EXTRADOSADOS.....	75
4.3.2 HISTORIA.	76
4.3.3 PROCESO CONSTRUCTIVO.	77
4.4 PUENTES CON CIMBRAS AUTOPORTANTES.	79
4.4.1 INTRODUCCION.	79
4.4.2 HISTORIA.	81
4.4.3 PROCESO CONSTRUCTIVO.	84
5. SISTEMAS CONSTRUCTIVOS DE PUENTES RECOMENDADOS PARA EL CASO COLOMBIANO EN LUCES MEDIAS.	89
6. ESTUDIO COMPARATIVO DE COSTOS A NIVEL PRELIMINAR.	91
7. CONCLUSIONES.	97
8. BIBLIOGRAFÍA.	101
9. ANEXO A. PRESUPUESTO DEL PUENTE CAJAMARCA DE LA CARRETERA ARMENIA - IBAGUE	104

TABLA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Distribución y configuración de las dovelas en voladizos sucesivos	20
Figura 2. Hormigonado de las dovelas en doble fase	21
Figura 3. Puente sobre el rio Magdalena en Barranquilla. 1974	23
Figura 4. Puente sobre el rio Juanambu. 1976	24
Figura 5. Partes del carro de avance	25
Figura 6. Partes de una torre grúa	26
Figura 7. Avance por medio de voladizos sucesivos en forma de “T”	27
Figura 8. Esquema de ejecución de la dovela “0”.Colocación de la plataforma de soporte.....	28
Figura 9. Esquema de ejecución de la dovela “0”.Hormigonado de tabiques y secciones laterales	29
Figura 10. Esquema de ejecución de la dovela “0”. Armado y hormigonado de losa superior.....	30
Figura 11. Colocación de dos carros de avance sobre una pila.....	31
Figura 12. Avance y fijación del carro	32
Figura 13. Colocación de las vainas de pretensado	33
Figura 14. Hormigonado de la losa superior de la dovela	34
Figura 15. Voladizos sucesivos. Paso antes de la dovela de cierre.....	35
Figura 16. Voladizos sucesivos. Dodela de cierre.....	36
Figura 17. Construcción de un muro de mampostería	38
Figura 18. Construcción de un muro estructural	38
Figura 19. Construcción del puente Castejón por medio de dovelas prefabricadas	39
Figura 20. Puente Almodóvar. Primer puente construido en España por dovelas prefabricadas	40
Figura 21. Diferentes trazos con pretensado exterior	41
Figura 22. Sección transversal de una dovela prefabricada	42
Figura 23. Método de la línea larga (long – line casting)	45
Figura 24. Método de la línea corta (short – line casting)	46

Figura 25. Colocación de refuerzo en dovelas prefabricadas	47
Figura 26. Encofrado inferior usado en la fabricación de dovelas prefabricadas ..	48
Figura 27. Hormigonado de la parte inferior de una dovela prefabricada	49
Figura 28. Dovela conjugada	49
Figura 29. Curado al vapor por medio de coberturas móviles.....	50
Figura 30. Retirada de la dovela conjugada.....	51
Figura 31. Almacenamiento de dovelas	52
Figura 32. Viga de lanzamiento usado en el montaje de dovelas prefabricadas ..	53
Figura 33. Ciclo completo de una viga de lanzamiento.....	54
Figura 34. Viaducto Silleda, construido mediante el sistema de empuje	55
Figura 35. Construcción de puente empujado con radio de curvatura constante .	56
Figura 36. Primer puente construido por empuje. Caroní, Venezuela	57
Figura 37. Empuje por lanzamiento completo desde los dos extremos del puente	58
Figura 38. Detalles constructivos del tablero antes de realizar el lanzamiento completo	59
Figura 39. Construcción de un puente por medio de translación transversal.....	60
Figura 40. Ley de momentos durante el empuje.....	61
Figura 41. Sección transversal de una dovela por el sistema de empuje	61
Figura 42. Distribución de las luces en puentes empujados	62
Figura 43. Parque de fabricación en puentes empujados	63
Figura 44. Zonas que conforman el parque de fabricación	64
Figura 45. Montaje del acero de refuerzo	64
Figura 46. Alzado y colocación del acero en el parque de fabricación	65
Figura 47. Empuje del tablero en el parque de fabricación	65
Figura 48. Pernos usados en la conexión de las partes de la nariz de lanzamiento	66
Figura 49. Nariz de lanzamiento para un puente empujado.....	67
Figura 50. Gatos especiales para recuperar altura	68
Figura 51. Gato hidráulico para el sistema de empuje.....	69

Figura 52. Apoyo de neopreno teflón.....	70
Figura 53. Sistema de frenado del tablero	71
Figura 54. Perfil del puente extradadosado los Trillizos Bolivia	72
Figura 55. Puente extradadosado los Trillizos inaugurado en Noviembre de 2010 ..	73
Figura 56. Puente sobre el puerto Cadiz, España	74
Figura 57. Puente sobre el rio Deba, España	74
Figura 58. Configuración de los cables tipo abanico.....	75
Figura 59. Configuración de los cables tipo harpa	75
Figura 60. Propuesta del viaducto Arrêt Darré	76
Figura 61. Primer puente extradadosado. Odawara Blueway.....	77
Figura 62. Etapas constructivas del puente Tokinoyama, Japón	78
Figura 63. Viaducto Cofrentes construido por autocimbra	79
Figura 64. Esquema del avance de la cimbra autoportante	80
Figura 65. Puente en Gerona, España. Primer puente construido por autocimbra	81
Figura 66. OPS. Sistema de control activo basado en el comportamiento del musculo	82
Figura 67. Funcionamiento del OPS	83
Figura 68. Autocimbra inferior usando sistema OPS	84
Figura 69. Construcción del primer vano del puente por autocimbra.....	85
Figura 70. Desplazamiento de la autocimbra para la construcción del segundo vano	85
Figura 71. Encofrado de la cimbra autoportante	86
Figura 72. Hormigonado del último vano por autocimbra.....	86
Figura 73. Ejecución de cimbra autoportante.....	87
Figura 74. Viaducto Arroyo del Valle.....	92
Figura 75. Viaducto Arroyo del Valle construido con cimbra autoportante.....	92
Figura 76. Puente Cajamarca de la carretera Armenia - Ibagué.....	93
Figura 77. Puente Cajamarca construido por voladizos sucesivos “in situ”	94

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Presupuesto del puente cajamarca de la carretera armenia - ibague.....	104

RESUMEN

TITULO:

CONSTRUCCIÓN DE PUENTES EN COLOMBIA. ESTADO ACTUAL Y PERSPECTIVAS FUTURAS.*

AUTORES:

GERSON FABIAN LUNA ALARCON

MARIA ANGELICA ALARCON TARAZONA **

PALABRAS CLAVES:

Puentes, voladizos sucesivos, autocimbra, empuje.

CONTENIDO:

Hoy en día tras la incorporación de nuevos tratados comerciales de Colombia con otros países se ha logrado un incremento considerable en la construcción de puentes y grandes viaductos motivada principalmente por lograr una mejor red vial para así aumentar la competitividad del mercado colombiano.

A raíz de la necesidad que surge en Colombia actualmente de acometer una gran cantidad de puentes, se hacen necesarios procesos constructivos que ayuden a agilizar la construcción de puentes, motivo por el cual se pretende dar a conocer otros procesos constructivos implementados actualmente en muchas partes del mundo con el fin de motivar su posible incorporación de por lo menos uno de estos al caso colombiano y así lograr obtener disminuciones tanto de tiempos de obra como de costos.

Dentro de estos sistemas constructivos industrializados utilizados principalmente en Europa y Asia para la construcción de puentes en concreto de luces medias se trataran los correspondientes a puentes con cimbra autoportante, puentes empujados, puentes extradosados y puentes construidos con voladizos sucesivos con dovelas prefabricadas.

Finalmente se realizará una comparación económica a modo preliminar con el fin de tener una aproximación de los costos que genera la construcción de los voladizos sucesivos "in situ" (predominante en Colombia) con una de las técnicas de mayor uso en otros países como son sistemas de autocimbra, empuje, entre otros.

*Proyecto de grado.

** Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de ingeniería civil. Director: Álvaro Viviescas Jaimes.

SUMMARY

TITLE: BRIDGE CONSTRUCTION IN COLOMBIA. ACTUAL STATE AND FUTURE PERSPECTIVES. *

AUTHORS:

GERSON FABIAN LUNA ALARCON

MARIA ANGELICA ALARCON TARAZONA **

KEYWORDS:

Bridges, balanced cantiléver method, movable scaffolding system, incremental launching

CONTENT:

Nowadays after the incorporation of new trade treaties in Colombia with other countries a remarkable increase in the construction field has been achieved, bridges and viaducts, driven mainly to obtain a better motorway infrastructure in order to increase competitiveness in the Colombian market.

In the wake of the need that arises in Colombia in this moment of building a great amount of bridges, it is necessary building process that speed up building construction, taking into account the later the pretension of this work is to inform about other construction processes implemented in other countries around the world with the purpose of motivating the incorporation of such processes or at least one in Colombia and with this diminish time as well as cost in the building sites.

In these industrialized building systems used primarily in Europe and Asia to build concretes bridges of lights mean the formwork for movable scaffolding system, incremental launching, bridge Extradosed and bridges constructed with balanced cantilever method.

Finally a preliminary economical comparison will take place with the purpose of having an approach to the costs that construction of jutting out on site generates in Colombia using worldwide spread techniques such as movable scaffolding system (MSS), incremental launching, among others.

*Research Work.

** Physical mechanics engineering facult. Civil engineering school. Project director: Álvaro Viviescas Jaimes

1. INTRODUCCION.

Observando la realidad de nuestro país y tratándose del tema de la ingeniería de puentes, Colombia ha tenido un gran rezago en infraestructura vial debido a la escasa apuesta de los gobiernos nacionales de invertir en grandes obras.

En los últimos años se ha ido generando conciencia colectiva de situar a la infraestructura en los primeros renglones de los planes de inversión tanto nacionales como regionales. Ha sido hasta comienzos del siglo XXI que se ha empezado a estructurar proyectos de infraestructura ambiciosos que sin el temor de utilizar puentes y túneles se conviertan en verdaderas soluciones para mejorar la competitividad del país. Consecuencia de ello, en la actualidad se están ejecutando megaproyectos como la Ruta del Sol y los recientemente adjudicados Corredores de la Prosperidad. Unido a ello, la entrada en vigor del Tratado de Libre Comercio (TLC) con Estados Unidos acrecienta esta demanda de más y mejores vías de comunicación.

Debido a las especiales condiciones orográficas de Colombia, se hace necesaria la construcción de puentes de grandes y medianas luces para la mayoría de los proyectos viales y evitar repetir la situación existente donde las vías se construyen a media ladera bordeando nuestras montañas y generando grandes impactos ambientales por la gran cantidad de vegetación que debe ser removida, además de los permanentes deslizamientos que se generan, dejando así incomunicados diferentes sectores nacionales.

Consecuencia de lo anterior es escasa y prácticamente nula la existencia de grandes viaductos en Colombia, generando así un retraso en la ingeniería nacional de puentes.

Finalmente parece ser que la reciente ola invernal que ha sufrido todo el territorio nacional durante 2010 y 2011 ha sido el punto de inflexión en toda esta situación y se empieza a vislumbrar un esperanzador panorama en el sector infraestructura, confiando en los recientes y constantes llamados del gobierno nacional para que a partir de ahora se proyecten las vías buscando el trazado más estable y de menor impacto ambiental sin restringirse por motivos económicos a soluciones limitadas técnicamente.

A partir de esta nueva necesidad y de la importancia con respecto a este tema, es necesario proyectar nuevos puentes y grandes viaductos en el país, por lo que la

ingeniera nacional debe mirar hacia diversas tipologías de puentes y técnicas novedosas utilizadas en países más desarrollados, con el fin de evaluar la posibilidad de incorporar algunas de estas técnicas a nuestro medio.

En Colombia ha sido una constante que casi todo gran viaducto se acometa con la técnica de los voladizos sucesivos fundidos “in situ” es por eso que este documento pretende dar a conocer diversos sistemas constructivos que han tenido gran acogida en el campo de ingeniería de puentes a nivel internacional y que se han desarrollado como evolución a los voladizos por nuevas necesidades (menores tiempos de construcción, mayor control de calidad, etc.).

2. GENERALIDADES.

La construcción de puentes tiene como objetivo comunicar dos puntos geográficos salvando obstáculos naturales como pueden ser ríos, lagos, valles; así también puede tener obstáculos artificiales como son las carreteras, vías férreas, entre otros.

Los voladizos sucesivos es una de las alternativas que pueden ser usados para el caso de puentes en sección cajón de luces medias y grandes, en el desarrollo del presente documento se tratara el sistema de avance en voladizo para dovelas hormigonadas "in situ" ya que es el sistema constructivo más utilizado en Colombia. Esta técnica ha estado acorde a nuestras necesidades de poca demanda en infraestructura y de no tener en cuenta el tiempo de construcción de la obra. Por otra parte se detallaran sistemas constructivos utilizados en países más desarrollados que han tenido gran éxito tanto en tiempo de construcción como en mejora de costos; como es el caso de los puentes con dovelas prefabricadas, puentes empujados, de autocimbra y extradados. Todas estas técnicas han surgido como evolución a los tradicionales voladizos sucesivos.

Estos sistemas constructivos de puentes son utilizados básicamente para salvar luces medias las cuales pueden variar en un rango entre 30 y 90 metros aproximadamente. Además de describir los sistemas constructivos mencionados anteriormente se realiza una evaluación comparativa contra alguna de las técnicas modernas con miras a su posible incorporación al caso colombiano para ir obteniendo una natural evolución como ya lo han tenido países más desarrollados especialmente en Europa.

Es importante tener en cuenta que la clasificación de los puentes no se debe únicamente a un proceso constructivo sino por el contrario existe otras clasificaciones como pueden ser según su funcionalidad, el tipo y material de la superestructura y su geometría.

2.1 CLASIFICACION DE LOS PUENTES

Los puentes se pueden clasificar:

- Según su funcionalidad: los puentes pueden ser viaductos, pasos elevados, pasos peatonales.

- Según el tipo de superestructura: los puentes pueden ser de losa maciza, losa aligerada, viga sección cajón, viga T, viga I, en arco, entre otros.
- Según su geometría: los puentes pueden ser rectos, curvos tanto en planta como en perfil o esviados.
- Según el material de la superestructura: los puentes pueden ser de hormigón armado, hormigón pretensado, de acero o mixtos.
- Según el procedimiento constructivo: los puentes pueden ser hormigonados “in situ”, prefabricados, puentes empujados, puentes construidos con autocimbra, puentes extradados y puentes por voladizos sucesivos.

En la construcción de tableros “in situ” existe una gran multitud de variantes desde procesos muy artesanales a los altamente industrializados. Todos ellos se caracterizan por la presencia de dos elementos base: el encofrado que da forma a la sección transversal o viga y la cimbra, que lo sostiene en su sitio. (Manterola, 2006).

En este documento se abordara el estudio bajo la clasificación de puentes según el procedimiento constructivo teniendo en cuenta que se trabajara con secciones de viga cajón hormigonados “in situ”.

3. SISTEMAS CONSTRUCTIVOS EN COLOMBIA.

En este primer capítulo se abarcará el tema referente a los puentes por voladizo sucesivo “in situ” debido a que este es el sistema más utilizado en nuestro país.

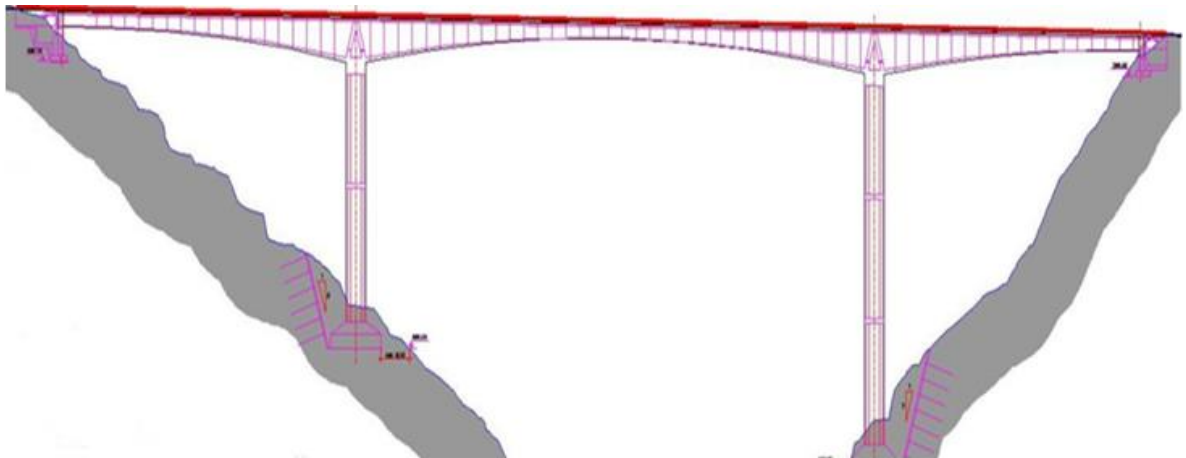
3.1 VOLADIZOS SUCESIVOS.

3.1.1 INTRODUCCIÓN.

Los sistemas constructivos mediante puentes por voladizos sucesivos se encuentran relacionados directamente en Colombia con puentes de grandes y medianas luces además de ser el proceso constructivo con mayor cantidad de puentes construidos en Colombia.

En la figura 1, se muestra la distribución de las dovelas en el tablero de un puente construido mediante voladizos sucesivos “in situ”. El perfil corresponde al viaducto V9 Açores ubicado en Portugal, con un vano central de 185 metros.

Figura 1. Distribución y configuración de las dovelas en voladizos sucesivos.



FUENTE: Viaducto V9 Açores, Portugal ConstruGomes.

Para la construcción de un puente por medio de voladizos sucesivos “in situ” se puede realizar por medio de los siguientes procesos:

- ✓ Avance en voladizo asimétrico: Es también llamado construcción evolutiva, este proceso consiste en construir el puente avanzando por un solo lado. Para la utilización de este tipo de avance se debe usar un atirantamiento

provisional desde la pila ya construida la cual tiene como función sostener la parte más avanzada del tablero.

Es importante tener en cuenta que durante este proceso constructivo se tienen dos problemas principalmente, por un lado las variaciones de temperatura las cuales afectan los cables, lo que produce deformaciones en el dintel. Además como segundo inconveniente se debe realizar una adecuación en el tamaño de los carros al dintel ya que estos son muy pesados los momentos flectores que se producen durante la construcción pueden llegar a ser muy altos y como consecuencia se tendría un sobre costo en el pretensado del dintel e incluso un sobredimensionamiento.

- ✓ Hormigonado de las dovelas en doble fase: Es también llamado voladizos compensados, en este caso es necesario establecer un encofrado previo que saliendo de la pila permite realizar un pequeño voladizo lateral en donde puede instalarse un carro de avance con el fin de poder realizar una primera dovela, llamada también dovela "0". Una vez realizada dicha dovela el carro puede trasladarse para posteriormente realizar el montaje del segundo carro y así empezar la fundida de las dovelas en los dos sentidos, saliendo de la pila hasta el centro de los vanos. En la figura 2 se muestran dos carros de avance ubicados sobre una pila con el fin de iniciar el hormigonado en doble fase del viaducto Montabliz cuya longitud total del tablero es de 725 metros, con un vano central de 175 metros y un ancho de 26.1 metros.

Figura 2. Hormigonado de las dovelas en doble fase.



FUENTE: Viaducto Montabliz. ConstruGomes.

3.1.2 HISTORIA.

Este procedimiento fue usado por primera vez en estructuras metálicas en el siglo XIX. El Firth of Forth y muchos otros puentes metálicos en celosía se construyeron por este procedimiento. (Manterola, 2006).

El primer puente de hormigón construido por voladizos sucesivos fue el de Santa Catalina, sobre el río Peixe, cerca de Herval, en Brasil, en el año 1931 por el Ing. Baumgarten. Es un puente de hormigón armado con dintel continuo de tres vanos con 68 metros de luz central, siendo récord del tramo recto durante algunos años. (Fernández Casado, et al., 1970). Este puente además de haber sido el primer puente construido por el método de voladizos sucesivos en concreto marco un gran desarrollo debido al uso de hormigón pretensado.

Este sistema constructivo fue de poca importancia en la época, pues solo se aplicó a tres o cuatro puentes más de pequeñas dimensiones. Fue una anticipación novedosa y prematura, ya que el hormigón armado se prestaba mal al construir un dintel con numerosas juntas transversales. (Fernández Casado, et al., 1970).

Este procedimiento vuelve a ser utilizado veinte años después y se aplica en el puente de Balduinstein, sobre el Lahn, tramo compensado de modo natural con una luz libre de 62.10 metros, en el cual quedan fijadas las características del sistema con avance por carro, motivo por el cual logró una gran acogida ya que el pretensado permitió cortar por juntas verticales pues su localización va de acuerdo con la distribución tensional correspondiente al pretensado. (Fernández Casado, et al., 1970).

3.1.2.1 HISTORIA EN COLOMBIA DE LOS VOLADIZOS SUCESIVOS.

Los voladizos sucesivos “in situ” aparecen en Colombia en los años 70 usado en la construcción del puente sobre el río Magdalena en Barranquilla (figura 3), cuyo tramo principal se encuentra dividido en una luz central de 140 metros y dos luces laterales de 69 metros, en este puente se combinaron los voladizos sucesivos con cables exteriores provisionales y un tirante definitivo anclado. La altura de la sección transversal es de 3 metros siendo constante durante toda su longitud. Este puente fue puesto en servicio a mediados de 1974.

Figura 3. Puente sobre el río Magdalena en Barranquilla. 1974



FUENTE: Google Imágenes.

Posteriormente en el año 1976 se construye el primer puente donde es utilizado únicamente el método de los voladizos sucesivos “in situ” sobre el río Juanambu (figura 4), cuyo vano principal es de 90 metros con dos luces laterales de 45 metros. En este puente las dovelas fueron disminuyendo de altura a medida que se acercaba al centro del vano.

Figura 4. Puente sobre el rio Juanambu. 1976.



FUENTE: Google Imágenes.

