UNIVERSIDAD PERUANA DE CIENCIAS APLICADAS

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA CIVIL

**ANÁLISIS Y PROPUESTA DE MEJORA DEL MÉTODO DE
EXCAVACIÓN CON PRESENCIA DE AGUA PARA FUNDACIONES
DE PUENTES EN LA COSTA DE LA REGIÓN AREQUIPA**

TESIS

Para optar el título profesional de Ingeniero Civil

AUTORES

Santillana Rivero, Aheleli Aileen (0000-0002-2503-1466)

Silva Trebejo, Letzy Johanny (0000-0002-6870-1503)

ASESOR

Bragagnini Rodríguez, Iván Enrique (0000-0002-6870-1503)

Lima, 17 de noviembre de 2018

*A **Dios**, por la paciencia impartida, por habernos dado salud y actitud para culminar, de manera satisfactoria, el desarrollo de nuestra tesis.*

A nuestros padres y hermanos, por ser nuestro pilar y fortaleza, no sólo en nuestra carrera universitaria sino también en nuestro desarrollo personal, por su apoyo incondicional y participación indirecta en el desarrollo de nuestra investigación.

*A **nuestros amigos**, Sebastián Velarde, Álvaro Díaz, Gianmarco Orrillo,
Rodrigo Saravia, Brigitte Meniz, Oscar Zapana y Patrick Rondinel, por
enseñarnos que el trabajo en equipo te lleva mucho más lejos que el
trabajo individual.*

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a nuestro asesor, el ingeniero Iván Bragagnini, por sus conocimientos compartidos, paciencia en nuestro aprender y la confianza por el planteamiento del tema de tesis.

Brindamos nuestra gratitud a los especialistas en el diseño y/o construcción de puentes, los ingenieros Freddy Duran, Esteban Ortiz, Victor Sánchez, Cesar Fuentes, Cesar Fuentes (hijo), José Lama, Eduardo Mayhure y Giuliano Otárola, ya que sin su aporte en experiencia no hubiera sido factible el buen desarrollo del presente trabajo, ni del manual preliminar del procedimiento constructivo de *caissons* de concreto.

Asimismo, agradecemos a la ingeniera Ángela Mollo, por brindarnos los conocimientos de su experiencia en puentes y por alentarnos a continuar con la investigación, propuesta de mejora y manual preliminar.

También, correspondemos gratitud a los docentes que cultivaron conocimiento durante nuestra carrera profesional, los ingenieros Javier Moreno, Luis Herrera, Ana Biondi, Rocío del Pilar Otoy, Luis Gonzales y a todos los docentes que no fueron mencionados, gracias.

RESUMEN

El método de excavación con presencia de agua para fundaciones de puentes en el Perú, *caisson* de concreto, bajo su procedimiento constructivo convencional *Well foundation* presenta desplome durante su ejecución, siendo un agravante la existencia de agua subterránea, como en el caso de la región Arequipa.

La presente investigación busca mejorar y elaborar un manual preliminar del procedimiento constructivo de *caissons* para la fundación de puentes en la costa de la región Arequipa. Adicionalmente, se propuso el procedimiento constructivo ‘Bajo la superficie’, basado en la construcción de *caissons* de concreto en Colombia, sistema constructivo en el que se excava para luego armar las paredes de *caisson*.

A partir de entrevistas a especialistas, concluimos que el rango aproximado de variación positiva considerada mejora económica es de 16% a 20% con respecto al costo directo de un sistema constructivo convencional.

Finalmente, se concluyó que la propuesta de mejora ‘Bajo la superficie’ tiene una optimización económica de 17.55% respecto del procedimiento constructivo *Well foundation*, y aumenta 0.88% cuando se considera encofrado metálico como reemplazo del encofrado de madera, ascendiendo la mejora económica hasta un promedio de 18.79% según lo evaluado en los puentes Pampa Blanca y Río Tambo. Además, el tiempo de ejecución se optimizó en un 14.29% para el puente Pampa Blanca y 8.33% para el puente Río Tambo lo que demostró que la geometría de los elementos es un factor importante para medir el impacto de la mejora.