3.1.3 EQUIPOS AUXILIARES PRINCIPALES.

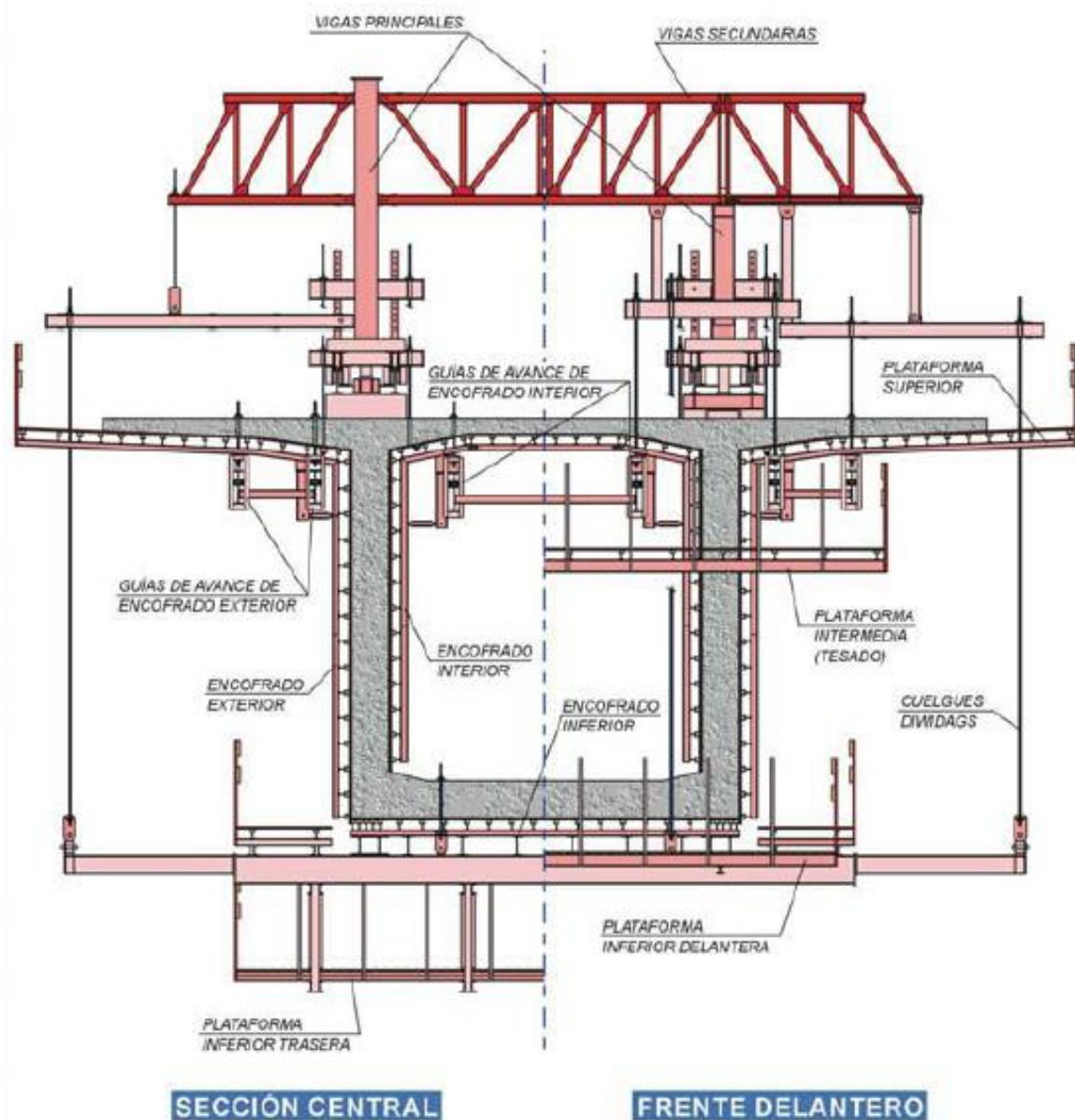
A continuación se dará una breve descripción sobre los equipos auxiliares más usados en la construcción de puentes por voladizos sucesivos “in situ” en los que se encuentran los carros de avance y torre grúa.

3.1.3.1 CARRO DE AVANCE.

Los carros de avance son el principal equipo auxiliar de este sistema constructivo, son utilizados como estructuras auxiliares que sirven para crear una zona de trabajo aérea y poder realizar la armada y fundida de las dovelas.

Los carros de avance están conformados por vigas metálicas principales, vigas metálicas transversales, apoyos frontales, anclaje trasero, vigas de rodadura, vigas y elementos que soportan el encofrado, pisos de trabajo, elementos auxiliares y plataformas auxiliares. (Gerardino Perdomo, 2011). En la figura 5 se muestra las partes principales del carro de avance además de los encofrados utilizados para la armada y fundida de las dovelas del puente.

Figura 5. Partes del carro de avance.



FUENTE: Informe técnico de la construcción del viaducto Las Salinas (Viera, 2006).

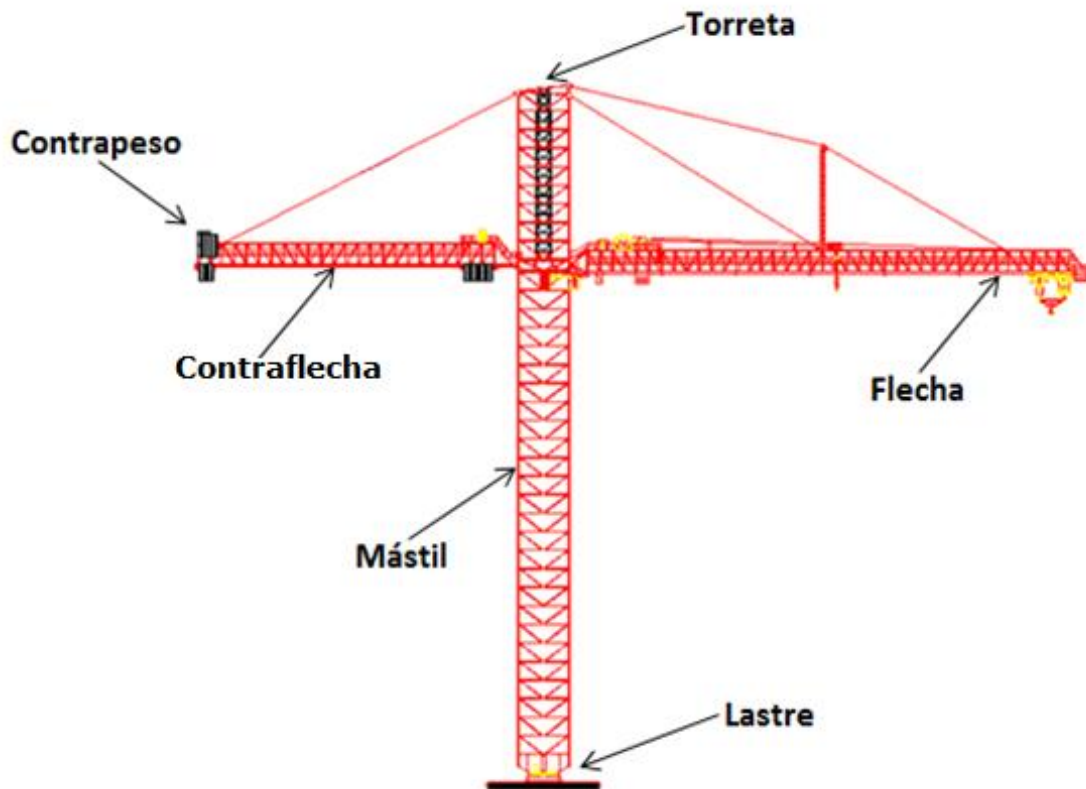
3.1.3.2 TORRE GRUA.

La torre grúa es un equipo auxiliar que sirve para elevar materiales y elementos empleados en la construcción de puentes, desplazándose por un carro a lo largo de una pluma. La grúa es orientable y su soporte giratorio es colocado sobre la parte superior de una torre vertical.

La torre grúa suele ser de instalación temporal, la cual sirve para soportar diferentes montajes y desmontajes así como traslados a diferentes lugares. En la construcción de los puentes este sistema es muy utilizado para llevar materiales (principalmente acero, concreto y partes de los carros de avance) de la parte inferior de las pilas hacia los carros de avance u otros lugares de trabajo.

La torre grúa está conformada por una torre metálica compuesta por contrapeso, contraflecha, flecha, torreta, mástil y lastre principalmente. En la figura 6 se muestra las partes principales de la torre grúa usada para el transporte interno de la obra de materiales además de servir para la colocación de las partes del carro de avance usado para la construcción de dovelas en puentes construidos por voladizos sucesivos “in situ”.

Figura 6. Partes de una torre grúa.



FUENTE: Modificado de tecnologia.teoriza.es

3.1.4 PROCESO CONSTRUCTIVO.

Este procedimiento constructivo de puentes por voladizos sucesivos hormigonados “in situ” por medio de un carro de avance es puesto en gran funcionamiento después de la guerra mundial para reconstruir la gran cantidad de puentes destruidos. Este sistema surgió nuevamente en Alemania en 1950 con el puente de Lahn después de haber sido utilizado veinte años atrás en Brasil. (Pérez y Herrero, 1995).

El sistema constructivo por voladizos sucesivos hormigonados “in situ” puede dar la definición como una estructura que para lograr su ejecución se debe ir vertiendo hormigón fresco sobre un carro de avance que no es más que un encofrado que aloja una serie de armaduras que han sido previamente dispuestas. Es el método constructivo de estructuras de hormigón más antiguo.

El tablero de este sistema constructivo está compuesto de una sección en viga cajón que se encuentra dividido en dovelas cuyas longitudes más comunes oscilan entre 2 y 4 metros (limitada por la capacidad de los carros de avance). Las dovelas se van construyendo una a continuación de otra, de esta manera el tablero va aumentando su longitud a su vez que es ayudado de cimbras metálicas que se encuentran apoyadas en la parte del tablero ya construidas.

Para la construcción por voladizos sucesivos compensados se utilizan carros que se apoyan en la parte ya construida del tablero. Las dovelas van siendo hormigonadas sobre los carros y estos van avanzando en forma de “T” desde las pilas hacia el centro del vano conectando allí con el voladizo anterior mediante una dovela clave. En la siguiente figura se muestra cómo en el viaducto Montabliz se va avanzando en forma “T” desde las pilas hacia el centro de los vanos con la ayuda de los carros de avance.

Figura 7. Avance por medio de voladizos sucesivos en forma de “T”.



Fuente: Viaducto Montabliz. ConstruGomes.

3.1.5 OPERACIONES DE AVANCE.

A continuación se describirá una serie de operaciones para la construcción de un puente por medio de voladizos sucesivos "in situ". Para la descripción de este proceso nos centraremos en la superestructura asumiendo que las cimentaciones e infraestructura no requieren mayor complejidad. Se mencionara las operaciones preliminares y las operaciones básicas de ejecución.

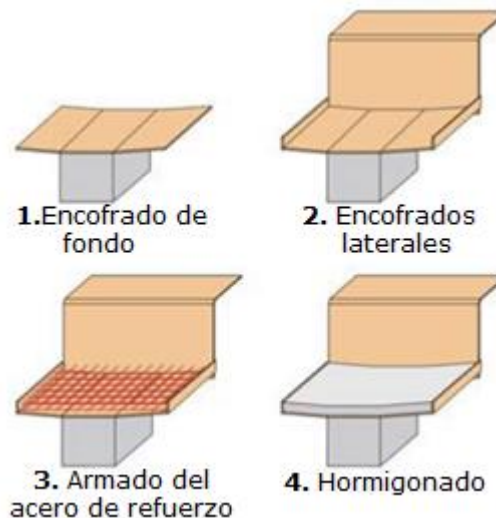
3.1.5.1 OPERACIONES PRELIMINARES.

Estas son las operaciones realizadas como primera medida para la ejecución de un proyecto por voladizos sucesivos, en las que se encuentra la ejecución de la dovela "0" y la colocación del carro de avance.

3.1.5.1.1 EJECUCION DE LA DOVELA DE PILA O DOVELA "0".

La ejecución de la dovela de pila o dovela "0" consiste en la colocación de la plataforma que se encargará de sostener la losa inferior de la sección además de los encofrados laterales exteriores para la dovela inicial (figura 8). Debido a que esto debe ser colocado en el cabezal de la pila, es necesario disponer de una torre grúa ubicada generalmente al lado de la pila. Suele ser la etapa más compleja del proceso constructivo, fácilmente puede durar entre dos y tres meses.

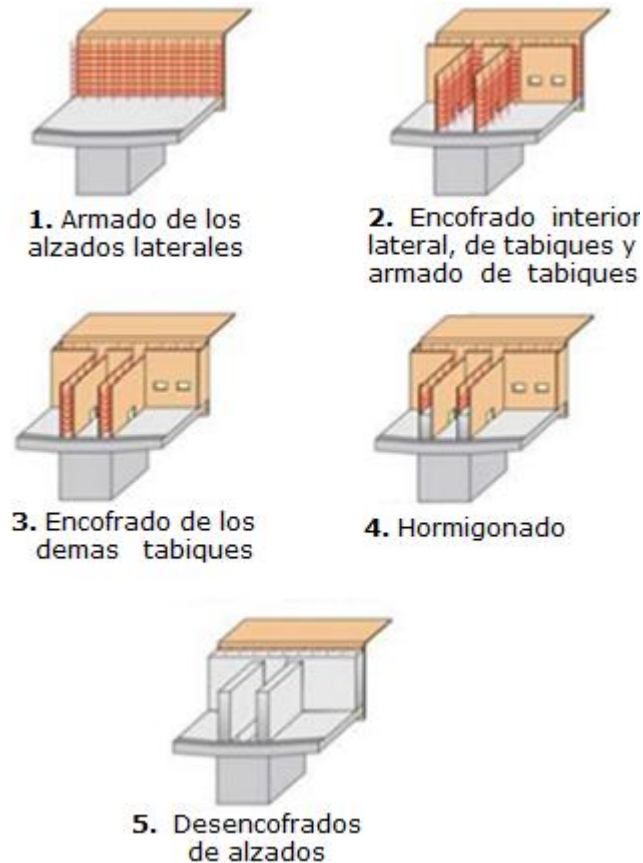
Figura 8. Esquema de ejecución de la dovela "0".
Colocación de la plataforma de soporte.



FUENTE: Informe técnico de la construcción del viaducto Las Salinas (Viera, 2006).

Posteriormente se realizan los alzados laterales y las riostras transversales. Para finalmente realizar el armado y hormigonado tanto de los tabiques como de las secciones laterales. Después de realizado el hormigonado se procede a retirar los encofrados interiores utilizados en los tabiques y secciones laterales (figura 9).

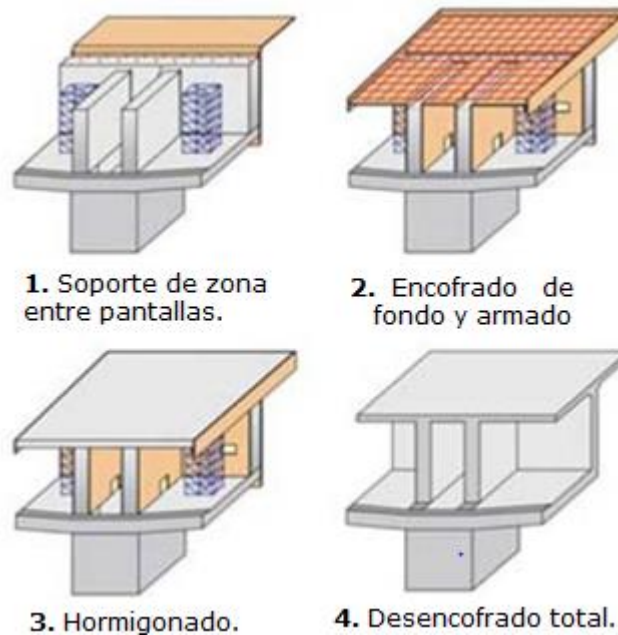
Figura 9. Esquema de ejecución de la dovela "0".
Hormigonado de tabiques y secciones laterales.



FUENTE: Informe técnico de la construcción del viaducto Las Salinas (Viera, 2006).

Finalmente en esta primera operación preliminar se realiza la construcción de la losa superior de la sección de hormigón. En las que se realizan la estructura que sostiene el interior de la losa superior, la colocación del encofrado interior sobre dicha estructura de soporte, el armado y hormigonado de la losa superior para posteriormente realizar el desencofrado (figura 10).

Figura 10. Esquema de ejecución de la dovela “0”.
Armado y hormigonado de losa superior.



FUENTE: Informe técnico de la construcción del viaducto Las Salinas (Viera, 2006).

3.1.5.1.2 COLOCACION DE LOS CARROS DE AVANCE.

Después de haber realizado la construcción de la dovela “0” (inicial) se puede hacer uso de los carros de avance. En el proceso por voladizos sucesivos con construcción evolutiva (utilización de un único carro de avance) se puede empezar a elevar el carro con el fin de ir realizando el montaje de este. En el caso que se utilice voladizos compensados (utilización de carros de avance a ambos lados de las pilas) el montaje de los carros de avance varia en el proceso de montaje, debido a que después de estar construida la dovela “0” se hace la elevación y montaje del primer carro de avance con el fin de construir la dovela 1 para que una vez finalizada se pueda desplazar hacia ella el carro ya construido y así se pueda liberar el cabezal de la pila con el fin de poder realizar la elevación y montaje del segundo carro de avance.

Después de tener los dos carros ya elevados y montados se puede iniciar la construcción de las dovelas en forma simétrica y en sentidos opuestos a partir de la pila avanzando hacia el centro del vano para después ser conectado con el voladizo de la siguiente pila por medio de una dovela clave.

En la siguiente figura se muestra la utilización de voladizos compensados es decir cuando se utiliza una pareja de carros de avance sobre una misma pila usado en

la construcción del viaducto de Montabliz cuya longitud total es de 705 metros con una luz central de 175 metros.

Figura 11. Colocación de dos carros de avance sobre una pila.



FUENTE: Viaducto de Montabliz. ConstruGomes.

3.1.5.2 OPERACIONES BASICAS DE EJECUCION.

Estas son las operaciones realizadas después de tener montados uno o dos carros de avance según lo especifique la construcción sobre las pilas en las que incluye desde el avance del carro hasta el curado del hormigón de cada una de las dovelas.

3.1.5.2.1 AVANCE DEL CARRO.

Cuando el carro ya se encuentra anclado y montado en el tablero son colocadas las vigas carril sobre la dovela hormigonada donde deben anclarse nuevamente. Seguidamente el carro es liberado de sus anclajes anteriores y es desplazado por medio de las vigas carril hasta el siguiente punto donde será fundida la dovela posterior, en este punto el carro de avance debe ser anclado nuevamente.

Comúnmente las dovelas tienen un tamaño normal que varía de 2 a 4 metros. Aunque en otras ocasiones son utilizados carros de avances más potentes con el fin de obtener dovelas mayores (sección transversal para cuatro carriles o longitud mayor).

Durante el proceso de avance de los carros este se encuentra sometido únicamente a su peso propio. El peso de los carros depende principalmente del tamaño de las dovelas que se utilizarán durante la construcción, los carros pequeños pueden tener un peso entre 30 y 40 toneladas, mientras los grandes pueden oscilar entre 100 y 120 toneladas. Es importante tener en cuenta que el peso de los carros de avance también depende del ancho de la sección cajón de la dovela.

3.1.5.2.2 CONSTRUCCION DE LAS DOVELAS.

A continuación se describirán una serie de procesos constructivos utilizados comúnmente por el método de voladizos sucesivos compensados (avance en forma de “T”).

- ✓ Avance y fijación del carro: El ciclo comienza cuando el hormigón obtiene la resistencia especificada por el ingeniero proyectista (ejemplo 25 MPa) ya que se necesita dicha resistencia para poder efectuar las operaciones de tesado. Al obtener la resistencia deseada se realiza el desencofrado para inmediatamente realizar el tesado de los cables de pretensado. Después de haber realizado el tesado se realiza el avance del carro tanto de los encofrados interiores como de los exteriores por medio del sistema hidráulico y finalmente se procede al anclaje del carro con el fin de lograr una posición fija además de estar perfectamente nivelado. En la siguiente figura se muestra la construcción del viaducto Trapagaran, en el que el carro de avance está siendo movido después de estar endurecido el concreto en la dovela anterior.

Figura 12. Avance y fijación del carro.



FUENTE: Viaducto Trapagaran. ConstruGomes.

- ✓ Armado de las losas y encofrado de toda la sección: Esta se inicia después de tener los moldes inferiores y es garantizado la separación del refuerzo por medio de separadores. El armado y encofrado se realizan por medio de operarios que se encuentran ubicados en los carros de avance. En primer lugar se arma el refuerzo de la losa inferior y posteriormente se va realizando el encofrado de toda la sección y el refuerzo superior. Antes de realizar el hormigonado de la dovela se debe garantizar la nivelación del carro de avance. En la figura 13 se muestra la colocación de las vainas de pretensado después de haber instalado el refuerzo de la losa superior.

Figura 13. Colocación de las vainas de pretensado.



FUENTE: Informe técnico de la construcción del viaducto Las Salinas (Viera, 2006).

- ✓ Hormigonado de la dovela: El hormigonado se debe realizar en primer lugar en la losa inferior, después en los hastiales de la sección transversal y finalmente en la losa superior. Se debe tener cuidado que al ir fundiendo los hastiales se deberá realizar lentamente con el fin de evitar el fisuramiento del hormigón de la losa inferior. En la siguiente figura se muestra la fundida de la losa superior de la dovela usando una bacha.

Figura 14. Hormigonado de la losa superior de la dovela.



FUENTE: Informe técnico de la construcción del viaducto Las Salinas (Viera, 2006).

Es importante tener en cuenta que el proceso de hormigonado debe realizarse siempre de adelante hacia atrás, con el fin de que el carro haya adquirido toda su deformación cuando se vierta el hormigón fresco que va a poner en contacto la nueva dovela con la antigua. En el caso contrario, se corre el riesgo de que se forme una grieta en la junta de unión entre dovelas.

- ✓ Desencofrado lateral: Se realiza al día siguiente de haber realizado el hormigonado.
- ✓ Curado: La superficies que se encuentran dispuestas del hormigón de la dovela se deben curar para evitar la fisuración por un proceso no controlado de retracción. Al tratarse de hormigón con altas resistencias se producen fuertes calores de hidratación a corto plazo. El curado del hormigón debe iniciar en el momento en que comienza el fraguado, lo cual se manifiesta con una pérdida de brillo superficial. (Gerardino Perdomo, 2011).
- ✓ Tesado: Para este proceso se deberá mirar las especificaciones de la empresa ya que estas deben establecer un proceso constructivo en el que incluyen: el orden de tesado, las fuerzas de tesado y las precisiones

equivalente según los equipos a utilizar, además de los alargamientos teóricos previstos y los valores de alarma. (Gerardino Perdomo, 2011).

- ✓ Desmontaje del carro de avance: cuando se llega al centro del vano y al tener ya fundida la última pareja de dovelas se procede al desmontaje de los carros de avance, para eso se utiliza la ayuda de las grúas móviles (generalmente) para su retiro. Después de esto se procederá a realizar la dovela de cierre mediante la plataforma inferior de uno de los carros de avance. En la figura 15 se muestra un carro de avance en un solo voladizo del puente para posteriormente realizar la dovela de cierre.

Figura 15. Voladizos sucesivos. Paso antes de la dovela de cierre.



FUENTE: Construcción viaducto de Barbantiño. ConstruGomes.

- ✓ Dovela de cierre: Después de tener construido casi la totalidad del tablero por medio de dovelas que fueron construidas a partir de las pilas hacia el centro del vano se llega por último a la dovela de cierre, la cual es realizada con la plataforma inferior de un solo carro de avance (figura 16).

Figura 16. Voladizos sucesivos. Dovela de cierre.



FUENTE: Construcción viaducto V9 Açores, Portugal. ConstruGomes.

- ✓ Tesado de cierre: Después de haber realizado la dovela de cierre se procede a dar continuidad entre los dos voladizos (correspondientes cada uno a una pila diferente) por medio de un tesado de continuidad y así lograr que ambos voladizos queden como una viga continua con el fin de distribuir y absorber las cargas de uso. Para este proceso se introducen los equipos de tesado dentro de la zona hueca del tablero y se procede a tesar los cables de continuidad. Es importante tener en cuenta que para introducir los cables dentro del tablero se utilizan los agujeros dejados en la losa superior.

3.1.6 CAUSAS DE UNA POSIBLE EVOLUCION DE LOS PUENTES EN VOLADIZO SUCESIVO “IN SITU” EN COLOMBIA.

Colombia es un país que ha venido manejando este sistema constructivo desde mediados de los años 70 sin dar paso a una evolución de este sistema constructivo en puentes, sin embargo es importante realizar un estudio a otros procesos constructivos con el fin de dar a conocer e incluso implementar nuevas tipologías de puentes a nuestro país.

En los últimos años con el fin de hacer mejoras en los tiempos de ejecución, presupuesto y calidad de las estructuras, se ha dado origen a procesos más industrializados como son el caso de los puentes en voladizos sucesivos con dovelas prefabricadas, puentes extradados, puentes autocimbra y puentes empujados, cuyo único objetivo ha sido la creación de procesos óptimos que faciliten y agilicen el proceso de construcción de los puentes.

Una de las posibles razones por la cual otros sistemas constructivos no han sido incorporados en nuestra ingeniería colombiana es debido tal vez a la alta inversión que se debe realizar, ya que los principales elementos auxiliares utilizados en estos sistemas constructivos son muy costosos.

Además otro de los inconvenientes que se presenta para la incorporación de estos sistemas constructivos, es la longitud que se debe tener en el puente para lograr que sea rentable, debido a que generalmente estos procesos constructivos industrializados sirven para la construcción de viaductos de grandes longitudes para así poder contrarrestar el costo que se tiene de los elementos auxiliares.

Sin embargo esto ha venido cambiando en los últimos años debido a que se ha logrado construir puentes de grandes longitudes como son el caso del puente Carlos Lleras Restrepo cuya longitud es de 1604 metros construido en 1996. También tenemos entre los puentes más destacados el puente Pumarejo localizado en Barranquilla cuya longitud es de 1489 metros divididos en tres secciones construidas en 1974. En mayo de 2012 el invias anuncio que se construirá un nuevo puente al lado del ya existe cuya longitud total tendría aproximadamente 2 kilómetros y una doble calzada de 32 metros de ancho.

Además como ya se mencionó anteriormente la ejecución de proyectos como la ruta del sol y los recientemente adjudicados corredores de la prosperidad son razones que hacen necesaria la posible incorporación de nuevos sistemas constructivos con el fin de lograr una disminución en tiempos de obra principalmente.

Finalmente se puede decir que uno de los factores que limita hoy en día la construcción de puentes en Colombia es su velocidad de ejecución, ya que la construcción de la mayoría de los puentes de luces medias es realizada mediante la técnica de voladizos sucesivos "in situ" mientras que en países más desarrollados se construye con técnicas más industrializadas que generan un menor tiempo de construcción.

Un ejemplo que se puede dar para entender lo correspondiente a técnicas industrializadas se puede observar en la construcción de un muro. Por un lado se tiene la construcción mediante ladrillo, en donde se debe ir colocando bloque por bloque y a su vez adicionarle un mortero de pega entre los ladrillos con el fin de poco a poco ir levantando el muro (Figura 17). Por otra parte, se encuentran los muros estructurales en donde su construcción es realizada de una forma tecnificada y más rápida, debido a que su proceso de construcción consiste en

colocar el acero de refuerzo, encofrar y después realizar la fundida del muro para finalmente desencofrar (Figura 18).

Figura 17. Construcción de un muro de mampostería.



FUENTE: Autor.

Figura 18. Construcción de un muro estructural.



FUENTE: Autor.

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente surge la necesidad de conocer otros procesos constructivos con el fin de lograr una disminución en los tiempos de construcción de un puente.

4. TECNICAS MODERNAS PARA LA CONSTRUCCION DE PUENTES DE LUCES MEDIAS.

En este capítulo se pretende dar a conocer sistemas constructivos utilizados en países más desarrollados los cuales han sido de gran ayuda tanto en el campo de la velocidad de fabricación como en la reducción de costos.

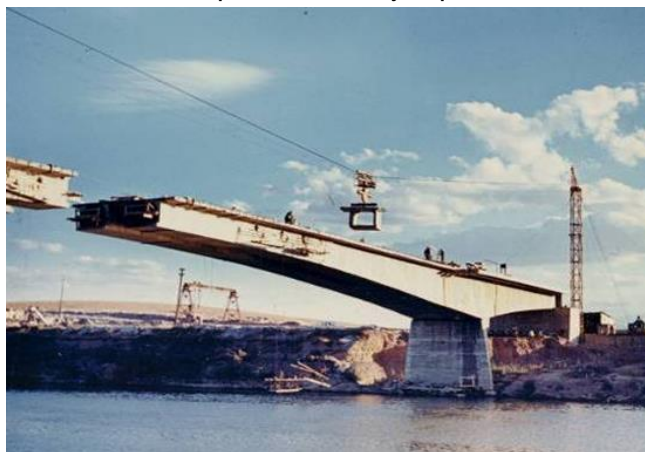
4.1 VOLADIZOS SUCESIVOS POR DOVELAS PREFABRICADAS.

4.1.1 INTRODUCCION.

La construcción de puentes ha experimentado en los últimos años cambios en los procesos constructivos derivados de las nuevas tecnologías y materiales construidos por el hombre. Además la ejecución de los viaductos ha requerido la industrialización en la construcción principalmente de los tableros siendo así la prefabricación de las dovelas una de las alternativas de alto rendimiento y especialmente competitiva en viaductos de varios kilómetros de longitud, ya que los medios auxiliares necesarios para realizar un puente por dovelas prefabricadas son más costosos que los correspondientes a realizar el mismo puente “in situ”.

Este sistema constructivo con dovelas prefabricadas es usado en puentes muy largos o en lugares donde se construyan varios puentes simultáneamente con el fin de compensar el costo de las instalaciones que producen un parque de prefabricación de dovelas. En la figura 19 se muestra el puente Castejón sobre el río Ebro en España, cuya construcción fue realizada por medio de voladizos sucesivos con dovelas prefabricadas en 1968.

Figura 19. Construcción del puente Castejón por medio de dovelas prefabricadas.



FUENTE: Puente Castejón. Carlos Fernández Casado, S.L.

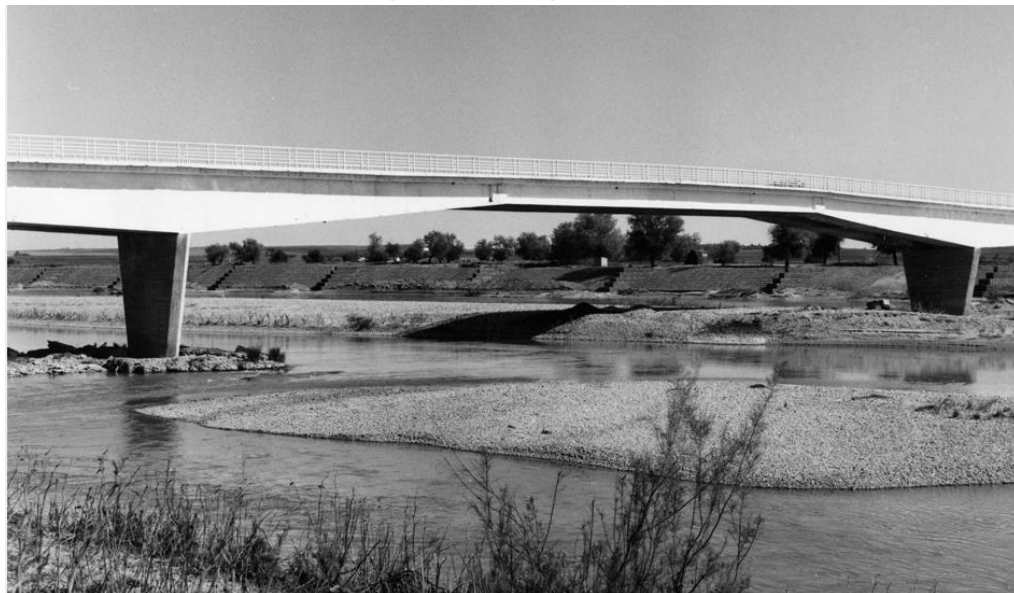
La construcción de puentes por voladizos sucesivos con dovelas prefabricadas es el único método industrializado de construcción de tableros que puede llegar a luces de 70 a 150 metros.

Si se observa la velocidad de ejecución de un puente por dovelas prefabricadas, se concluye que es mucho mayor comparado con un puente de voladizos sucesivos “in situ”. Por ejemplo, en un puente “in situ” se realiza una dovela por semana y frente de trabajo generalmente, mientras que por dovelas prefabricadas se puede colocar una e incluso dos dovelas por día y por frente. (Manterola, 2006).

4.1.2 HISTORIA.

Este procedimiento se inició en la U.R.S.S a finales de la década de los 50 y posteriormente fue usado en otros países principalmente en Francia. En España fue usado por primera vez por Carlos Fernández Casado en los puentes Almodóvar en el año 1962 y el de Castejón en 1968 (Pérez, 1990). En la figura 20 se observa el puente Almodóvar caracterizándose por ser el primer puente construido en España por medio de dovelas prefabricadas.

Figura 20. Puente Almodóvar. Primer puente construido en España por dovelas prefabricadas.



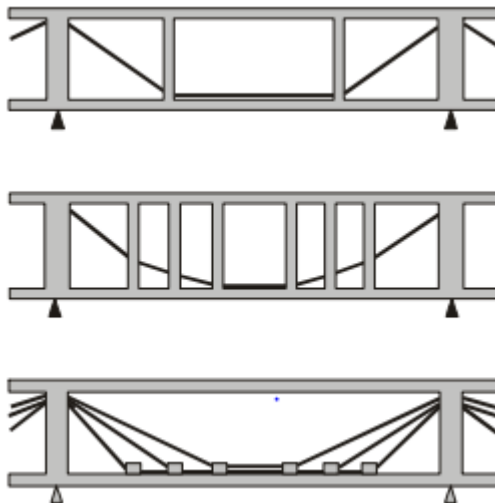
FUENTE: Centro de estudios históricos de obras públicas y urbanismo. España.

Debido a la evolución que ha tendido este sistema constructivo se habla principalmente de tres generaciones de dovelas:

- ✓ Primera generación: Fueron las dovelas construidas en los años 60 las cuales se caracterizaban por tener juntas de mortero de cemento, llave única a cortante y cables anclados en la propia junta. (Gerardino Perdomo, 2011).
- ✓ Segunda generación: Se caracterizó por la prefabricación conjugada, el empleo de resinas epoxi en las juntas, las llaves múltiples para el cortante y el anclaje de los cables en el interior de la dovela en unos bloques dispuestos para tal efecto. (Gerardino Perdomo, 2011).
- ✓ Tercera generación: Se caracterizó por el pretensado exterior y lamas de celosía tanto de hormigón como metálicas. (Gerardino Perdomo, 2011).

El pretensado exterior es una técnica de presolicitación en la que los cables quedan expuestos a la intemperie debido a que se encuentran por fuera de la sección del tablero (Figura 21). Además el trazado de los cables no es parabólico sino poligonal cambiando de dirección en los desviadores. (Alarcón López, 2002).

Figura 21. Diferentes trazos con pretensado exterior.



FUENTE: VIRLOGEUX, 1993.

Por otra parte, el pretensado interior es aquel en el que se encuentran los cables al interior de la sección del puente y donde la inyección de mortero asegura la compatibilidad entre acero y hormigón. (Alarcón López, 2002).

En el pretensado interior la protección del acero de refuerzo se confía a la inyección de la vaina y a la resina epoxi que se extiende sobre la superficie de unión de las dovelas.

4.1.3 PROCESO CONSTRUCTIVO.

La característica principal de la construcción por dovelas prefabricadas es que en las juntas entre dovelas no se dejan conexión de armadura pasiva, por lo que la continuidad del tablero se consigue únicamente mediante el pretensado, logrando así un montaje de elementos sencillos que permite una gran rapidez de construcción. (González, 2005).

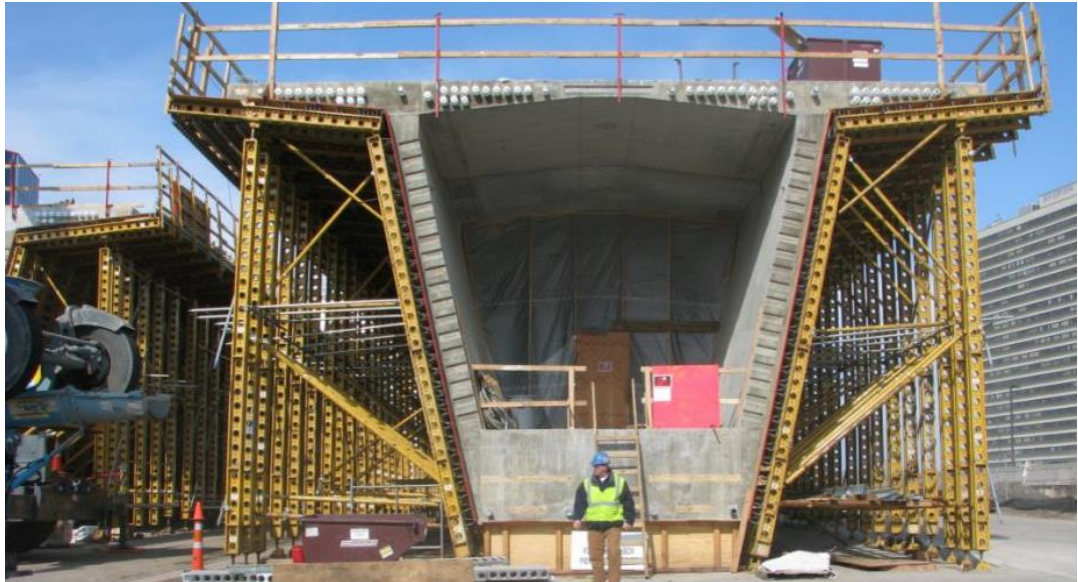
Los principales problemas constructivos en estos tipos de puentes depende de cómo es la dovela, como son sus juntas de unión, como se deben construir y como se montan.

4.1.3.1 FORMAS DE LAS DOVELAS.

Las dovelas no son más que la consecuencia de dividir el tablero total por un conjunto de secciones transversales que determinan elementos de sección cajón, cuyas dimensiones dependen de la capacidad de carga de los medios de montaje con que se realice. En general las dovelas no se deben hacer muy cortas (menores a 2 metros), ya que se aumentaría considerablemente el número de juntas y además las juntas necesitan un tratamiento especial. (Manterola, 2006).

En general, se puede decir que el dimensionamiento de cualquier sección transversal de un puente prefabricado debe ser cuidadoso para eliminar pesos inútiles que encarecen todo el sistema, además de tener cuidado en el proceso constructivo de las dovelas prefabricadas con el fin de minimizar errores entre secciones continuas. En la figura 22 se muestra una dovela prefabricada usada en el puente sobre la I-35 en Minneapolis, Estados Unidos; cuyo ancho es de 13.7 metros, con un largo de 4.9 metros y un canto variable de 7.6 metros (en las dovelas iniciales cerca a las pilas) a 4.9 metros (en el centro del vano).

Figura 22. Sección transversal de una dovela prefabricada.



FUENTE: Puente sobre la I-35 en Minneapolis. Manuel F. Carballo. 2010.

Se debe garantizar que al realizar este tipo de procedimiento constructivo las dovelas prefabricadas no generen diferencias en la geometría entre caras adyacentes ya que si esto se presenta no existiría una transmisión adecuada de esfuerzos cortantes en los dos tipos de juntas. Para tal efecto es utilizado el método de la dovela conjugada cuyo objetivo es una unión perfecta entre las caras de dos dovelas seguidas ya que una de las caras de la dovela sirve de encofrado para la siguiente.

4.1.3.2 JUNTAS.

Las juntas para este proceso constructivo pueden ser:

- ✓ En seco: Son caracterizadas porque la transmisión de esfuerzo cortante entre dovelas se realiza por medio del contacto directo entre hormigones de los dos elementos (dovelas).

Un problema de este tipo de juntas es que no son impermeables completamente por lo que no sirve de protección ante los agentes externos por los que puede estar expuesto el acero pretensado, por tal razón no es utilizado el pretensado interior. En consecuencia de esto únicamente se utiliza pretensado exterior cuya protección es obtenida mediante vainas de acero o polietileno, lechada de cemento o ceras.

- ✓ Con resina epoxi: Cuando es usado este material antes de empezar el montaje de la dovela se aplica en cada una de las dos superficies que van a entrar en contacto una capa de resina epoxi. La resina, no es considerada como un elemento que sirva para resistir los esfuerzos de corte, su función es mejorar el contacto entre las dovelas además de ayudar para la impermeabilidad de la junta. (Gerardino Perdomo, 2011).

Las juntas con resina epoxi le proporcionan al pretensado una protección análoga a las estructuras monolíticas por lo que la normativa permite el uso de pretensado interior (Aparicio y Ramos, 1993).

Para asegurar un adecuado contacto entre las dos dovelas y para extraer el excedente de resina que es aplicado manualmente por un operario es realizado a las dovelas contiguas un pequeño pretensado parcial con barras. (Roberts, 1993).

4.1.3.3 CONSTRUCCIÓN DE LAS DOVELAS.

Como ya se menciona es importante que coincida la geometría entre las caras de dovelas adyacentes con el fin de que se puedan repartir los esfuerzos cortantes entre las juntas. Para tal fin es utilizado el método de la dovela conjugada la cual se puede fabricar en línea larga y en línea corta.

El método de la línea larga o “Long - line casting” consiste en prefabricar las dovelas en una mesa donde se tiene el fondo del tablero que se va a fabricar el cual tiene la dimensión total de la pieza es decir el vano total entre apoyos. Por tal motivo este procedimiento es poco automatizado además de requerir grandes espacios en las cercanías de la obra ya que se hormigona la totalidad del tablero (dovela a dovela) con la ayuda de un encofrado que se traslada a lo largo del mismo. Este procedimiento ha dejado de usarse en los últimos años. En la figura 23 se observa el fondo del tablero usado en el método de la línea larga en la construcción de dovelas prefabricadas. Como se puede observar este método ocupa un gran espacio dentro de la obra motivo por el cual es poco usado.

Figura 23. Método de la línea larga (long – line casting).



FUENTE: Puente sobre la I-35 en Minneapolis. Manuel F. Carballo. 2010.

El método de la línea corta o “short – line casting” consiste en utilizar una célula de prefabricación que contiene dos dovelas y al ya tener hormigonada la segunda dovela con la primera es retirada la primera para que la segunda ocupe su lugar y de este modo se continua el proceso hasta terminar la secuencia.

La célula de prefabricación mencionada anteriormente consta de una dovela adyacente, un encofrado fijo, una mesa regulable para el encofrado interior, unos encofrados laterales abatibles y un encofrado interior retráctil. En la figura 24 se observa el método de la línea corta (short – line casting) en la que se tiene una de las caras de la dovela como molde para la siguiente con el fin de que las caras adyacentes presenten coincidencia en la geometría para lograr repartir los esfuerzos cortantes entre las puntas.

Figura 24. Método de la línea corta (short – line casting).



FUENTE: Google imágenes.

En este proceso la geometría de las dovelas es controlada mediante nueve referencias ubicadas en las aristas superiores de la dovela conjugada y la que se hormigona, la cual permite obtener la geometría en planta y el alzado requerido por las dovelas. Los controles son realizados con microprismas que se encuentran en unas chapas ancladas en el hormigón, las lecturas se hacen en una estación total con precisión de una décima de milímetro. (González, 2005).

Con la información que se tiene de proyectos de puentes construidos mediante dovelas prefabricadas, se considera que el ritmo de prefabricación es de una dovela por encofrado y día. Se necesita que el hormigón tenga la resistencia especificada por el proyectista (ejemplo: 17.5 MPa), además habitualmente con el fin de agilizar el proceso de fabricación de dovelas es usado el curado al vapor. (Gerardino Perdomo, 2011).

A continuación se mencionara una serie de operaciones para la construcción de dovelas prefabricadas.

- ✓ Recepción y prefabricación del acero de refuerzo: En esta zona se ubica el acero con la ayuda de una torre grúa generalmente y se traslada hasta los moldes donde posteriormente se realiza el montaje del acero.

- ✓ Colocación y montaje del acero de refuerzo: En esta zona se realiza el montaje del acero sobre dos premoldes que producen la forma exterior de la dovela, normalmente por cada día de producción se coloca el acero de una dovela. En la figura 25 se observa el armado del refuerzo en la construcción de una dovela prefabricada por el método de línea larga.

Figura 25. Colocación de refuerzo en dovelas prefabricadas.



FUENTE: Puente sobre la I-35 en Minneapolis. Manuel F. Carballo. 2010.

- ✓ Colocación del encofrado interior: Para este paso es necesario montar el encofrado plegado sobre la ménsula de la estructura auxiliar, es lanzado a través de la máscara y colocado. Cuando las dovelas de apoyo van en pila, el encofrado interior se coloca directamente no a través de la máscara. (Gerardino Perdomo, 2011).

En la figura 26 se observa el molde inferior usado para la construcción de las dovelas prefabricadas donde se puede observar los rieles en la parte inferior usados para transportar la dovela desde su fabricación hasta el parque de almacenamiento.