Palabras Claves: *Well foundation*; Bajo la superficie; *Caisson*; Desplome; Procedimiento Constructivo.

ABSTRACT

The method of excavation with presence of water for foundation of bridges in Peru, caisson of concrete, under its conventional constructive procedure Well foundation has a collapse during its execution, being an aggravating the existence of groundwater, as in the case of the Arequipa region.

The present investigation seeks to improve and elaborate a preliminary manual of the constructive procedure of caissons for the foundation of bridges in the coast of the Arequipa region. Additionally, the constructive procedure 'Under the surface' was proposed, based on the construction of concrete caissons in Colombia, constructive system in which it is excavated to then build the caisson walls.

From interviews with specialists, we conclude that the approximate range of positive variation considered economic improvement is from 16% to 20% with respect to the direct cost of a conventional construction system.

Finally, it was concluded that the 'Under the surface' improvement proposal has an economic optimization of 17.55% with respect to the Well foundation construction procedure and increases 0.88% when considering metallic formwork as a replacement for the wooden formwork, the economic improvement amounting to average of 18.79% as evaluated in the Pampa Blanca and Río Tambo bridges. In addition, the execution time was optimized by 14.29% for the Pampa Blanca bridge and 8.33% for the Río Tambo bridge, which showed that the geometry of the elements is an important factor in measuring the impact of the improvement.

Keywords: Well foundation; Under the surface; Caisson; Collapse; Constructive Procedure.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
ANTECEDENTES.....	2
CAPITULO 1: MARCO TEÓRICO.....	9
1.1. PROPIEDADES HIDRÁULICAS DE LOS SUELOS	9
1.1.1. <i>Permeabilidad del suelo</i>	9
1.1.2. <i>Humedad del suelo</i>	10
1.1.3. <i>Filtración y redes de flujo</i>	10
1.2. COMPORTAMIENTO HIDROGEOLÓGICO	10
1.2.1. <i>Acuíferos</i>	11
1.3. MÉTODOS DE EXCAVACIÓN CON PRESENCIA DE AGUA.....	12
1.3.1. <i>Ataguías</i>	12
1.3.2. <i>Caissons</i>	14
1.3.3. <i>Cajones fondeados</i>	16
1.4. TÉCNICAS DE CONTROL DE AGUA O SISTEMAS DE BOMBEO.....	17
1.4.1. <i>Bombeo asistido por vacío</i>	17
1.4.2. <i>Bombeo con pozos Profundos</i>	18
1.5. RENDIMIENTO (R)	20
1.6. HERRAMIENTAS DE PRODUCTIVIDAD.....	21
1.6.1. <i>Tren de Actividades</i>	21
1.6.2. <i>Sectorización</i>	21
1.6.3. <i>Circuito fiel</i>	21
1.7. TAMAÑO DE LA MUESTRA ALEATORIA	22
1.8. FÓRMULA POLINÓMICA	22
CAPITULO 2: METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN.....	24
2.1. MATERIAL	24
2.1.1. <i>Población</i>	24
2.1.2. <i>Muestra</i>	24
2.2. MÉTODO	24
2.2.1. <i>Nivel de Investigación</i>	24
2.2.2. <i>Diseño de investigación</i>	24