Figura 26. Encofrado inferior usado en la fabricación de dovelas prefabricadas.



FUENTE: Construcción viaducto de RioMayor. Pérez Fadon, et al.

Este encofrado es utilizado para darle la sección hueca a las dovelas. Para la fabricación de la dovela de pila o también llamada dovela “0” es utilizado un encofrado especial que hace las veces de dovela conjugada.

- ✓ Colocación de la máscara: La máscara es el encofrado anterior de la dovela. La máscara tiene de forma la sección transversal de la dovela en sección de viga cajón (hueca), con el fin de que se pueda introducir a través de él, el encofrado interior.
- ✓ Carros de fondo: Los carros de fondo son usados para poder posicionar la dovela conjugada además de servir como un encofrado interior de la dovela a hormigonar. Estos carros de fondo es la estructura en donde descansa la dovela desde su sitio de inicio hasta que abandona la línea de fabricación.
- ✓ Hormigonado y vibrado: Es utilizado un proceso normal de vaciado para posteriormente ser vibrado por medio de vibradores externos aplicados al propio encofrado, además también son usados los vibradores de aguja. Es importante recordar que los vibradores de aguja se deben mantener perpendicular a la superficie que se está hormigonando.

En los casos en que es utilizado el pretensado exterior se facilita la labor de hormigonado permitiendo así una vibración por aguja de manera más cómoda. En la figura 27 se observa el hormigonado de la parte inferior de la dovela usado en el proyecto del puente sobre la I-35 en Minneapolis,

Estados Unidos construido mediante el método de la línea larga (long – line casting).

Figura 27. Hormigonado de la parte inferior de una dovela prefabricada.



FUENTE: Puente sobre la I-35 en Minneapolis. Manuel F. Carballo. 2010.

- ✓ Dovela conjugada: Después de ya tener fundida la dovela esta es usada como conjugada ya que su función será de encofrado posterior de la dovela a hormigonar, esto se realiza estando aun sobre el carro de fondo en que se hormigonó (Figura 28).

Figura 28. Dovela conjugada.



FUENTE: Construcción del viaducto Piedrafita. FCC. (Gerardino, 2011).

- ✓ Curado al vapor: Con el fin de poder lograr una automatización del sistema y mejorar considerablemente la velocidad de producción de las dovelas se realiza dicho curado en el que se pueden tomar varias consideraciones tales como el precalentado del agua de amasado además de cubrir los encofrados con lonas con el fin de lograr una cámara de vapor y lograr que entre las 12 y 14 horas después de haber hormigonado se pueda alcanzar una resistencia mínima para poder desencofrar.

En lugares con climas cálidos no hay necesidad de realizar dicho curado al vapor, este es usado principalmente en sitios fríos. En la siguiente figura se observa unas coberturas móviles usadas para mantener la temperatura constante durante el proceso de curado y así lograr resistencias deseadas en poco tiempo.

Figura 29. Curado al vapor por medio de coberturas móviles.



FUENTE: Puente sobre la I-35 en Minneapolis. Manuel F. Carballo. 2010.

- ✓ Retirada de la dovela conjugada: Después de tener las dos dovelas en el molde, se procede a retirar la dovela que anteriormente sirvió como conjugada a la zona de almacenamiento. La dovela recién fabricada es desplazada a su nueva posición de dovela conjugada donde servirá de

molde lateral para la siguiente dovela. En la figura 30 se puede observar la retirada de una de las dovelas a la zona de almacenamiento debido a que esta ya fue usada como dovela conjugada para la dovela que se encuentra atrás de ella.

Figura 30. Retirada de la dovela conjugada.



FUENTE: FCC, Construcción S.A. Gonzáles.

- ✓ Almacenamiento de dovelas: Es importante almacenar en el mismo orden en que son fabricadas las dovelas ya que durante todo el proceso de fabricación se encuentra un continuo cambio de dovelas conjugadas con el fin de tener las secciones transversales semejantes para que exista una buena distribución de esfuerzos sobre ellas. Además se debe tener en cuenta que las dovelas deben permanecer después de su fabricación 28 días almacenadas con el fin de garantizar la resistencia requerida. Las dovelas se deben colocar sobre madera u otro material semejante durante su proceso de almacenaje con el fin de evitar el contacto directo con el terreno (Figura 31).

Figura 31. Almacenamiento de dovelas.



FUENTE: Puente sobre la I-35 en Minneapolis. Manuel F. Carballo. 2010.

4.1.3.4 COLOCACION DE DOVELAS.

Para describir el proceso constructivo correspondiente a la colocación de dovelas, se utilizará la información consultada de Apuntes para su diseño, cálculo y construcción de Javier Manterola, 2006.

Existen varios métodos para la colocación de las dovelas. Cuando las dovelas pesan muy poco del orden de 10 a 15 toneladas puede emplearse un blondin que las transporta desde el parque de fabricación hasta el frente del voladizo y se sujeta a la dovela precedente. Sin embargo, este procedimiento es muy limitado ya que una dovela con este peso es extraordinariamente pequeña.

En los casos que la obra sea accesible por su parte inferior se pueden usar grúas, sin embargo este método es posible en muy pocas ocasiones. El procedimiento más empleado corresponde a la viga de lanzamiento, que consiste en una viga metálica con una longitud mayor que el vano más grande del puente.

El sistema de la viga de lanzamiento consiste en:

- ✓ Una viga principal en celosía o atirantada, cuyo cordón inferior actúa como puente grúa.

- ✓ Tres patas que pueden o no estar fijas a la viga principal. Las patas traseras y la central permiten que una dovela las atraviese por su interior.
- ✓ El carretón de la que cuelga la dovela puede trasladarse a lo largo del cordón inferior de la viga, descender o ascender la dovela y girar respecto a un eje vertical.

En la figura 32 se observa una viga de lanzamiento usada en la colocación de la dovela prefabricada en la construcción del viaducto Piedrafita ubicado en España.

Figura 32. Viga de lanzamiento usado en el montaje de dovelas prefabricadas.



FUENTE: Construcción viaducto de Uztarreta. (Gerardino, 2011).

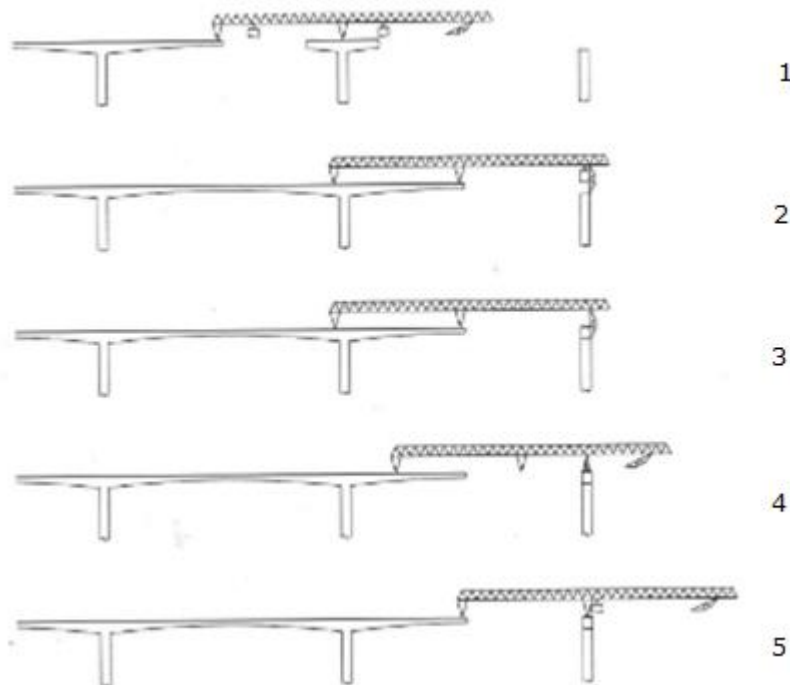
Para realizar un ciclo completo la viga de lanzamiento realiza las siguientes operaciones:

- ✓ Para colocar una dovela cualquiera, la parte central descansa directamente sobre la dovela situada encima de la pila y la pata trasera descansa sobre el voladizo ya construido. Figura 33 (1).
- ✓ Cuando se ha terminado un tramo completo y solidarizado con el anterior, la viga se desplaza en su conjunto hasta que la pata central alcanza la puerta frontal del voladizo. La pata delantera se apoya entonces sobre una

pequeña estructura auxiliar colocada lateralmente a la próxima pila y en esa situación monta la dovela sobre la pila. Figura 33 (2 y 3).

- ✓ Finalmente toda la viga se desplaza hasta colocar la pata central sobre la dovela de pila ya colocada con la ayuda de una torre provisional. Figura 33 (4y 5).

Figura 33. Ciclo completo de una viga de lanzamiento.



FUENTE: Puentes. Apuntes para su diseño, cálculo y construcción. Manterola, 2006.

Los costos de estas vigas de lanzamiento son elevados, es por eso que este sistema constructivo es viable para puentes de gran longitud o donde se quiera establecer un sistema para un conjunto de puentes.

4.2 PUENTES EMPUJADOS.

4.2.1 INTRODUCCION.

Los puentes empujados son estructuras hormigonadas “in situ”, que posteriormente son trasladadas a una posición definitiva distinta de la de su elaboración. Esta es una alternativa que se ha venido presentando para la realización de grandes puentes debido a la rapidez de fabricación y además que solo se necesita un frente de avance desde el inicio hasta el final de la obra.

El proceso constructivo de puentes empujados consiste en fundir las dovelas que componen el tablero del puente en un molde estático, con el fin de poder ir realizando el empuje desde dicho lugar.

En la siguiente figura se observa la construcción del viaducto Silleda (Figura 34) ubicado en España, cuyo ancho del tablero es de 14 metros con una luz entre ejes de pilas de 70 metros y obteniendo un record ibérico de empuje de 1185 metros.

Figura 34. Viaducto Silleda, construido mediante el sistema de empuje.



FUENTE: Construcción del viaducto Silleda. ConstruGomes.

Después de estar construidas las pilas del puente no se necesita seguir ingresando a la estructura por medio de estas, como es el caso de los voladizos sucesivos “in situ” en el que la superestructura se debe realizar desde las pilas

hacia el centro del vano. En el caso de los puentes empujados solo se necesita de un sector amplio detrás de uno de los estribos del puente para poder ubicar el parque de fabricación de las dovelas y así poder empezar el proceso de empuje.

Una de las características de mayor importancia en este tipo de obras es el poder realizar puentes por encima de parques de conservación de la fauna y flora, ríos, vías, etc., sin que estos lugares se vean afectados.

Este tipo de puente reduce considerablemente el costo de fabricación debido a que no es necesaria la utilización de andamios, pero como consecuencia a esto deben ser usados otros tipos de elementos auxiliares como son la nariz de lanzamiento y los sistemas hidráulicos que sirven para darle avance al puente. Por esta razón es que esta tipología de puente se considera rentable cuando su longitud llega a más de 500 metros debido a que el parque de fabricación, la nariz de lanzamiento y los sistemas hidráulicos tienen un costo elevado.

Una particularidad de estos puentes es el trazado, debido a que se pueden utilizar para puentes rectos o donde la superestructura tenga una curvatura espacial de radio constante a lo largo de su longitud. Esto significa que incluso es posible construir puentes que estén curvados tanto horizontal como verticalmente, siempre y cuando los radios sean constantes. En la figura 35 se observa un puente con radio de curvatura constante construido por el proceso de empuje.

Figura 35. Construcción de puente empujado con radio de curvatura constante.

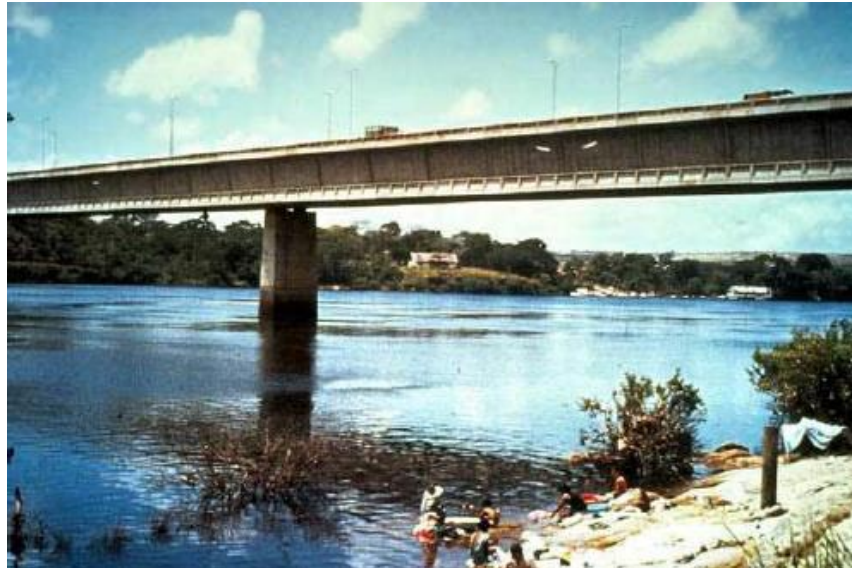


FUENTE: Construcción del puente El Pilar sobre el río Ebro, Zaragoza. Carlos Fernández Casado, S.L.

4.2.2 HISTORIA.

Este tipo de puente fue desarrollado en el mercado Alemán a finales de los años 60. Aunque el primer empuje de concreto se originó en Venezuela con el puente sobre el río Caroní en la ciudad de Guayana en el año 1964 (Figura 36), el cual tiene una gran diferencia con el utilizado actualmente, debido a que este puente fue construido en su totalidad y posteriormente se realizó el proceso de empuje.

Figura 36. Primer puente construido por empuje. Caroní, Venezuela.



FUENTE: Documento Universidad de Coruña. España. 2011.

Además la creación de nuevos materiales generó una gran importancia para el desarrollo de este sistema constructivo debido a que surgieron elementos como el teflón o productos similares los cuales facilitaron el empuje ya que permitían los desplazamientos con unos coeficientes de fricción bajos.

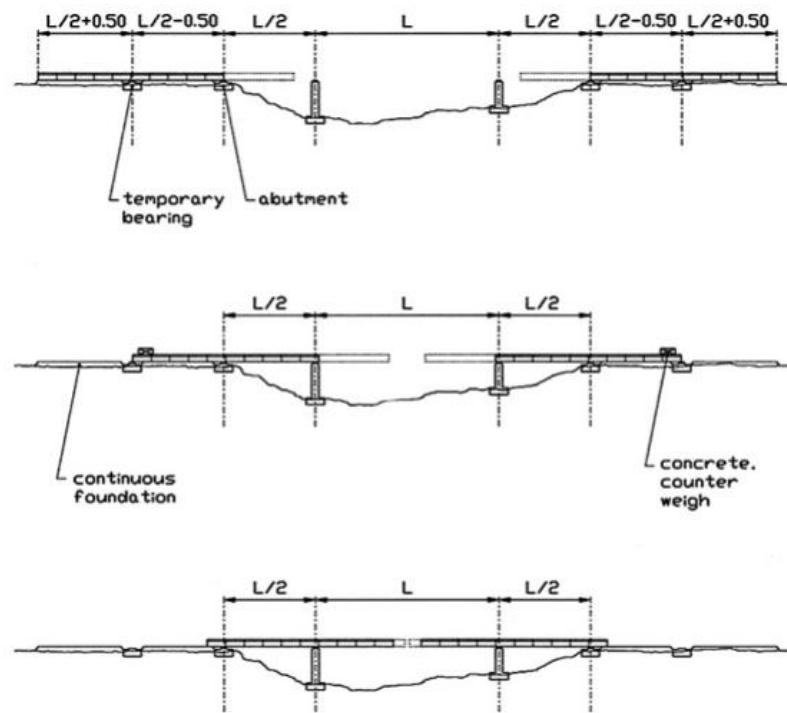
4.2.3 PROCESO CONSTRUCTIVO.

Con el paso de los años se ha venido presentando una serie de procesos constructivos en los que se encuentra el lanzamiento por segmentos, lanzamiento completo y giro del puente completo. Siendo el lanzamiento por segmentos el proceso constructivo más usado para los puentes empujados.

4.2.3.1 LANZAMIENTO COMPLETO.

En este proceso constructivo el puente es fabricado totalmente o también construido en dos partes. Cuando se utiliza la construcción en dos partes, cada una de las dos secciones es empujada desde los dos estribos del puente hasta el centro de este. En la figura 37 se observa una gráfica donde se realiza el lanzamiento completo de un puente desde ambos estribos hacia el centro.

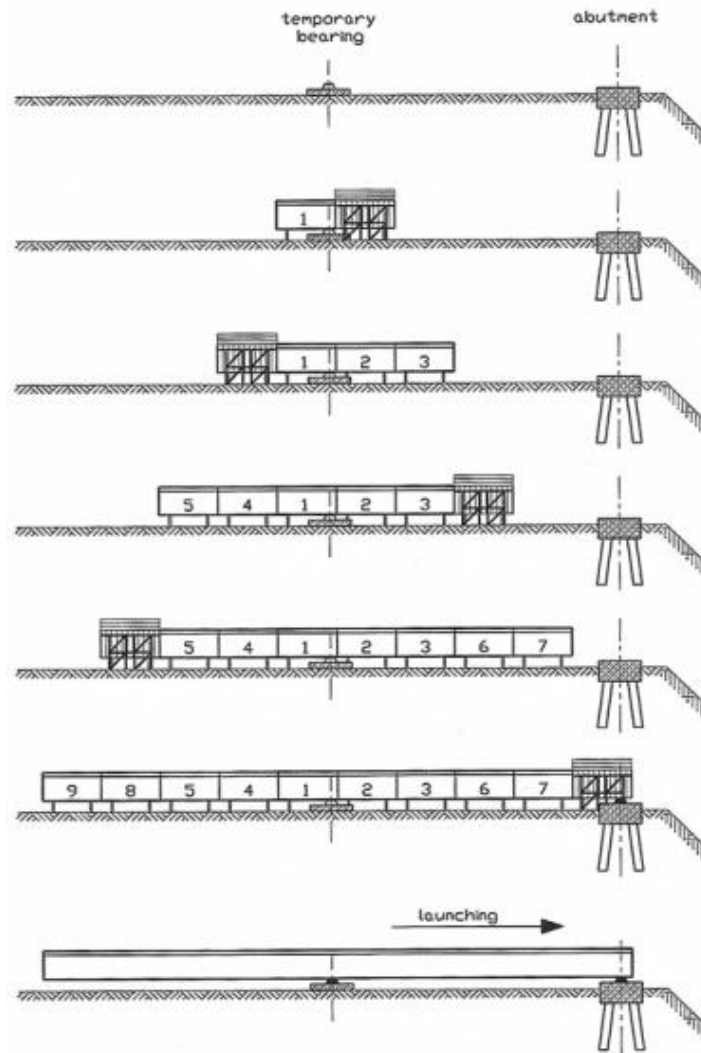
Figura 37. Empuje por lanzamiento completo desde los dos extremos del puente.



FUENTE: Documento Universidad de Coruña. España. 2011.

En la figura 38 se observa el proceso constructivo donde es fabricado el primer y segundo segmento del puente sobre un apoyo temporal, donde posteriormente son construidos otros nuevos segmentos hasta completar un gran segmento del puente para luego ser lanzados mediante unos sistemas hidráulicos.

Figura 38. Detalles constructivos del tablero antes de realizar el lanzamiento completo.

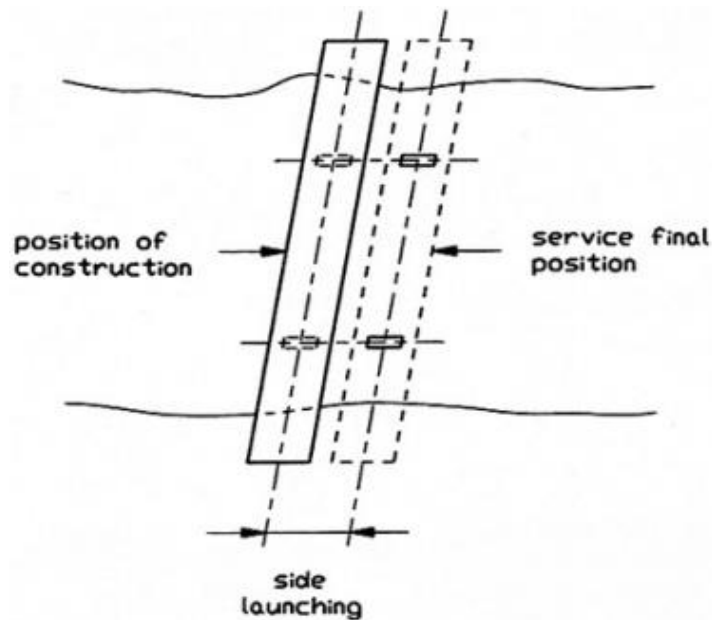


FUENTE: Documento Universidad de Coruña. España. 2011.

4.2.3.2 TRANSLACION TRANSVERSAL.

Este proceso constructivo consiste en fabricar el puente en una porción paralela a la deseada y trasladarlo con un movimiento transversal hasta dicha ubicación. Este proceso constructivo es poco usado (Figura 39).

Figura 39. Construcción de un puente por medio de translación transversal.



FUENTE: Documento Universidad de Coruña. España. 2011.

4.2.3.3 LANZAMIENTO POR SEGMENTOS.

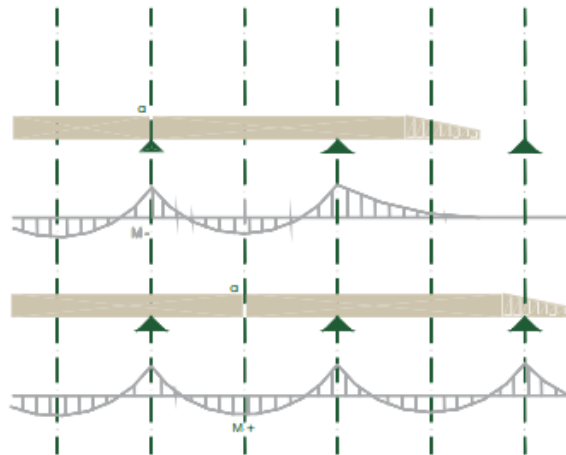
Este proceso constructivo es el más usado para la construcción de puentes empujados, consiste en la prefabricación de las secciones del tablero del puente en una zona conocida como parque de fabricación ubicada detrás de uno de los estribos del puente. Una vez endurecido y pretensado el concreto es empujado hacia adelante por medio de unos sistemas hidráulicos; con lo que se libera el molde para realizar una nueva dovela, que unida a la anterior por pretensado es empujada nuevamente y así sucesivamente hasta tener la totalidad del puente construido.

Mientras va ocurriendo el empuje del puente la nariz de lanzamiento va realizando un papel fundamental en la realización del proyecto, debido a que esta sirve de apoyo para el tablero cuando este se encuentra en voladizo, ya que esta nariz de lanzamiento se apoya en la siguiente pila con el fin de no permitir que el puente se flexione más de lo normal.

Hay que tener en cuenta que la nariz de lanzamiento va unida a la primera dovela y no puede ser retirada hasta el final de la construcción debido al papel que esta desempeña durante la realización del proyecto.

Uno de los factores más importante que hay que tener en cuenta es que la estructura durante el empuje va ir variando de momentos positivos a momentos negativos, por lo que se debe tener cuidado en la ley de momentos que la rige. Debido a este cambio de momentos se debe realizar un pre-esfuerzo constante y recto por lo cual se deben colocar fibras superiores e inferiores en la estructura con el fin que puedan soportar los momentos máximos. Este pre-esfuerzo es denominado *pre-esfuerzo céntrico*. En la siguiente figura se observa la ley de momentos que sufre el puente durante el proceso de empuje.

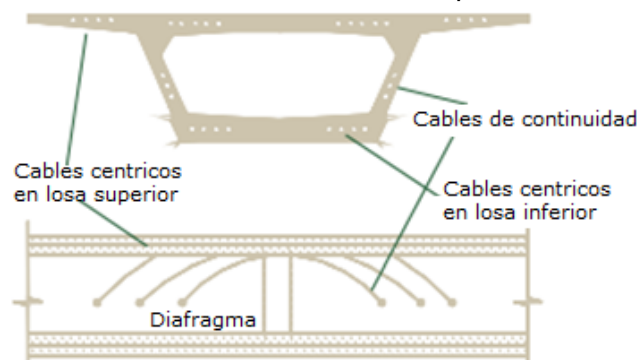
Figura 40. Ley de momentos durante el empuje.



FUENTE: MEXPRESA. Puentes empujados del Ing. Juan del Aveliano.

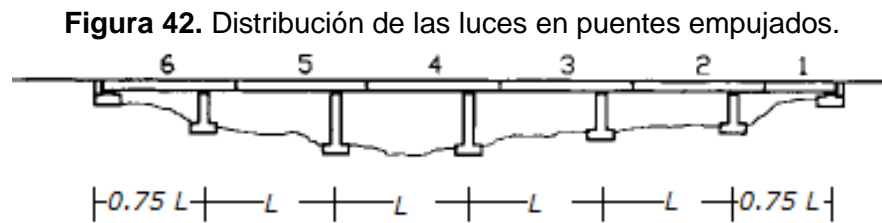
Después de realizado el sistema de lanzamiento o empuje se colocan unos cables de continuidad con el fin de soportar los momentos negativos que realiza la carga de los vehículos que no alcanza ser absorbido por el pre-esfuerzo céntrico. (Manterola, 2006). En la siguiente figura se muestra la sección transversal del tablero de mayor uso en los puentes empujados.

Figura 41. Sección transversal de una dovela por el sistema de empuje.



FUENTE: MEXPRESA. Puentes empujados del Ing. Juan del Aveliano.

Las luces más comunes para este sistema de puentes lanzados se encuentran entre 30 y 70 metros, aunque se han llegado a luces de 90 metros. Desde el punto de vista de diseño es conveniente que todas las luces sean iguales a excepción de los extremos, los cuales no deben Exceder el 75% de las luces tipo (Figura 42).



Fuente: Modificado del artículo journal of bridge engineering, 1999.

4.2.3.3.1 ELEMENTOS AUXILIARES.

A continuación se describirán los elementos auxiliares utilizados para la construcción de un tablero por medio del sistema empujado o de lanzamiento entre los que se encuentra el parque de fabricación, nariz de lanzamiento, sistemas hidráulicos de empuje y apoyos deslizantes.

4.2.3.3.1.1 PARQUE DE FABRICACION.

El parque de fabricación es el lugar destinado para la armada y fundida de las dovelas que posteriormente serán empujadas por medio del sistema hidráulico hasta realizar el puente en su totalidad.

Se debe tener especial cuidado en el sitio donde se piense construir el parque de fabricación, ya que debe ser un espacio amplio con el fin de poder trabajar con comodidad además de poder entrar con facilidad el material que se necesita para la realización de la obra, ya que toda la superestructura es construida en este lugar. A continuación se presenta una imagen donde se observa un parque de fabricación usado para la construcción de las dovelas en los puentes empujados.

Figura 43. Parque de fabricación en puentes empujados.



FUENTE: Documento Universidad de Coruña. España. 2011.

En el caso de los tableros de hormigón armado el parque se compone de tres zonas:

- ✓ Zona I: Denominada zona de hormigonado y es allí donde se fabrican las dovelas que subdividen el puente. La longitud de las dovelas varía entre 15 y 25 metros y generalmente son la tercera parte o la mitad del vano. Esta zona es muy importante, ya que es el lugar destinado para el ensamble de la parte inferior del dintel la cual va a deslizar sobre las pilas, estribos y el parque de fabricación.

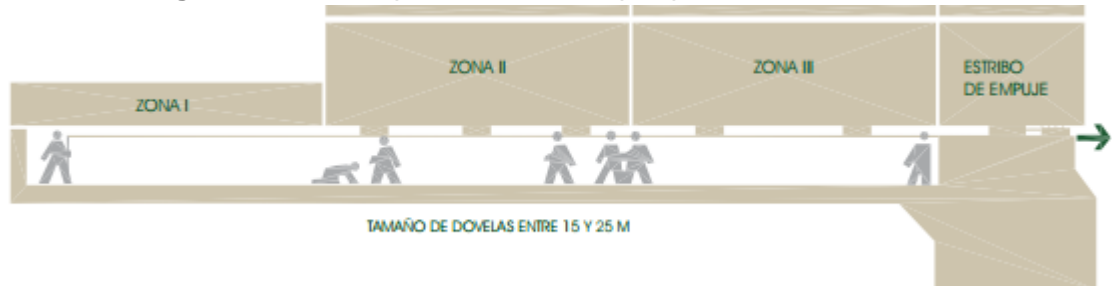
La nivelación de esta zona debe ser de mucho cuidado ya que no se permiten errores mayores al orden de un milímetro debido a que si esto no se cumple el desplazamiento del dintel sobre las pilas será muy difícil. Por este motivo es que el encofrado de la parte inferior del dintel es metálica con el fin de minimizar errores. Dependiendo de la precisión de este sector se puede lograr que el puente se deslice fácilmente o por el contrario cree grandes problemas.

- ✓ Zona II: Esta zona está determinada para la parte superior del cajón, es decir el alma y vuelos.
- ✓ Zona III: Es una transición entre la zona II y el estribo de empuje con el fin de que el puente tenga una suficiente longitud y contrapeso para evitar el

volcamiento del tablero antes que la nariz de lanzamiento llegue a la primera pila, por esta razón es que la primera luz del puente no debe ser mayor al 75% de las luces tipo.

A continuación se muestra una imagen donde se presentan las tres zonas que conforman el parque de fabricación de los puentes empujados para la construcción de las dovelas.

Figura 44. Zonas que conforman el parque de fabricación.



FUENTE: MEXPRESA. Puentes empujados del Ing. Juan del Aveliano.

Cabe mencionar que en ocasiones es usado otro tipo de procedimiento para la construcción de dovelas en los puentes empujados consiste en realizar un montaje del acero de refuerzo en una zona ubicada detrás del parque de fabricación (Figura 45) y posteriormente hacer el alzado del acero hacia el parque donde se fundirá la dovela (Figura 46) para finalmente ser empujada y generar el espacio en el parque de fabricación para la construcción de la próxima dovela (Figura 47).

Figura 45. Montaje del acero de refuerzo.



FUENTE: Construcción del viaducto sobre el Rio Deza, España. ConstruGomes.

Figura 46. Alzado y colocación del acero en el parque de fabricación.



FUENTE: Construcción del viaducto sobre el Rio Deza, España. ConstruGomes.

Figura 47. Empuje del tablero en el parque de fabricación.



FUENTE: Construcción del viaducto sobre el Rio Deza, España. ConstruGomes.

Cabe mencionar que el personal durante la construcción de las dovelas se encuentra dentro del parque de fabricación, pero al iniciar el proceso de empuje deben abandonar este lugar con el fin de evitar accidentes.

4.2.3.3.1.2 NARIZ DE LANZAMIENTO.

Para la utilización de la nariz de lanzamiento se debe tener ya construida la primera dovela del puente ya que la parte trasera de la nariz de lanzamiento se debe unir a la primera dovela construida en el parque de fabricación.

Esta estructura debe ser metálica y además debe ser fabricada en varias secciones (generalmente tres) con el fin de facilitar el transporte a la obra, la unión de estas secciones debe ser con tornillos calibrados o con soldadura. La longitud de la nariz de lanzamiento generalmente varía del 50% al 60% de la luz tipo. En la figura 48 se observa una nariz de lanzamiento ya construida donde son identificados los pernos usados en la unión de las secciones de una nariz de lanzamiento.

Figura 48. Pernos usados en la conexión de las partes de la nariz de lanzamiento.



FUENTE: Construcción del viaducto sobre el Rio Deza, España. ConstruGomes.

Además de la longitud de la nariz de lanzamiento es importante determinar su inercia, ya que tener una nariz muy flexible ayudaría muy poco al control de los

esfuerzos del dintel que se producen durante el empuje y tener una nariz muy rígida encarece innecesariamente esta unidad. (Manterola, 2006).

La forma geométrica de la nariz de lanzamiento para puentes rectos debe ser de igual manera recta con el fin de que a medida que se va empujando el puente este se apoye en las pilas. Pero por otra parte, si el puente tiene un radio de curvatura constante la nariz de lanzamiento que se utilizará deberá ser poligonal de tal forma que genere la curva requerida para que al avanzar el puente esta descansa sobre cada pila de la estructura. En la figura 49 se observa la nariz de lanzamiento para un puente recto en el proceso de empuje.

Figura 49. Nariz de lanzamiento para un puente empujado.



FUENTE: Documento Universidad de Coruña. España. 2011.

Esta estructura se encuentra siempre por delante del tablero del puente con el fin de apoyarse sobre la pila siguiente para poder reducir el momento que se genera cuando el puente se encuentra en voladizo. Esta reducción de momentos ocurre principalmente ya que esta estructura es muy ligera en comparación con el peso del puente del tablero.

En la parte delantera de la nariz se deben instalar unos gatos especiales los cuales ayudarán a recuperar la altura perdida debido a las deflexiones causadas al estar en voladizo. En la figura 50 se observa el uso de estos gatos cuando son levantados de la parte delantera de la nariz de lanzamiento al estar próximos al contacto con las pilas, con el fin de recuperar la altura perdida causada por el

peso del puente (en voladizo) y el peso de la nariz de lanzamiento (es mínima en comparación con el peso del tablero).

Figura 50. Gatos especiales para recuperar altura.



FUENTE: Carlos Fernández Casado, S.L.

4.2.3.3.1.3 SISTEMA DE EMPUJE.

Esta parte se realiza por medio de unos sistemas hidráulicos los cuales tienen una vida útil de aproximadamente 20 años. Existen diferentes procedimientos para realizar el empuje, pero entre los más usados se tiene:

- ✓ Gatos normales de pretensado anclados a los estribos y a las pilas: Esta opción es la más económica, pero como consecuencia de este menor costo existe una dificultad, debido a que estos gatos no tienen marcha atrás lo que es necesario para este tipo de proyectos. Es por eso que este método es poco usado debido a la importancia que se tiene en retroceder para la construcción de este tipo de estructuras.
- ✓ Gatos verticales y horizontales situados sobre un estribo: Este sistema de empuje tiene como característica principal poder dar marcha atrás y por tal razón es el más utilizado y recomendable entre los sistemas de empuje. Esta marcha es muy importante debido a que ayuda a corregir errores lo cual es fundamental en la realización de este tipo de proyectos. Por ejemplo, al introducir las almohadillas en ocasiones son ingresadas al

revés lo que ocasiona que el empuje se frene y se deba dar reversa a la estructura. Este error es muy común en el proceso de empuje debido a que el ingreso de las almohadillas es realizado por personal más no por maquinaria lo que aumenta posibles errores.

Este sistema de empuje se compone principalmente de un cilindro vertical y unos horizontales. Cuando se realiza el proceso de empuje el cilindro vertical levanta el tablero del puente de cuatro a cinco milímetros para que posteriormente los cilindros horizontales empujen el puente hacia adelante una distancia de 25 centímetros y finalmente el cilindro vertical descarga nuevamente la estructura. Este proceso es considerado como un ciclo.

El tiempo de duración de cada ciclo es de aproximadamente dos minutos, por lo que para una dovela de 20 metros el tiempo de lanzamiento total es del orden de tres horas, además cada dovela debe esperar un tiempo de cinco días y medio para que pueda ser empujada. En la figura 51 se observa uno de los tipos de gatos hidráulicos usados para el sistema de empuje además de la distancia que se puede recorrer durante un ciclo.

Figura 51. Gato hidráulico para el sistema de empuje.



FUENTE: Construcción del viaducto sobre el Rio Deza, España. ConstruGomes.

4.2.3.3.1.4 APOYOS DESLIZANTES.

Estos elementos son utilizados en los lugares que el puente es apoyado durante el proceso de empuje como son los estribos, pilas y parque de fabricación. Estos apoyos deben estar formados por un bloque de concreto fuertemente armado de 15 a 35 centímetros de espesor y nivelado sobre el que se asienta una chapa de acero inoxidable especial tensada. Sobre estas chapas se dispone unas almohadillas de neopreno teflón de 10 a 13 milímetros de espesor. (Manterola, 2006).

La parte de la almohadilla que contiene el neopreno va en contacto con el concreto de la losa inferior del tablero, mientras el teflón en contacto con el acero.

Durante el empuje el puente va arrastrando la almohadilla hacia adelante hasta que es expulsada, por tal motivo se necesita unos operarios para que vuelvan a introducir la almohadilla por la parte de atrás y se siga con el proceso de empuje.

El coeficiente de rozamiento entre el teflón y el acero inoxidable suele ser del 5%, pero si se aplica silicona al teflón y se mantiene limpio puede llegar a un coeficiente del 1%.

Cuando el proceso de empuje ha terminado es levantada toda la estructura por los gatos hidráulicos ubicados en las pilas y son retirados los apoyos deslizantes para posteriormente ingresar los apoyos definitivos del puente. En la siguiente figura se observa el bloque de concreto armado sobre la pila y adicionalmente una chapa de acero inoxidable con el fin de colocar encima de esta las almohadillas de neopreno teflón.

Figura 52. Apoyo de neopreno teflón.



FUENTE: Documento Universidad de Coruña. España. 2011.

4.2.4 CARACTERISTICAS PRINCIPALES.

Los puentes empujados tienen como características principales:

- ✓ El parque de fabricación es colocado detrás de la primera pila y es desde allí donde se realizan las dovelas para posteriormente ser empujadas.
- ✓ La nariz de lanzamiento se encuentra unida a la primera dovela con el fin de servir como un brazo de apoyo para que pueda reducir los momentos que se generan durante el empuje.
- ✓ Los soportes del puente poseen unas almohadillas las cuales sirven para reducir drásticamente la fricción que se realiza durante el empuje.
- ✓ La construcción es realizada completamente sin cimbra, lo cual ayuda a pasar por encima o por debajo de obstáculos sin tener ningún inconveniente ya sean como las vías, ríos, etc.
- ✓ La estructura consiste en una viga de sección constante el cual debe tener sobre su etapa final una relación de esbeltez de 17. Cabe recordar que para puentes normales de grandes longitudes la relación de esbeltez es de 12 para puentes pequeños es de 15.
- ✓ Es necesario tener un amplio espacio para la armada del parque de fabricación y para poder entrar el material sin ningún inconveniente, además es de gran cuidado mirar que tipo de pendiente se presenta durante el empuje ya que si la pendiente es positiva o cero no hay ningún inconveniente, pero en el caso que la pendiente sea negativa se deberá usar un sistema de frenado del tablero (Figura 53).

Figura 53. Sistema de frenado del tablero.



FUENTE: ConstruGomes.

4.3 PUENTE PRETENSADO EXTRADOSADO.

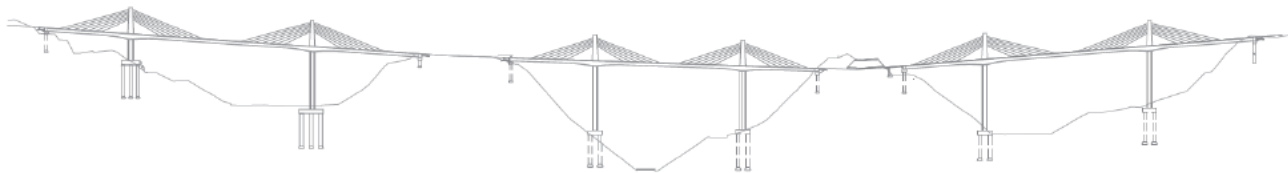
4.3.1 INTRODUCCION.

Este tipo de puente se caracteriza por disponer el pretensado sobre las secciones de apoyo en pila, exteriormente al canto de la sección y por la parte superior del tablero, con el fin de poder ganar excentricidad. Como consecuencia a esto resulta un tipo de puente de tirantes con pila baja y canto holgado que busca además de la compensación de cargas que la variación de tensión en el acero de los tendones extradados, debida a la sobrecarga, sea lo suficientemente baja para que no requiera los costosos anclajes resistentes a fatiga empleados en los puentes de tirantes. (Chio, Aparicio).

En los últimos años esta tipología de puentes ha evolucionado hasta el punto de ser aceptada como una solución para luces medias, esto se debe a los avances en los sistemas constructivos y principalmente a la tecnología que se ha logrado en el preforzado el cual es definido como la creación intencional de esfuerzos permanentes en una estructura con el objetivo de mejorar su comportamiento y resistencia bajo diversas condiciones de servicio (T. Y. LIN, 1969).

En la figura 54 y figura 55 se observa los puentes Trillizos ubicados en Bolivia en la ciudad de la Paz, compuestos por los puentes Kantutani, Choqueyapu y Orkojahuiria (ubicados de izquierda a derecha), conocidos también como Libertad, Unión e Independencia. En total los tres puentes suman una longitud de 2000 metros con una sección transversal de cajón unicelular y un ancho de 14.8 metros. La altura de la sección varía de 3.5 en la zona de las pilas y 2.1 en el centro del vano.

Figura 54. Perfil del puente extradadosado los Trillizos Bolivia



FUENTE: Puentes Trillizos, Bolivia. Da Silva, 2011.

Figura 55. Puente extradosado los Trillizos inaugurado en Noviembre de 2010.



FUENTE: Puentes Trillizos, Bolivia. Google imágenes.

Los puentes extradosados son considerados como un híbrido entre los puentes atirantados y los puentes pretensados. Es por eso que su comportamiento estructural puede estar determinada por una de estas tipologías dependiendo de los diseños que se hayan adoptado en la fase de proyecto.

Es difícil por medio de la altura de las torres definir cuando un puente es considerado atirantado o extradosado, debido a que no se tienen valores para poder diferenciar estos dos sistemas constructivos. Sin embargo, no cabe duda que la altura de la torre para los puentes extradosados es mucho menor a la de los puentes atirantados.

La poca altura que tienen las torres en los puentes pretensados extradosados genera una poca inclinación en los cables que conlleva a un incremento de la carga axial del tablero y una disminución de su componente vertical de la fuerza en los anclajes de los cables, razón por la cual la función de los cables de un sistema extradosado además de ayudar como soporte vertical es servir para pretensar el tablero.

Esta tipología de puentes se diferencia de los puentes atirantados clásicos utilizados para salvar grandes luces, en que los puentes extradosados utilizan tirantes con una menor inclinación por lo que los pilonos tienen una menor altura en comparación con las dimensiones de los vanos del tablero.

A continuación se muestra la diferencia que poseen los puentes atirantados y los puentes extradosados en lo correspondiente a altura de pilonos. En la figura 54 se muestra el puente atirantado sobre el puerto de Cadiz en España con una longitud

de 3157 metros, un ancho de 30 metros y un vano principal de 540 metros (actualmente se encuentra en construcción). Por otra parte en la figura 57 se muestra un puente extradosado sobre el río Deba en España el cual posee una longitud de 150 metros, un ancho de 13.9 metros y un vano principal de 66 metros.

Figura 56. Puente sobre el puerto Cadiz, España.



FUENTE: Carlos Fernández Casado, S.L.

Figura 57. Puente sobre el río Deba, España.



FUENTE: www.eipsa.net. Jaques, 2005.

En los puentes extradosados el atirantamiento sirve para compensar en gran parte los esfuerzos de peso propio, mientras que las sobrecargas son resistidas por la flexión del dintel.

Cuando se tienen tableros rígidos los puentes extradosados tienen un comportamiento similar al de un puente pretensado, logrando así evitar las tensiones en los tirantes ocasionadas cuando existen altas oscilaciones y además evitando problemas de fatiga asociados a los anclajes y tendones que se tendrían

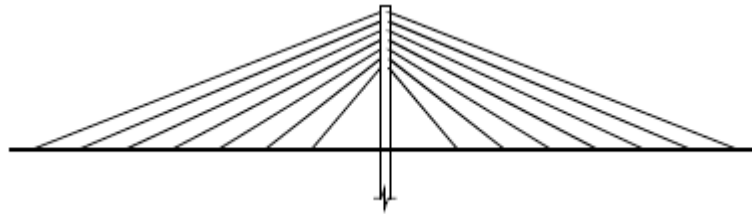
en un puente extradadosado de tablero esbelto, cuyo comportamiento es más similar al de un puente atirantado. (Benjumea, Chio, Maldonado, 2010).

4.3.1.1 CONFIGURACIONES TIPICAS DE LOS CABLES EXTRADOSADOS.

Existen diferentes configuraciones para la colocación de los cables extradadosados, en las que principalmente se encuentran la de tipo abanico y de tipo harpa. A continuación se realiza una descripción de estas configuraciones de cables en los puentes extradadosados.

- ✓ Tipo abanico: Este tipo de configuración se caracteriza porque los cables van anclados a lo largo de todo el tablero del puente y fijos en la parte superior de la torre. A continuación se da un ejemplo de la configuración de los cables tipo abanico, usados en los puentes extradadosados (Figura 58).