2.2.3. <i>Variable de estudio y operacionalización</i>	25
2.2.4. <i>Técnicas e Instrumentos de recolección de datos</i>	25
2.2.5. <i>Técnicas de Procesamiento y Análisis de datos</i>	26
CAPITULO 3: IDENTIFICACIÓN DE LA PROBLEMÁTICA DEL MÉTODO DE EXCAVACIÓN CON PRESENCIA DE AGUA EN DIVERSOS PROYECTOS	27
3.1. PUENTE AKASHI KAIKYO.....	27
3.2. PUENTE YURACYAKU	29
3.3. CAISSONS DEL EDIFICIO TORRES DEL PARQUE	30
CAPITULO 4: IDENTIFICACIÓN DE PUENTES CONSTRUIDOS EN LA COSTA DE LA REGIÓN AREQUIPA	32
4.1. PUENTE PAMPA BLANCA.....	32
4.1.1. <i>Aspectos generales</i>	32
4.1.2. <i>Procedimiento constructivo de la excavación para las fundaciones</i>	37
4.2. PUENTE RÍO TAMBO	38
4.2.1. <i>Aspectos generales</i>	38
4.2.2. <i>Procedimiento constructivo del caisson de concreto</i>	39
4.3. PUENTE OCOÑA.....	40
4.3.1. <i>Características de cimentación</i>	40
4.3.2. <i>Procedimiento constructivo de la excavación para las fundaciones</i>	40
4.4. PUENTE CAMANÁ	40
4.4.1. <i>Características de cimentación</i>	41
4.4.2. <i>Procedimiento constructivo de la excavación para las fundaciones</i>	41
4.5. PUENTE SANTA ROSA “EL FISCAL”	41
4.5.1. <i>Características de cimentación</i>	41
4.5.2. <i>Procedimiento constructivo de la excavación para las fundaciones</i>	41
CAPITULO 5: ANÁLISIS DEL PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO PARA CAISSONS DE CONCRETO	42
5.1. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	42
5.2. ENTREVISTA A ESPECIALISTAS	42

5.3. ANÁLISIS DEL PLANEAMIENTO INICIAL DE LOS PUENTES PAMPA BLANCA Y RÍO TAMBO	48
5.3.1. <i>Procedimiento constructivo</i>	48
5.3.2. <i>Puente Pampa Blanca</i>	49
5.4 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO WELL FOUNDATION.....	58
CAPITULO 6:PROPUESTA DE MEJORA DEL PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO PARA CAISSON DE CONCRETO.....	60
6.1. CONDICIONES DE OPTIMIZACIÓN	60
6.1.1. <i>Procedimiento constructivo</i>	60
6.1.2. <i>Materiales</i>	61
6.2. OPINIÓN DE ESPECIALISTAS EN EL DISEÑO Y/O CONSTRUCCIÓN DE PUENTES SOBRE EL PROCEDIMIENTO BAJO LA SUPERFICIE	62
6.3. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO BAJO LA SUPERFICIE	62
CAPITULO 7: RESULTADOS Y REVISIÓN DE LA PROPUESTA DE MEJORA	64
7.1. RESULTADOS DEL PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO BAJO LA SUPERFICIE.....	64
7.1.1. <i>Puente Pampa Blanca</i>	64
7.1.2. <i>Puente Río Tambo</i>	68
7.2. RESULTADOS DEL USO DE RECURSOS TECNOLÓGICOS EN EL PROCEDIMIENTO COSNSTRUCTIVO BAJO LA SUPERFICIE	71
7.2.1. <i>Puente Pampa Blanca</i>	71
7.2.2. <i>Puente Río Tambo</i>	73
7.3. APLICACIÓN DE HERRAMIENTAS DE PRODUCTIVIDAD.....	74
7.3.1. <i>Tren de Actividades</i>	74
7.3.2. <i>Sectorización</i>	75
7.3.3. <i>Circuito Fiel</i>	79
7.4. MANUAL PRELIMINAR DEL PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO PARA CAISSONS DE CONCRETO.....	79
CONCLUSIONES.....	80

RECOMENDACIONES.....	83
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	85
ANEXOS	89