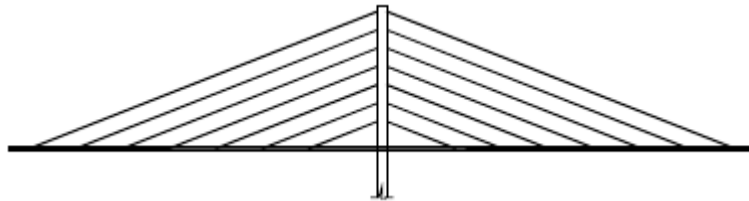
Figura 58. Configuración de los cables tipo abanico.



FUENTE: Dos Santos, 2006.

- ✓ Tipo harpa: Este tipo de configuración es estéticamente el más atractivo, sin embargo es menos eficiente en términos de economía y comportamiento estructural. La característica principal de esta configuración es la disposición paralela de los tirantes entre la torre y el tablero del puente, consecuencia a esto los cables más bajos reducen la excentricidad a medida que van descendiendo (Figura 59).

Figura 59. Configuración de los cables tipo harpa.



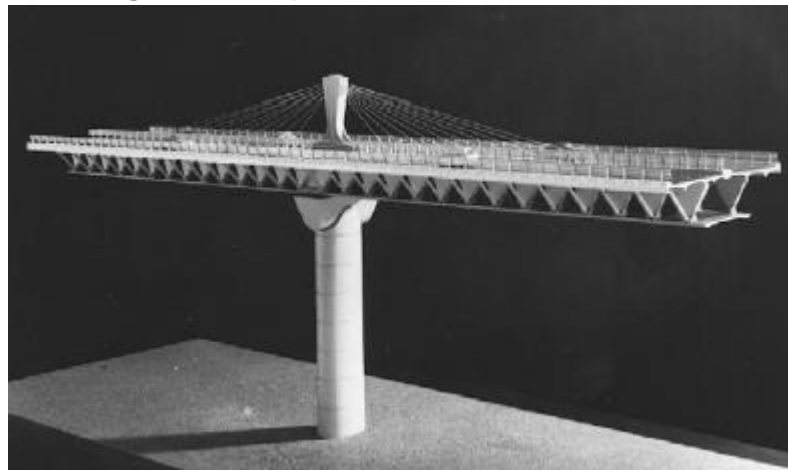
FUENTE: Dos Santos, 2006.

4.3.2 HISTORIA.

Eugene Freyssinet es considerado el padre del concreto preesforzado. En 1928 empezó a usar alambres de acero de alta resistencia para el preesforzado ya que él consideraba que el presfuerzo podría llegar a ser muy útil si se tuviese acero de alta resistencia con concreto de alta calidad.

Según algunos autores (Ogawa et al., 1998; Chio, 2000; Hino, 2005; Kasuga, 2006; Ishii, 2006) consideran a Jacques Mathivat como el creador del concepto y la denominación de esta tipología de puentes, ya que en 1988 uso el termino de puentes extradados para referirse a una solución de puentes que planteó en el concurso del viaducto Arrêt Darré (Figura 60) en el que los tendones externos sobresalía del canto de la sección por la parte superior del tablero anclándose sobre una pila de poca altura con el fin de ganar excentricidad. Sin embargo esta propuesta no fue aprobada.

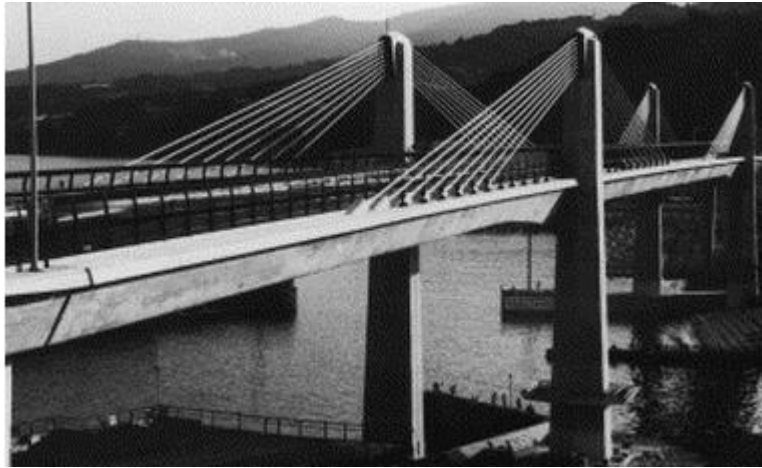
Figura 60. Propuesta del viaducto Arrêt Darré



FUENTE: Virlogeux, 1999.

En 1994 ayudados de la idea del ingeniero Jacques Mathivat, los japoneses construyen el primer puente extradado, llamado Odawara Blueway (Figura 61) cuya longitud total era de 270 metros, subdividido en tres vanos continuos de 74, 122 y 74 metros respectivamente. Posteriormente a la construcción de este puente los ingenieros se han visto interesados en esta tipología de puentes tanto en el comportamiento estructural como en la construcción.

Figura 61. Primer puente extradosado. Odawara Blueway.



FUENTE: Google imágenes.

Esta tipología de puentes en los últimos años ha ido en aumento principalmente en Asia y Europa, aunque también se han construido en países como Estados Unidos y en Latinoamérica como en Brasil.

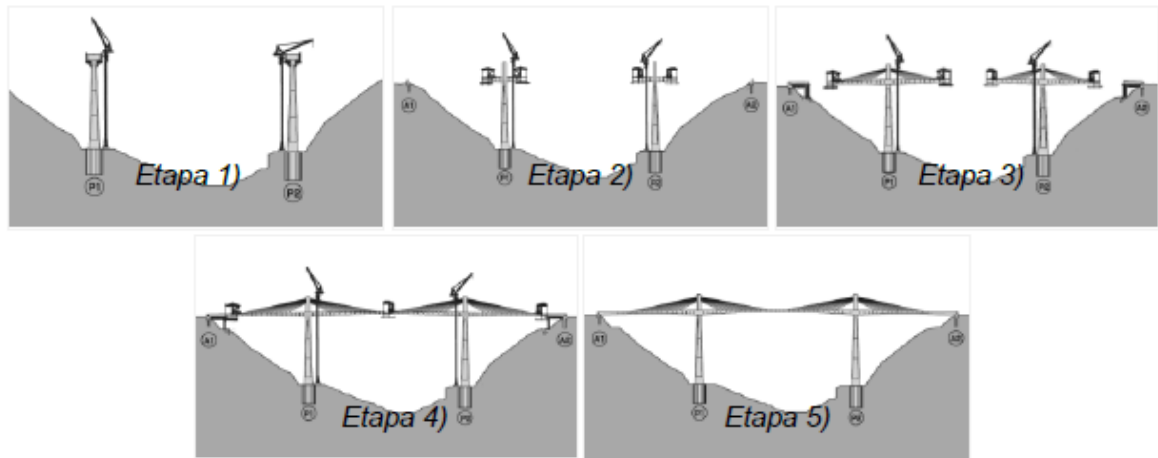
4.3.3 PROCESO CONSTRUCTIVO.

Para la construcción de puentes extradosados se requiere del conocimiento tanto del hormigón pretensado como de los puentes atirantados; estos puentes son construidos generalmente por medio de voladizos sucesivos con sección viga cajón y con la ayuda de tirantes definitivos.

En la mayoría de los casos, la construcción de los puentes extradosados se realiza utilizando el método de los voladizos sucesivos ya sean “in situ” o prefabricados. Los voladizos sucesivos “in situ” es el método más usado para construcción de puentes extradosados.

En la figura 62 se muestran las principales etapas constructivas del puente extradosado Tokinoyama ubicado en Japón. En la etapa 1 se ve la subestructura ya construida además de la torre grúa que sirve para la colocación de los carros de avance ubicados en la etapa 2 posteriormente, en la etapa 3 se observa el avance del tablero del puente por medio de voladizos sucesivo a medida que van siendo colocados los tirantes. Este proceso continua hasta que se llega a la dovela de cierre ilustrada en la etapa 4 y finalmente se procede al desmonte de los sistemas auxiliares (etapa 5).

Figura 62. Etapas constructivas del puente Tokinoyama, Japón.



FUENTE: Incorporated Administrative Agency Japan Water Agency, s.f.

Es importante tener en cuenta, que los puentes extradados usan anclajes con menos rangos de esfuerzo en comparación a los puentes atirantados, debido a que la alta rigidez del tablero no hace necesario ajustar la fuerza de los tirantes después de su construcción.

Estos puentes extradados son considerados como una solución de puentes económica para luces entre 100 y 250 metros.

En la construcción de los puentes prefabricados extradados es importante tener dos estados tensionales con el fin de resistir los momentos tanto negativos como positivos durante el proceso de construcción del voladizo.

Por una parte, se tienen los tendones por voladizo que consisten en un pretensado interno superior para poder resistir los momentos negativos originados durante la construcción del voladizo inicial antes de la colocación del primer tirante, este pretensado debe ir anclado en las caras frontales de cada dovela.

Los tendones internos de continuidad también tienen un papel fundamental durante el proceso constructivo de estos puentes, debido a que resisten los momentos positivos durante la ejecución del proyecto originado por las cargas de construcción, el gradiente térmico y las deformaciones del concreto.

Finalmente, también se requiere de un pretensado interno superior con el fin de resistir la construcción del voladizo final después del último tirante, el cual va anclado sobre resaltos que salen del forjado superior y un pretensado interno que soporta la sobrecarga de servicio.

4.4 PUENTES CON CIMBRAS AUTOPORTANTES.

4.4.1 INTRODUCCION.

La construcción de puentes por medio de cimbras autoportantes son utilizadas para el hormigonado de tablero vano a vano siendo éstos generalmente hiperestáticos, es decir solo cuenta con una junta en cada uno de los estribos. La estructura principal de estas cimbras autoportantes suele estar formada por tramos de celosía o cajones metálicos longitudinales que soportan el encofrado de un vano y al mismo tiempo el hormigón fresco que constituye la sección estructural del puente a construir.

Las autocimbras o cimbras autoportantes son el proceso constructivo más industrializado que se tiene hoy en día para la construcción de tableros “in situ” teniendo así parámetros de diseño y fabricación muy controlados y detallados. Estas cimbras autoportantes son equipos muy grandes motivo por el cual su peso debe ser considerado en la fase de diseño y construcción del puente (fácilmente pueden llegar a pesar 1000 toneladas). En la figura 63 se observa el viaducto de Cofrentes en España con una longitud total del tablero de 520 metros, constituido por 8 vanos de 70 metros cada uno.

Figura 63. Viaducto Cofrentes construido por autocimbra.

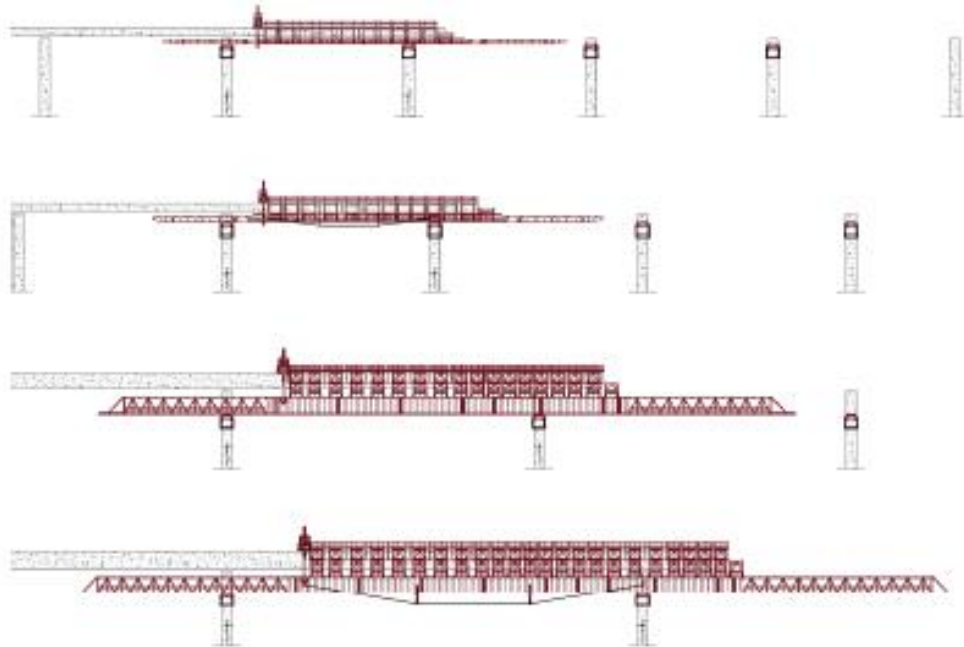


FUENTE: ConstruGomes.

Las estructuras autoportantes durante el proceso de construcción del puente sirven como plataformas de trabajo y protección durante el armado del refuerzo de acero, hormigonado, pretensado y otras operaciones auxiliares que se realizan durante la ejecución del tablero en los viaductos.

Los puentes construidos con cimbras autoportantes tienen una gran ventaja ya que los elementos auxiliares utilizados no se encuentran apoyados en el suelo, motivo por el cual es utilizado en lugares de difícil acceso o donde se tienen pilas de gran altura. A continuación en la figura 64 se presenta el avance de la construcción de un tablero por medio de cimbras autoportantes.

Figura 64. Esquema del avance de la cimbra autoportante.



FUENTE: Estudio de la viabilidad del uso de atirantamiento en cimbras de avance para puentes. (Ramos, 2011).

Este procedimiento ha sido utilizado para alcanzar luces entre 30 y 50 metros aunque en ocasiones se han llegado a longitudes mayores (60 a 90 metros). Una de las razones por las cuales no se construyen puentes con grandes luces por medio de este sistema constructivo es debido a que el costo de la cimbra crece considerablemente cuando la luz aumenta.

Debido al aumento en la inversión de un puente por medio de este sistema constructivo se hace viable únicamente para puentes grandes, con longitudes

mayores a los 600 metros o para la construcción de varios puentes de longitudes menores.

4.4.2 HISTORIA.

Debido a la necesidad de la construcción de tableros de puentes de ejecutar estructuras sin la necesidad de estar apoyados sobre el suelo surge en 1973 las primeras cimbras autoportantes fueron utilizadas en Gerona, España. En la figura 65 se observa la construcción de la supresión de pasos a nivel en la ciudad de Gerona, España por medio de la primera cimbra autoportante (Costa Ros, 2011).

Figura 65. Puente en Gerona, España. Primer puente construido por autocimbra.



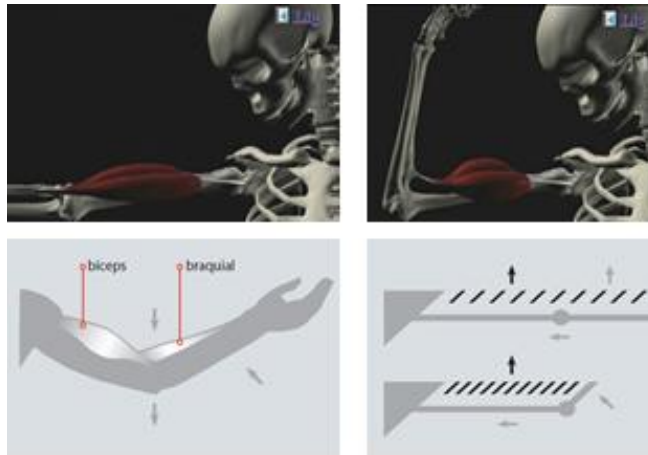
FUENTE: Mecanotubo.

Poco a poco han venido evolucionando estos sistemas constructivos obteniendo así cimbras autoportantes tanto superiores como inferiores. La tendencia actual se centra en un diseño de cimbras que permitan la ejecución de puentes con luces cada vez mayores con el fin de disminuir el número de pilas y el tiempo de ejecución del tablero.

Hoy en día se tienen cimbras autoportantes automatizadas que realizan operaciones de cimbrado, nivelación, ajuste del encofrado y descimbrado por medio de sistemas computarizados como es el caso de los sistemas OPS (Organic Prestressing System).

Es un sistema de pretensado que se ha venido implementando en algunas cimbras de la empresa portuguesa llamada BERD, este proyecto surgió de un estudio llevado a cabo por el doctor Pedro Pacheco en su tesis de doctorado llamada “Applying Effector Systems on Prestressed Bridge Decks” en la que se plantea la idea de un control activo en pretensado de estructuras tipo puente basado en el movimiento muscular del brazo, en el que la contracción del musculo hace mover el antebrazo (Figura 66).

Figura 66. OPS. Sistema de control activo basado en el comportamiento del musculo.



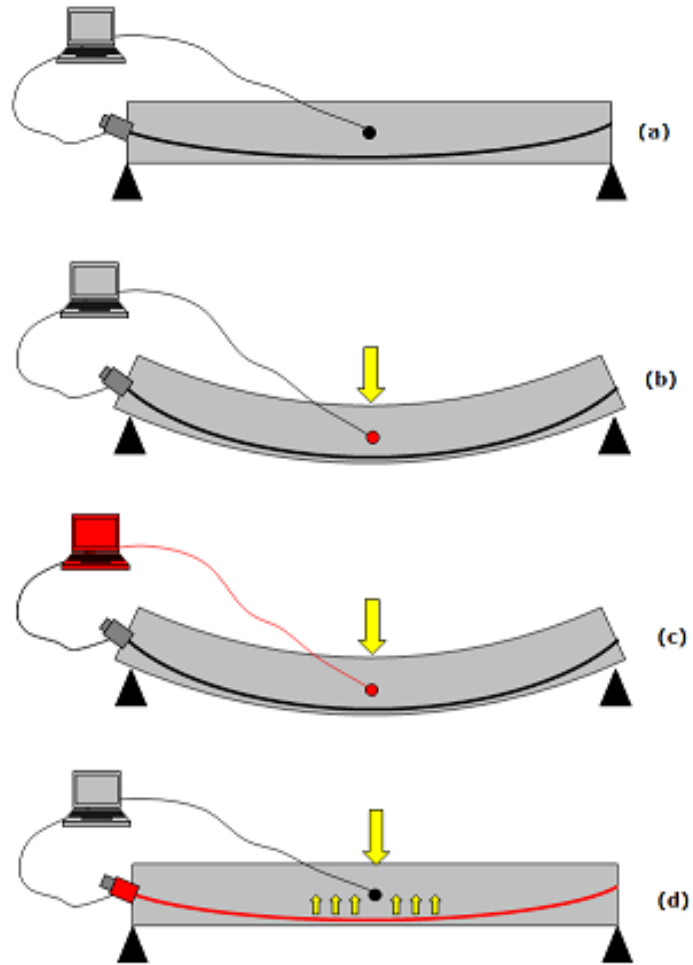
FUENTE: BERD.

El sistema consiste básicamente en recuperar las deformaciones obtenidas por medio de unos sistemas computarizados que controlan la deformación durante el proceso de hormigonado, llevando nuevamente la estructura a un estado inicial por medio del pretensado. A continuación se presentan los pasos del funcionamiento del sistema OPS.

- ✓ Se tiene la estructura autoportante unida al sistema OPS (sistemas computarizados inteligentes) un estado inicial donde no se presentan deformaciones (Figura 67 (a)).
- ✓ Posteriormente cuando se encuentra la estructura en el proceso de hormigonado esta sufre una deformación generada principalmente por el peso del concreto (Figura 67 (b)).
- ✓ Al ocurrir la deformación la información es enviada al sistema de control OPS donde allí es procesada (Figura 67 (c)) y posteriormente enviada con

el fin de realizar el pretensado para poder obtener una estructura con una mínima deformación (Figura 67 (d)).

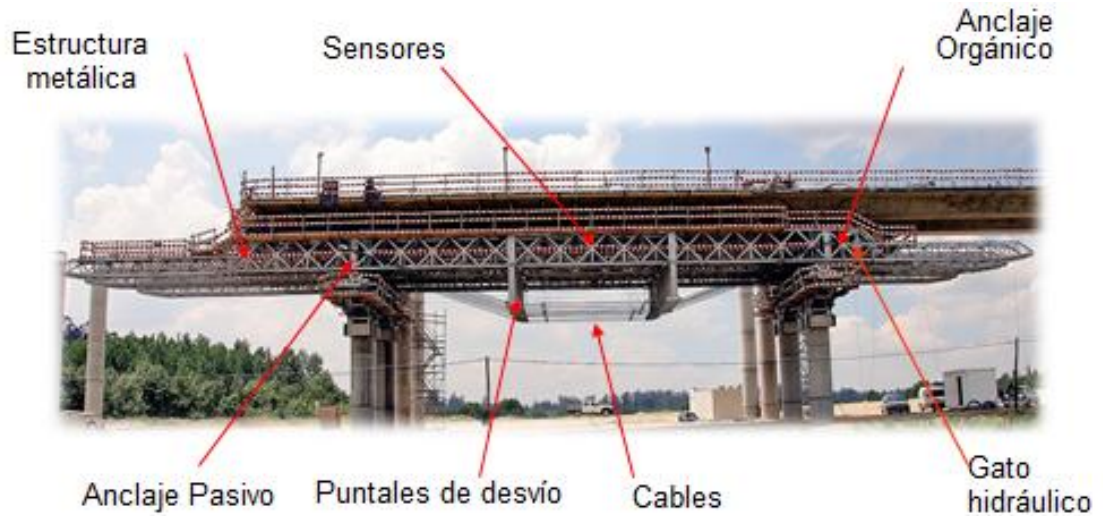
Figura 67. Funcionamiento del OPS.



FUENTE: BERD.

A continuación se presenta en la figura 68 una autocimbra inferior donde se señalan las partes principales usadas para las cimbras autoportantes con sistemas OPS.

Figura 68. Autocimbra inferior usando sistema OPS.



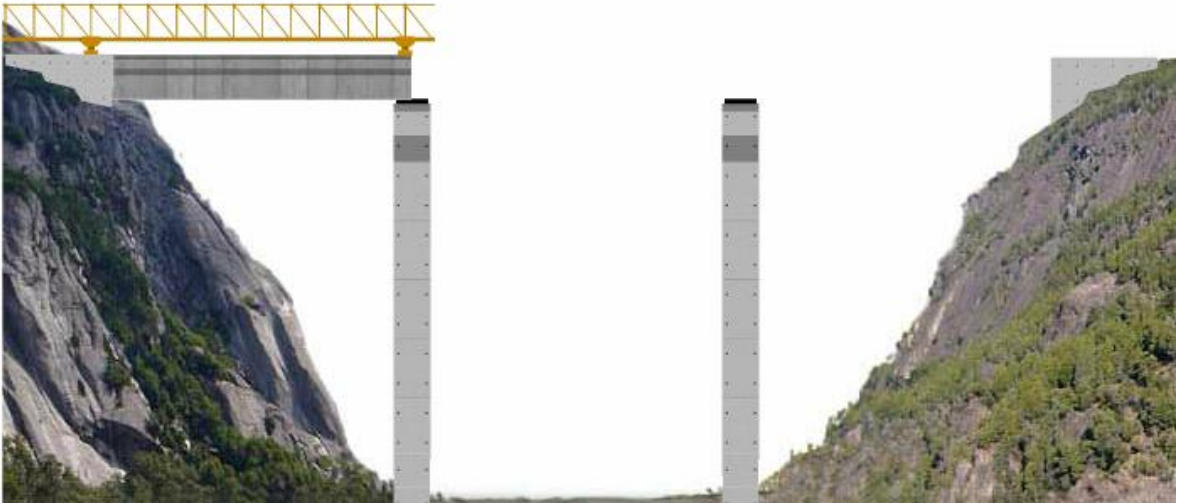
FUENTE: BERD.

4.4.3 PROCESO CONSTRUCTIVO.

Para la construcción mediante cimbra autoportante al igual que en los demás procesos constructivos es necesario actividades previas como son la excavación de cimientos de estribos y pilas, seguidos del hormigonado de los cimientos de pilas y estribos así como el alzado de los mismos para posteriormente realizar la construcción del tablero del puente.

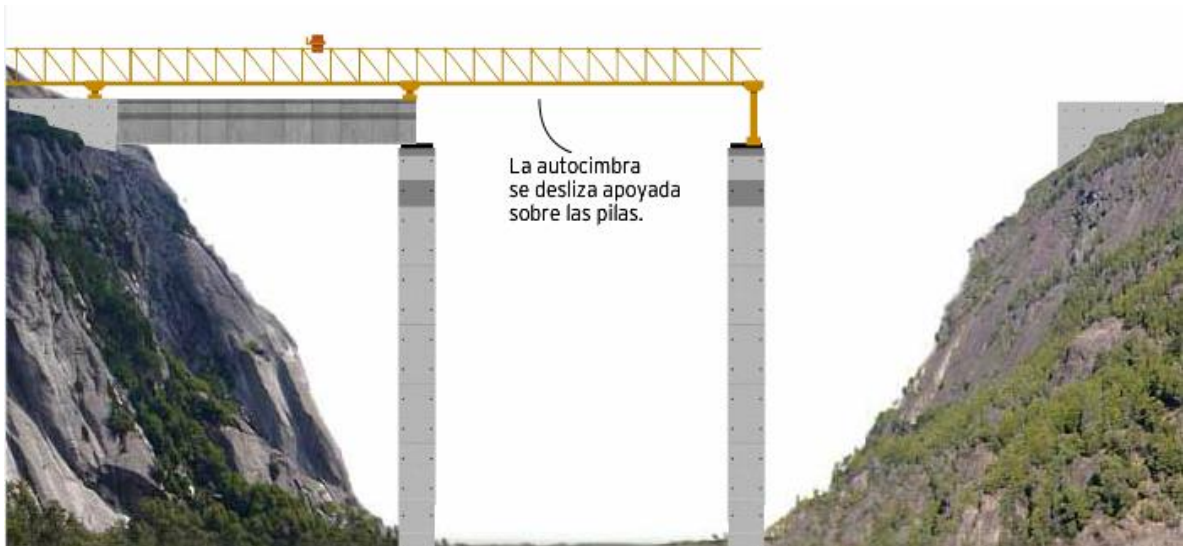
Para la construcción del tablero en primer lugar se instalan unas ménsulas metálicas unidas a las pilas sobre las que se apoyan los encofrados, una vez hormigonado y pretensado un vano del puente (Figura 69) la cimbra se suelta descendiendo ligeramente por medio de gatos verticales y se mueven transversalmente sobre dichas ménsulas (Figura 70).

Figura 69. Construcción del primer vano del puente por autocimbra.



FUENTE:http://www.euskalyvasca.com/es/multi_infog_detalle.html?contentName=cont_m_multimedia.infografia.construccion_viaductos.

Figura 70. Desplazamiento de la autocimbra para la construcción del segundo vano.



FUENTE:http://www.euskalyvasca.com/es/multi_infog_detalle.html?contentName=cont_m_multimedia.infografia.construccion_viaductos.

Una vez se encuentre la autocimbra en su posición se procede a utilizar el encofrado el cual servirá como molde para armado del acero de refuerzo y hormigonado del segmento del tablero (Figura 71).

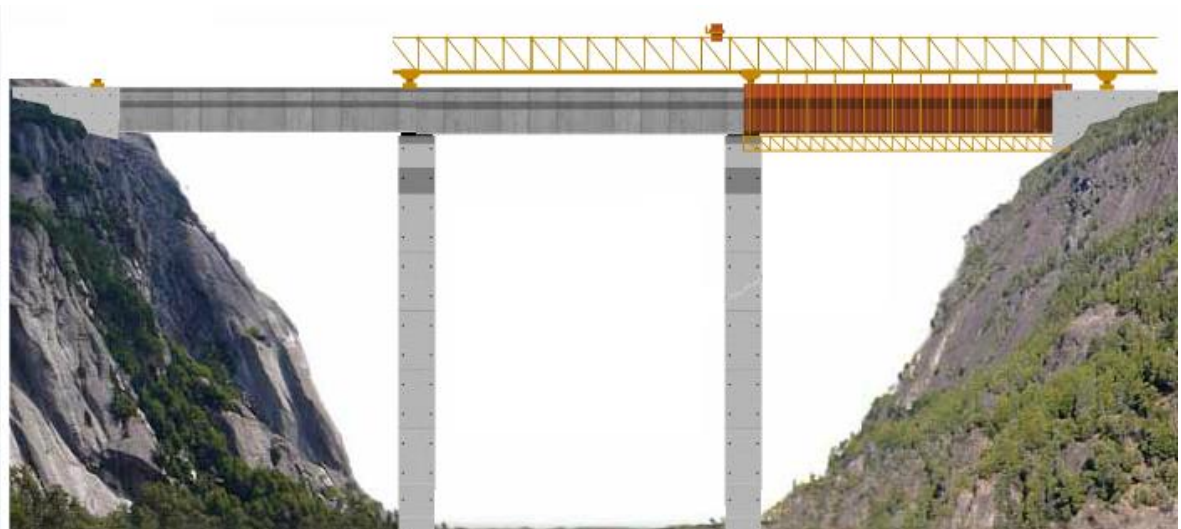
Figura 71. Encofrado de la cimbra autoportante.



FUENTE:http://www.euskalyvasca.com/es/multi_infog_detalle.html?contentName=cont_m_multimedia.infografia.construccion_viaductos.

Una vez finalizado el vano y fraguado del hormigón, la autocimbra vuelve a deslizarse sobre el vano siguiente con el fin de repetir la operación de armado y hormigonado del vano siguiente (Figura 72). Este proceso se realiza iterativamente hasta la terminación total del tablero del puente.

Figura 72. Hormigonado del último vano por autocimbra.

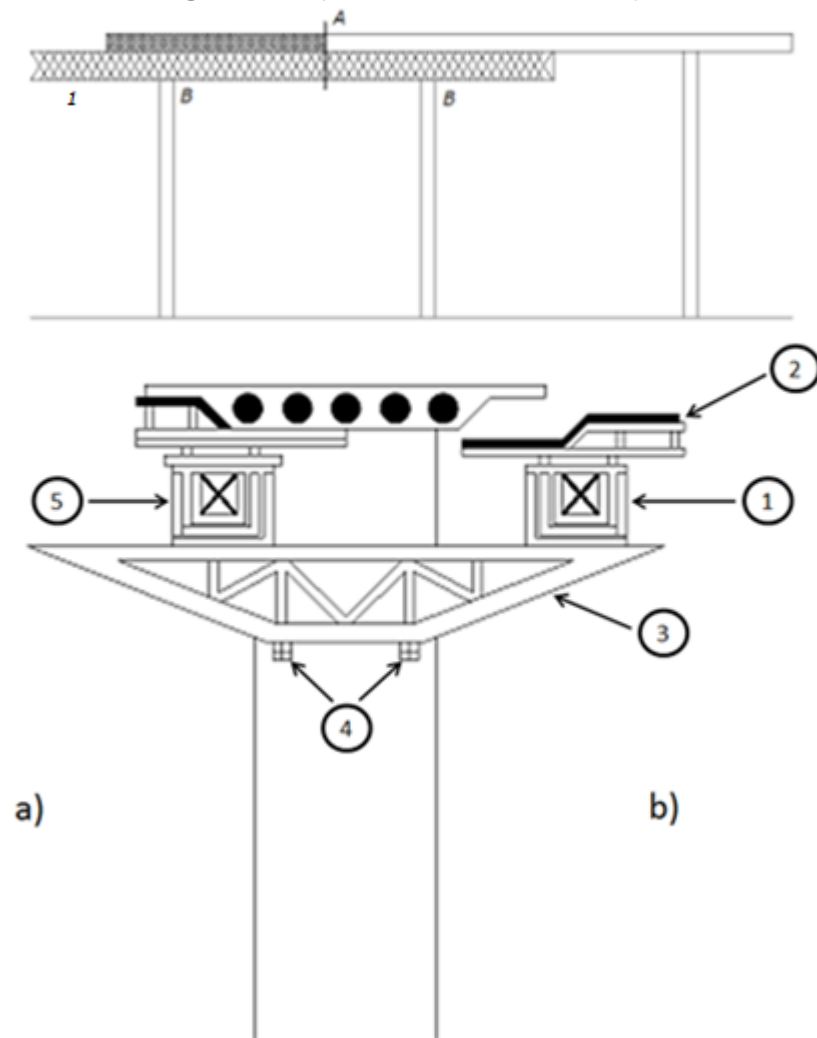


FUENTE:http://www.euskalyvasca.com/es/multi_infog_detalle.html?contentName=cont_m_multimedia.infografia.construccion_viaductos.

A continuación se presenta un proceso constructivo usado frecuentemente para cimbra autoportante tomado del libro Apuntes para su diseño, cálculo y construcción de Javier Manterola, 2006.

Con el fin de entender el proceso constructivo se tomará como base la figura 73 en el cual se presentan las principales partes utilizadas en el proceso constructivo de cimbras autoportantes. Consta de dos grupos de cinco vigas longitudinales (1), que soportan los encofrados del dintel (2), y se apoyan sobre ménsulas (3), sujetas a las pilas por medio de pequeñas vigas (4), que perforan la pila.

Figura 73. Ejecución de cimbra autoportante.



FUENTE: Modificado del libro Apuntes para su diseño, cálculo y construcción de Javier Manterola, 2006.

El número de vigas longitudinales y su canto dependen de la carga del puente y de la luz de la viga en su fase de hormigonado representado con los puntos A y B. Una vez hormigonado y pretensado un vano cada paquete de vigas se suelta de su apoyo A, se desciende ligeramente por medio de gatos verticales para posteriormente ser movidos transversalmente sobre las ménsulas metálicas unidas a las pilas. En su movimiento pasa de a) a b) desplazándose con la mitad del encofrado.

Después de haber llegado a su posición definitiva la viga se nivela, después se cierran los encofrados y finalmente se cuelgan las vigas principales del borde del voladizo del tramo recientemente hormigonado (A).

Lo anteriormente mencionado tiene como finalidad dos motivos, por una parte se reduce la luz real de las vigas metálicas para la situación en que deben recibir el peso del hormigón fresco del dintel. En segundo lugar evita que se produzca un desfase vertical entre dos tramos contiguos, el cual sería ocasionado por la deformación inevitablemente tomaría la viga metálica en A al flectar entre los dos apoyos B y B₁. Normalmente la ejecución de un tramo completo con este sistema constructivo puede realizarse en 15 días.

Para la realización de puentes curvos es importante tener en cuenta las siguientes precauciones que se pueden originar en su proceso constructivo:

- ✓ Establecer la separación entre las vigas portantes de tal manera que la curva del puente pueda estar entre ellas.
- ✓ Es importante que el encofrado este partido en dovelas de manera que pueda desplazarse en planta adoptando la forma curva requerida.
- ✓ Se debe tener precaución en cuanto a las deformaciones que se obtienen de los elementos metálicos debido a su peso propio, el peso del encofrado y el peso del hormigón fresco.

5. SISTEMAS CONSTRUCTIVOS DE PUENTES RECOMENDADOS PARA EL CASO COLOMBIANO EN LUCES MEDIAS.

A raíz de las técnicas modernas mencionadas anteriormente se recomienda la incorporación de estos sistemas al mercado colombiano, debido a que este es un país que ha venido creciendo considerablemente en infraestructura vial y por tal motivo debe adoptar nuevas técnicas que permitan acometer en plazos más razonables la construcción de puentes.

Como anteriormente ya se señaló los procedimientos de construcción más usuales para puentes de concreto de luces medias “in situ” son los puentes empujados, puentes extradosados y puentes con cimbra autoportantes. Además existen los puentes prefabricados construidos por medio de voladizos sucesivos con dovelas prefabricadas.

Aunque este proyecto no pretende desvirtuar la construcción de puentes por medio de voladizos sucesivos “in situ” se quiere dar a conocer otros sistemas constructivos con los que se lograría una natural evolución en la construcción de puentes en Colombia, con el fin de disminuir considerablemente los tiempos de construcción principalmente del tablero.

Aunque los puentes construidos por medio de voladizos sucesivos “in situ” en muchos casos podría ser remplazado por voladizos sucesivos por dovelas prefabricadas u otros procesos constructivos es importante resaltar que los voladizos sucesivos “in situ” seguirán siendo muy útiles en situaciones especiales.

Con respecto a los tiempos de construcción de un puente es importante tener presente que por medio del método de los voladizos sucesivos “in situ” se puede lograr un avance de una dovela de 4 a 6 metros por semana y frente de trabajo; mientras que por medio de otros sistemas más industrializados como es el caso de los puentes empujados se logra fácilmente un avance entre 30 y 40 metros (dependiendo del tamaño del parque de fabricación) en un tiempo aproximado entre 7 a 10 días.

Por otro lado los sistemas con cimbra autoportante alcanzan a cubrir en un tiempo estimado de 15 días la totalidad del vano del puente, que puede estar en el orden entre los 40 y 90 metros.

Finalmente la construcción de puentes por medio de dovelas prefabricadas puede alcanzar tiempos de obra colocando de dos a tres dovelas por día y por frente de trabajo (estas dovelas tienen longitudes de aproximadamente 2.5 metros).

Sin embargo, después de evaluar estos métodos de construcción de puentes se ha encontrado que los métodos de empuje y cimbra autoportante son los sistemas que en la actualidad tienen mayor uso. Los motivos por el cual son más utilizados estos dos procedimientos radican en las ventajas que estos ofrecen:

- ✓ Existe una independencia entre la construcción del tablero y el terreno lo que permite salvar obstáculos y accidentes naturales como es el caso de ríos, bosques, entre otros.
- ✓ Estos sistemas aunque son costosos a futuro generan un ahorro debido a que los medios auxiliares son reutilizados es decir sirven para la construcción de varios puentes.
- ✓ Permiten obtener mejores rendimientos en cuanto a procedimientos constructivos resultando competitivos para puentes de longitudes grandes y moderadas.
- ✓ Reducción de impacto ambiental ya que hay una independencia entre la construcción de las pilas y el tablero, motivo por el cual después de tener construida la pila los caminos de accesos utilizados tienen una rápida recuperación de vegetación, a diferencia de los voladizos sucesivos “in situ” en los que se debe esperar la construcción total del puente ya que el tablero de igual manera se construye ingresando por las pilas.

La elección de uno u otro sistema constructivo dependerá entre otros factores de la longitud del puente, la luz entre pilas, los medios auxiliares que se disponga y de la geometría del puente.

Finalizando se puede concluir que debido a la gran necesidad de proyectar una gran cantidad de puentes y grandes viaductos en el país es importante observar hacia nuevas tipologías y técnicas novedosas en la construcción de puentes en países más desarrollados. Colombia ha tenido una constante donde casi todo gran viaducto es acometido por medio de la técnica de los voladizos sucesivos “in situ” donde este proceso en comparación a los sistemas ya mencionados es muy lento.

6. ESTUDIO COMPARATIVO DE COSTOS A NIVEL PRELIMINAR.

El principal factor que limita este último capítulo es la dificultad de conseguir información correspondiente al costo de las estructuras y adicionalmente se encontró que en muchas ocasiones dentro del valor total están incorporados los costos de las vías de acceso hacia los puentes y viaductos. Por estas razones no se realizó esta comparación de costos con una mayor cantidad de puentes.

Sin embargo, después de lo mencionado anteriormente se realizará una comparación a modo preliminar del costo que genera la construcción de un puente por voladizos sucesivos “in situ” en Colombia con un puente construido por el proceso de cimbra autoportante en España.

Para esto se tomaran dos puentes, el primer puente será el viaducto Arroyo del Valle construido por el proceso de cimbra autoportante ubicado en Segovia – Valladolid (España) en el cual su valor total será utilizado para calcular el costo por m² de tablero.

El segundo será el puente Cajamarca construido por voladizos sucesivos “in situ” ubicado en la carretera Armenia - Ibagué (Colombia), del cual se obtendrá de igual manera el costo por m² de tablero y se comparará con el valor obtenido del puente construido por cimbra autoportante mencionado anteriormente. Esto se realizará con el fin de obtener una diferencia de costos por m² de tablero en la construcción de puentes por uno u otro proceso constructivo a nivel preliminar.

Los datos sobre el costo total del puente construido en Colombia es tomado de la página www.contratos.gov.co y el costo del puente de España se encuentra en el ministerio de fomento de dicho país.

A continuación se dará una descripción de cada uno de los puentes donde se mencionará el valor obtenido por m² de tablero.

- ✓ **Primer puente:** construido por cimbra autoportante donde se tomará el valor por m² de tablero con el fin de compararlo con el puente construido por voladizos sucesivos “in situ”.

Este puente es el viaducto Arroyo del Valle y se encuentra ubicado en Segovia - Valladolid, España (Figura 74).

Figura 74. Viaducto Arroyo del Valle.



FUENTE: Ficha técnica sobre ejecución del viaducto Arroyo del Valle.

Esta estructura tiene una longitud de 1755 metros, con luces de 66 metros y dos vanos laterales de 52.5 metros. El ancho de tablero para este puente es de 14 metros y fue construido por el sistema de cimbra autoportante (Figura 75).

Figura 75. Viaducto Arroyo del Valle construido con cimbra autoportante.



FUENTE: Ficha técnica sobre ejecución del viaducto Arroyo del Valle.

La infraestructura está compuesta por 25 pilas cuyas alturas oscilan de 30 a 70 metros aproximadamente y estribos en concreto reforzado.

Para el costo total del puente se tomó la información obtenida en la página <http://e-ache.com/modules/ache/ficheros/Realizaciones/Obra77.pdf> referente a la Construcción del viaducto Arroyo del Valle en Segovia – Valladolid, donde se encuentra un valor total del puente de \$69.236'500.000 correspondiente a un tablero de 1755 metros de longitud con 14 metros de ancho. Este viaducto fue inaugurado en 2008.

A continuación se calculará el costo del tablero por m² correspondiente a este puente construido con cimbra autoportante:

$$\frac{\text{Costo total del puente}}{\text{Area del tablero}} = \frac{69.236'500.000}{1755 * 14} = 2'817.928 \text{ \$/m}^2$$

Es decir para este puente el m² de tablero tiene un valor de \$2'817.928

- ✓ **Segundo puente:** construido por voladizos sucesivos “in situ” donde se tomará el valor por m² de tablero con el fin de compararlo con el puente construido por cimbra autoportante.

Este es el puente Cajamarca, se encuentra ubicado en la carretera Armenia - Ibagué, Colombia (Figura 76).

Figura 76. Puente Cajamarca de la carretera Armenia - Ibagué.



Fuente: Google Imágenes.

Esta estructura tiene una longitud de 300 metros, con luz central de 150 metros y luces laterales de 75 metros cada una. El ancho de tablero para este puente es de 13 metros y fue construido por el sistema de voladizos sucesivos “in situ” (Figura 77).

Figura 77. Puente Cajamarca construido por voladizos sucesivos “in situ”.



Fuente: Geosoluciones SAS.

La infraestructura está compuesta por dos pilas cuyas alturas son de aproximadamente 60 metros y estribos en concreto reforzado.

Para el costo total del puente se tomó la información obtenida en la página contratos.gov.co referente a Construcción del puente Cajamarca de la carretera Armenia - Ibagué, ruta 4003. Departamento del Tolima. Donde se encuentra un valor total del puente de \$18.320'187.040 correspondiente a un tablero de 300 metros de longitud con 13 metros de ancho. Este valor está adjunto en el anexo A, donde se encuentra un valor mayor que el tomado para él cálculo de m² de tablero, debido a que se restó ítems que no correspondían directamente con la construcción del puente.

A continuación se calculará el costo del tablero por m² correspondiente a este puente construido con voladizos sucesivos “in situ”:

$$\frac{\text{Costo total del puente}}{\text{Area del tablero}} = \frac{18.320'187.040}{300 * 13} = 4'697.484 \text{ \$/m}^2$$

Es decir para este puente el m² de tablero tiene un valor de \$4'697.484

Después de haber observado la diferencia existente entre el Viaducto Arroyo del Valle construido con cimbra autoportante cuyo valor por m² de tablero fue de \$2'817.928 y el puente Cajamarca construido por voladizos sucesivos "in situ" cuyo valor por m² de tablero fue de \$4'697.484 se puede observar que existe una diferencia de \$1'879.556 por el cual de forma muy subjetiva se puede concluir que es más económico la construcción de puentes por medio del sistema autoportante.

Basándonos en la experiencia que el director del proyecto se puede decir que estos dos puentes están dentro del rango normal del costo para cada proceso constructivo. Según el director "el valor promedio por m² para un puente construido por voladizos sucesivos "in situ" se encuentra alrededor de entre tres y cinco millones".

Después de comprobar que estos procesos constructivos oscilan dentro de los valores estimados por director, se puede concluir de forma inicial que la construcción de puentes por medio de sistemas más industrializados como los aquí evaluados tienen grandes posibilidades de competir contra los voladizos.

Sin embargo, es de gran importancia resaltar que estos precios calculados por m² no aplica para todos los puentes construidos por estos sistemas, ya que la construcción de cada uno de ellos tiene sus particularidades que los hacen únicos (tipo de terreno, acceso a la obra, altura de las pilas, profundidad de las cimentaciones, entre otros) y como consecuencia a esto sus precios pueden variar significativamente. Estos valores citados anteriormente son dados a conocer con el objetivo de tener una idea inicial de la diferencia que puede existir a nivel de costos entre un proceso constructivo y otro; y de esta manera saber si es viable dedicar esfuerzos para motivar la introducción al país de técnicas modernas.

Un ejemplo en el que claramente el costo por m² no se encuentra en los rangos establecidos anteriormente es el caso del puente Guillermo Gómez Ortiz que se encuentra ubicado en el río Sogamoso en la vía Bucaramanga – Zapatoca, el cual está siendo construido actualmente por voladizos sucesivos "in situ". Con el objetivo de mostrar que no todos los puentes construidos por un mismo sistema tienen el mismo valor por m² se calculara el valor por m² de tablero para este puente.

Esta estructura tiene una longitud de 510 metros, que consta de cuatro luces continuas entre los ejes 1 y 5 construidos por voladizos sucesivos cuyas luces son de 79.5 metros, dos luces de 160 metros y una luz de 180 metros. Posteriormente

existe una luz simple entre los ejes 5 y 6 en tablero y vigas de 30 metros de longitud. El ancho de tablero es de 11.6 metros y está construido por el sistema de voladizos sucesivos “in situ”.

La infraestructura está compuesta por cuatro pilas en concreto pres-forzado cuyas alturas oscilan en 150 metros aproximadamente y estribos en concreto reforzado.

Para el costo total del puente se tomó la información obtenida en la página http://www.isagen.com.co/Revista/Revista_3_Julio-Noviembre_2011.pdf referente a la Construcción del puente Guillermo Gómez Ortiz. Donde se encuentra un valor total del puente de \$43.116'000.000 correspondiente a un tablero de 510 metros de longitud con 11.6 metros de ancho.

A continuación se calculará el costo del tablero por m² correspondiente a este puente construido con voladizos sucesivos “in situ”:

$$\frac{\text{Costo total del puente}}{\text{Area del tablero}} = \frac{43.116'000.000}{510 * 11.6} = 7'288.032 \text{ \$/m}^2$$

Es decir para este puente el m² de tablero tiene un valor de \$7'288.032

Es importante mencionar que la construcción del puente Guillermo Gómez Ortiz tiene un valor por m² tan elevado a las características geológicas de la zona que hicieron necesario unas cimentaciones muy robustas.

Obtenido este valor (\$7'288.032 por m²) se puede observar que no se encuentra dentro de los rangos establecidos anteriormente para los voladizos sucesivos “in situ” (cuatro a cinco millones por m²), motivo por el cual no se puede generalizar todos los puentes con un mismo valor por m². Además como se puede observar tal como se mencionó al inicio de este capítulo, cada estructura tiene sus particularidades tanto en diseño como en el proceso de construcción, debido a las innumerables variables que se presentan para cada terreno, siendo este otro de los factores que afectan considerablemente el costo del puente.

7. CONCLUSIONES.

Con respecto a la técnica de mayor uso en la construcción de puentes en concreto para luces medias en Colombia:

- ✓ Se identificó la técnica de voladizos sucesivos “in situ” como la técnica de mayor uso en Colombia para los puentes con luces medias construidos en concreto.
- ✓ Con respecto a las ventajas que presenta este sistema constructivo se encuentra costos por debajo de otros sistemas constructivos modernos además de poder salvar luces de media y gran longitud.
- ✓ Con respecto a las desventajas de los voladizos sucesivos es un ritmo de construcción lento y además para la construcción del tablero siempre se debe trabajar desde las pilas motivo por el cual no se puede hacer una independencia entre lo correspondiente a la subestructura y superestructura.
- ✓ El tipo de sección transversal más usada en los tableros de estas tipologías de puentes (en las que se encuentra voladizos sucesivos “in situ”, dovelas prefabricadas, autocimbra, empujado y extradosado) es sin duda alguna la viga de sección cajón que presenta como ventaja un buen comportamiento estructural además de ser ligera debido a su sección hueca pero como consecuencia a ello presenta una mayor complejidad constructiva.
- ✓ Se logró la identificación de los procesos constructivos de mayor uso para luces medias en países más industrializados en los que se encuentran los puentes empujados, puentes con cimbra autoportante, puentes extradosados y puentes construidos por voladizos sucesivos con dovelas prefabricadas.

Con respecto con autocimbra o cimbra autoportante:

- ✓ Es una de las técnicas de mayor uso hoy en día en la construcción de puentes en países más desarrollados debido a la velocidad que se logra durante la etapa de construcción y además por que logra una independencia entre las pilas y el tablero del puente. Siendo así tal vez un motivo por el cual sería de gran importancia la incorporación de este

sistema constructivo al mercado colombiano con el fin de agilizar los tiempos de obra en la ejecución de puentes.

- ✓ A pesar de ser la técnica de mayor uso, una de sus limitaciones que se presentan con mayor frecuencia es la luz del vano debido a que este proceso se encuentra limitado entre 40 y 90 metros.
- ✓ La viabilidad de este proceso constructivo radica básicamente en la luz de los vanos que se tienen, ya que al tener vanos mayores el costo de la autocimbra crece considerablemente. Generalmente se considera rentable un puente construido por este sistema cuando se tienen luces mayores a los 400 metros.

Con respecto a puentes empujados:

- ✓ Es otra de las técnicas de gran uso donde la totalidad del tablero es construido detrás de uno de los estribos del puente donde posteriormente es empujado por medio de unos sistemas hidráulicos hasta alcanzar la totalidad del puente.
- ✓ La principal limitación de este proceso constructivo es que solo puede ser construido siempre y cuando su trazado sea recto o con un radio de curvatura constante ya que si esto no se cumple el tablero del puente durante el empuje no coincidiría con las pilas del puente.
- ✓ Las luces máximas que se pueden alcanzar por medio de los puentes empujados son hasta 90 metros aproximadamente debido a la ley de momentos que rige al tablero durante el empuje ya que durante su proceso de empuje el tablero se encuentra en voladizo y podría ocurrir un volcamiento del tablero.
- ✓ La viabilidad de una construcción de un puente por medio del sistema de empuje se genera al tener luces mayores de 400 metros debido al costo que ocasionan los elementos auxiliares como son parque de fabricación, nariz de lanzamiento, sistemas hidráulicos de empuje y apoyos deslizantes.

Con respecto a puentes construidos con voladizos sucesivos con dovelas prefabricadas.

- ✓ Entre un sistema constructivo de voladizos sucesivos ya sea “in situ” o de dovelas prefabricadas uno de los factores que entra a definir qué tipo de

sistema usar es la luz del puente, debido a que para puentes con pequeñas o moderadas luces el sistema “in situ” sería el ideal, pero para puentes de grandes luces las dovelas prefabricadas serían una mejor opción.

- ✓ Se presenta como una evolución de los puentes con voladizos sucesivos “in situ” donde las dovelas son construidas en moldes aledaños a la obra, para posteriormente ser llevados a un parque de almacenamiento y de allí al puente para su colocación.
- ✓ De las dos alternativas que se presentan para la construcción del tablero por medio de este sistema la de mayor uso y recomendación es el método de la línea corta (short – line casting) debido a que ocupan un menor espacio en la obra, mientras por otro lado el método de la línea larga (long – line casting) genera una mayor disposición de terreno para la construcción.
- ✓ La utilización de los elementos usados en este proceso tanto para los controles geométricos como para los moldes de la fundida de las dovelas debe ser de gran precisión ya que al tratarse de dovelas conjugadas se debe llevar una secuencia de izaje ya que si estas no son exactas no existirá una adecuada distribución de esfuerzos.

Con respecto a puentes extradosados:

- ✓ Es una tipología de puentes que aunque en ocasiones es llamado un híbrido debido a que representa un proceso constructivo similar al de los puentes con voladizos sucesivos “in situ” (pretensados) y los puentes atirantados, merece al igual que todos los otros procesos constructivos un estudio de diseño y construcción ya que relativamente es un concepto nuevo de puentes.

Conclusiones finales:

- ✓ Las ventajas que presentan en la construcción uno u otro sistema dependen del equipo utilizado además de la experiencia que se tenga en la construcción por medio de algún sistema constructivo.
- ✓ Los factores que pueden definir el tipo de sistema constructivo a utilizar dependen básicamente de la disponibilidad de espacio que se tenga en la

obra, la rapidez con que se desee construir el puente y el presupuesto que se tenga para realización del proyecto.

- ✓ Generalmente los sistemas constructivos modernos usados en la construcción de puentes generan un mayor costo en el presupuesto, debido generalmente a los elementos auxiliares que se deben tener, por lo tanto se recomienda la utilización de estos procesos para puentes de gran longitud (mayores a 400 metros) donde se logra una competitividad de estas técnicas con respecto a los voladizos sucesivos “in situ”.
- ✓ Después de haber realizado el estudio sobre las técnicas usadas en países más desarrollados se puede concluir que las técnicas con mayor uso en la construcción de puentes para luces medias son los puentes con cimbras autoportante y puentes empujados debido a que son las técnicas con mayor rapidez de ejecución.
- ✓ El control geométrico que se debe tener en la construcción de puentes debe ser muy preciso debido a que en todos estos procesos constructivos generarían grandes inconvenientes al tener deformaciones no previstas, por ejemplo en los puentes empujados se generaría grandes fricciones al momento del empuje, en los puentes con dovelas prefabricadas habrían inconvenientes al no tener dovelas conjugadas con una sección igual y en los voladizos sucesivos “in situ” las deformaciones no permitirían una coincidencia de los dos voladizos para la dovela de cierre.
- ✓ Debido a la gran competencia que existe entre los puentes empujados y los de cimbra autoportante es probable que se puedan generar luces mayores a las ya establecidas ya que constantemente se realizan estudios con el fin de mejorar los vanos existentes.
- ✓ De forma preliminar se pudo observar que el valor total del puente por medio de sistemas de mayor industrialización (puentes empujados y autocimbra principalmente) se presenta una disminución de costo de la estructura considerable, motivo por el cual adicionando la rapidez de ejecución que se presenta con este tipo de procedimientos se puede concluir que la incorporación de por lo menos una de estas técnicas al mercado colombiano puede ser una gran opción de crecer en infraestructura.

8. BIBLIOGRAFÍA.

- ✓ **ALARCÓN LÓPEZ, Alejandro.** Estudio teórico – experimental sobre la reparación y refuerzo de puentes de dovelas con fibras de carbono. Universidad Politécnica de Cataluña. Tesis doctoral. Barcelona, 2002.
- ✓ **BENJUMEA José, CHIO CHO Gustavo, MALDONADO Esperanza.** Comportamiento estructural y criterio de diseño de los puentes extradosados: visión general y estado del arte. En: Revista Ingeniería de construcción, vol 25 N° 3. Pág. 383-398. 2010.
- ✓ **BENJUMEA ROYERO José Miguel.** Evaluación del comportamiento estructural de puentes extradosados con pilares esbeltos en zonas de alta sismicidad. Universidad Industrial de Santander. Tesis de maestría. Bucaramanga, 2012.
- ✓ **BERD.** Technical Manual Rio Sousa launching gantry.
- ✓ **BUENO MARTÍNEZ Antonio.** Diseño de técnicas de interrogación y sensores en fibra para el sector de la construcción. Universidad Politécnica de Valencia. Tesis doctoral. Valencia, 2012.
- ✓ **CARBALLO Manuel F.** Diseño y construcción en tiempo record del puente sobre la I-35 en Minneapolis. Congreso presentado en Cartagena de Indias, Colombia, 2010.
- ✓ **CETINA BERDUGO Diego, OVALLE PORRAS Noel.** Evaluación del proceso constructivo en el comportamiento estructural de un puente construido por voladizos sucesivos. Universidad Industrial de Santander. Tesis de pregrado. Bucaramanga, 2011.
- ✓ **CHIO CHO, Gustavo.** Comportamiento estructural y criterios de diseño de los puentes con pretensados extradosado. Universidad politécnica de Cataluña. Tesis doctoral. Barcelona, 2000.
- ✓ **COSTA ROS Marc.** Estudio de la viabilidad del uso de atirantamiento en cimbras de avance para puentes. Universidad Politécnica de Cataluña. Tesis de especialidad. Febrero, 2011.

- ✓ **DEMCHENKO, Yulia.** Sistemas de construcción de puentes arcos. Universidad Politécnica de Madrid. Tesis de maestría. Madrid, 2011.
- ✓ **DOS SANTOS, Daniel M.** Comportamento estrutural de pontes com protensão no extradorso. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Tesis de maestrado. São Paulo, Brasil. 2006.
- ✓ **FERNANDEZ CASADO Carlos, MANTEROLA ARMISEN Javier, FERNANDEZ TROYANO Leonardo.** Construcción de puentes por voladizos sucesivos mediante dovelas prefabricadas. Revista de obras públicas. Julio, 1970.
- ✓ **GERARDINO PERDOMO, Marlio.** Estudio comparativo de puentes construidos por voladizos sucesivos. Universidad Politécnica de Cataluña. Tesis de maestría. Barcelona, 2011.
- ✓ **GONZÁLES ESTEBAN, José Ignacio.** Construcción de viaductos de dovelas prefabricadas. Doctor ingeniero de caminos, canales y puertos.
- ✓ **LLOMBART JAQUES José, REVOLTÓS FORT Jordi.** Puente sobre el rio Deba (Autopista Vitoria – Eibar). Revista de obras públicas N° 3459. Octubre, 2005.
- ✓ **LOPEZ MORANTES Elkin, VANEGAS HERRERA Sergio.** Sistemas constructivos en puentes con pretensado extradosado, estado del arte. Universidad Industrial de Santander. Tesis de pregrado. Bucaramanga, 2009.
- ✓ **MANTEROLA, Javier.** Puentes. Apuntes para su diseño, cálculo y construcción. Colegio de Ingenieros de Caminos, canales y puertos. Colección escuelas. Primera edición, Junio 2006.
- ✓ **MORCH LARSEN, Thomas.** Plate buckling in movable scaffolding systems. University of Oslo. Master thesis. May, 2011.
- ✓ **PÉREZ Santiago, MARTINEZ Fadón.** Construcción de viaductos para líneas de FFCC. Tableros empujados. Revista de obras públicas N° 3445. Junio, 2004.

- ✓ **PUJALS RAYMI Josep, AINCHIL LAVIN Javier.** Diseño y construcción sostenibles de un viaducto de carretera ejecutado por voladizos sucesivos en una zona protegida pein. FCC construcción.
- ✓ **ROMÁN CAMACHO, Jesús Eliecer.** Análisis paramétrico de puentes extradados en estado de servicio considerando como parámetro el canto del tablero y altura de la torre. Universidad Industrial de Santander. Tesis de pregrado. Bucaramanga, 2012.
- ✓ **ROSIGNOLI, Marco.** Prestressing Schemes for Incrementally Launched Bridges. Journal of bridge Engineering. May 1999.
- ✓ **SUAREZ RODRIGUEZ, Mario Alejandro.** Análisis del comportamiento estructural de puentes extradados durante construcción. Universidad Industrial de Santander. Tesis de pregrado. Bucaramanga, 2012.

ANEXO A. PRESUPUESTO DEL PUENTE CAJAMARCA DE LA CARRETERA ARMENIA - IBAGUE.

No.	CODIGO CUBS	ITEM DE PAGO	ESPEC. 2007	ESPEC. PARTICULAR	DESCRIPCION	UN	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	VALOR PARCIAL
1	3.6.9	201.18	201-07		Traslado de postes	UN	10.00	613,192.00	6,131,920.00
2	3.6.1.3	201.16	201-07		Remoción de cercas	ML	1,640.00	6,675.00	10,947,000.00
3	3.6.1.3	201.5	201-07		Demolición de viviendas existentes	UN	5.00	1,106,035.00	5,530,175.00
4	3.6.2.1.1	210.1.2	210-07		Excavaciones sin clasificación de cortes y préstamos (incluye transporte)	M3	20,000.00	11,079.00	221,580,000.00
5	3.6.2.3.2	220.1	220-07		Terraplenes	M3	20,000.00	7,101.00	142,020,000.00
6	3.6.3.4.2	320.1	320-07		Sub-base granular compactada CBR>=20 (Incluye transporte)	M3	1,100.00	66,282.00	72,910,200.00
7	3.6.4.3.1	420.1	420-07		Riego de Imprimación	M2	9,000.00	1,782.00	16,038,000.00
8	3.6.6.1.11	600.5	600-07		Excavaciones varias en material común bajo agua	M3	60.00	17,235.00	1,034,100.00
9	3.6.6.2.3	610.1	610-07		Relleno de estructuras(incluye transporte)	M3	800.00	36,281.00	29,024,800.00
10	3.6.6.9.1	641.1	641-07		Cable de tensionamiento Fs=18900 kg/cm2 (baja relajación)	TN-M	2,290,000.00	1,333.00	3,052,570,000.00
11	3.6.6.10	642.1	642-07		Apoyos de neopreno para topes sísmicos (0,60*0,60*0,05 Dureza 60)	UN	4.00	675,350.00	2,701,400.00
12	3.6.6	671	671-07		Cunetas revestidas en concreto clase D	M3	13.80	362,260.00	4,999,188.00
13	3.6.6.16.1	672.1	672-07		Sardineles (bordillos)	MI	360.00	41,997.00	15,118,920.00
14	3.6.6.19.1	673.1	673-07		Material drenante	M3	40.00	50,095.00	2,003,800.00
15	3.6.7.2.1	701.1	701-07		Tachas reflectivas	UN	490.00	12,431.00	6,091,190.00
16	3.6.7.3.31	710.1	710-07		Señales verticales	UN	11.00	188,073.00	2,068,803.00
17	3.6.7.3	710.4	710-07		Señal vertical de transito tipo delineador de curva horizontal	UN	22.00	117,997.00	2,595,934.00
18	3.6.7.5	730.1	730-07		Defensas metálicas (45 kg/cm2)	ML	200.00	140,679.00	28,135,800.00
19	3.6.9.1	800.2	800-07		Cercas de alambre de puas con postes de concreto	ML	1,200.00	14,455.00	17,346,000.00
20	3.6.9.2.2	810.2	810-07		Empradización tierra orgánica y semillas	M2	5,000.00	7,586.00	37,930,000.00
21	3.6.9	810.3	810-07		Revegetación	M2	4,000.00	5,226.00	20,904,000.00
22	3.6.6.10	10P		10P	Apoyos móviles tipo SLIDE FLON ó FL 250	UN	4.00	8,061,000.00	32,244,000.00
23	3.6.7	13P		13P	Manejo y control de tránsito	GL	1.00	67,411,618.00	67,411,618.00
24	3.6.9	6P		6P	Drenes D=4" PVC con rejilla metálica (0,15*0,45 modelo MOPT)	UN	20.00	71,807.00	1,436,140.00
25	3.6.9	7P		7P	Drenes D=4" PVC sin rejilla (modelo MOPT)	UN	240.00	40,257.00	9,661,680.00
26	3.6.6.10	9P		9P	Juntas de expansión TIPO RAM P300 o similar	MI	22.00	3,900,380.00	85,808,360.00
27	3.6.1.2.2	200	200-07		Desmonte y limpieza	HA	2.50	1,510,449.00	3,776,122.50
28	3.6.1.6	2P		2P	Localizacion y replanteo	GL	1.00	6,932,820.00	6,932,820.00
29	3.6.3.6.1	330.1	330-7		Base Granular Compactada (Incluye transporte)	M3	1,000.00	89,485.00	89,485,000.00
30	3.6.4.11.19	450.2P	450-07	450.2P	Mezcla densa en caliente Tipo MDC-2	M3	420.00	408,737.00	171,669,540.00
31	3.6.6.1.10	600.4	600-07		Excavaciones varias en material común en seco	M3	3,000.00	15,035.00	45,105,000.00

CONSTRUCCION DE PUENTES EN COLOMBIA. ESTADO ACTUAL Y PERSPECTIVAS FUTURAS.

32	3.6.6.4	621P	621-07	621P	Pilotes preexcavados (CAISSONS) concreto clase C f'c=280 kg/cm2 (diámetro 2 m, incluye excavaciones, formaleta(bien sea metálica y/o anillos de concreto) soporte temporal, concreto tremie, bombeo, no incluye acero de refuerzo) CAISSONS	M3	994.00	1,593,583.00	1,584,021,502.00
33	3.6.6.4	621.1P	621-07	621.1P	Pilotes preexcavados (CAISSONS) concreto clase C f'c=280 kg/cm2 (diámetro 1,5 m, incluye excavaciones, formaleta(bien sea metálica y/o anillos de concreto) soporte temporal, concreto tremie, bombeo, no incluye acero de refuerzo) CAISSONS	M3	319.00	1,531,400.00	488,516,600.00
34	3.6.6.6.8	630.1	630-07		Concreto Clase A f'c=5000 psi Viga Cajón	M3	3,180.00	986,404.00	3,136,764,720.00
35	3.6.6.6.26	630.3	630-07		Concreto Clase C para pilas	M3	2,300.00	713,524.00	1,641,105,200.00
36	3.6.6.6.35	630.4	630-07		Concreto clase D para muros y aletas f'c=3.000psi	M3	300.00	519,502.00	155,850,600.00
37	3.6.6.6.35	630.4.1	630-07		Concreto clase D (f'c=3000psi) placa de acceso y andenes	M3	16.00	530,756.00	8,492,096.00
38	3.6.6.6.35	630.4.1.1	630-07		Concreto clase D para box coulvert	M3	50.00	514,180.00	25,709,000.00
39	3.6.6.6.26	630.3.1	630-07		Concreto clase C zapatas para pilas y estribos f'c=280 kg/cm2	M3	950.00	527,836.00	501,444,200.00
40	3.6.6.6.46	630.6	630-07		Concreto Clase F e=0.05m	M3	96.00	303,172.00	29,104,512.00
41	3.6.6.7	632P	632-07	632P	Baranda Metálica	MI	600.00	414,246.00	248,547,600.00
42	3.6.6.8.3	640.1	640-07		Acero de refuerzo fy=4200 kg/cm2	KG	1,382,000.00	4,255.00	5,880,410,000.00
43	3.6.7.1.3	700.1.1	700-07		Líneas de demarcación continuas	ML	3,000.00	1,333.00	3,999,000.00
44	3.6.7.1.3	700.1.2	700-07		Líneas de demarcación discontinuas	ML	190.00	1,333.00	253,270.00
					TOTAL VALOR BASICO				17,915,429,810.50
					AJUSTES Y OBRAS COMPLEMENTARIAS(INCLUYE EL PAGA)				675,207,031.00
					IVA				114,403,919.02
					VALOR TOTAL OBRA				18,705,040,760.52
	2.8.11	1P			ESTUDIOS Y DISEÑOS DEL PUENTE Y SUS ACCESOS	GL	1.0	250,000,000.0	250,000,000.00
					IVA ESTUDIOS				40,000,000.00
					VALOR TOTAL ESTUDIOS				290,000,000.00
					TOTAL PRESUPUESTO OBRA				18,995,040,761.00