INDICE FIGURAS

Figura 0.1: Evolución del método de excavación con presencia de agua en fundaciones de puentes de Perú.....	3
Figura 0.2: Árbol de problemas del desplome durante el hincado de <i>caisson</i> de concreto.	5
Figura 1.1: Diagrama de Red de Flujo por debajo de una ataguía de tablestacas.	11
Figura 1.2: Tipos de comportamiento hidrogeológico.	12
Figura 1.3: Componentes típicos de un <i>caisson</i> circular o rectangular.	14
Figura 1.4: Excavación de una cimentación profunda con cajón neumático.....	15
Figura 1.5: Esquema del hincado del cajón fondeado utilizado en la cimentación del puente Akashi Kaikyo, Japón.	17
Figura 1.6: Bosquejo de la instalación de un sistema de bombeo asistido por vacío – <i>Wellpoint</i>	18
Figura 1.7: Esquema de perforación a rotación.....	20
Figura 3.1: Instalación flotante del cajón fondeado de la cimentación del puente Akashi Kaikyo.	28
Figura 3.2: Vaciado de <i>caisson</i> de concreto en Colombia – corte transversal.....	31
Figura 4.1: Cronograma de ejecución planificado del Puente Pampa Blanca.	35
Figura 5.1: Años de experiencia.....	44
Figura 5.2: ¿Ha ejecutado <i>caissons</i> de concreto?.....	44
Figura 5.3: ¿Debería optimizarse el procedimiento constructivo?.....	44
Figura 5.4: Clasificación del proceso constructivo.	44
Figura 5.5: ¿Qué proceso constructivo optimizaría?.....	45
Figura 5.6: ¿Qué actividades considera críticas?	45
Figura 5.7: Exceso de flujo de agua.	46
Figura 5.8: Desplome.....	46
Figura 5.9: Presencia de bolonería.	47
Figura 5.10: Parar hincado por exceso de rozamiento.....	47
Figura 5.11: Porcentaje de optimización económica considerada por los ingenieros especialistas en la construcción y/o diseño de puentes.	48
Figura 6.1: Sección transversal del <i>caisson</i> de concreto ejecutado por el procedimiento Bajo la Superficie.	61

Figura 7.1: Tren de actividades para la construcción de <i>caisson</i> de concreto del puente Pampa blanca.	75
Figura 7.2: Sectorización de la excavación de <i>caisson</i> del pilar central del puente Pampa Blanca.	76
Figura 7.3: Sectorización del <i>caisson</i> de concreto del estribo derecho del puente Pampa blanca.....	76
Figura 7.4: Comparación de tiempos del tren de trabajo sectorizado propuesto para la ejecución de la cimentación del Puente Pampa Blanca y un tren de trabajo sin sectorización.	78

INDICE TABLAS

Tabla 1.1: Coeficiente de permeabilidad según el tipo de suelo.	9
Tabla 2.1: Descripción de los componentes de la variable independiente y dependiente de la presente investigación	25
Tabla 3.1: Características de la cimentación en mar del puente Akashi Kaikyo.	28
Tabla 3.2: Características de la cimentación del Yuracyaku (San Martín)	29
Tabla 3.3: Características de la cimentación del Edificio Torres del Parque (Colombia)	31
Tabla 4.1: Características geométricas y de material del estribo izquierdo y pilar central de la fundación del Puente Pampa Blanca	33
Tabla 4.2: Características geométricas y de material del estribo derecho de la fundación del Puente Pampa Blanca.	33
Tabla 4.3: Partidas involucradas en la ejecución de los <i>caissons</i> del puente Pampa Blanca	36
Tabla 4.4: Rendimientos de la mano de obra de las partidas pertenecientes a la excavación de la fundación del Puente Pampa Blanca.....	37
Tabla 4.5: Características de la cimentación del Puente Río Tambo.....	39
Tabla 5.1: Puentes pertenecientes a la red vial nacional construidos con caissons de concreto.	43
Tabla 5.2: Detalle del metrado y precio unitario por partidas del Presupuesto Inicial del puente Pampa blanca.	50
Tabla 5.3: Horas Hombre (hh), por partida, del método de excavación para la cimentación del puente Pampa blanca.....	52
Tabla 5.4: Detalle del presupuesto de liquidación del puente Pampa Blanca.	53
Tabla 5.5: Tiempo de ejecución y metrado de las partidas necesarias para la fundación del puente Pampa Blanca.....	54
Tabla 5.6: Rendimientos de la ejecución del puente Pampa Blanca.	56
Tabla 5.7: Comparación de rendimientos y cantidad total de horas hombre por partida entre la propuesta inicial y la finalización de la ejecución del puente Pampa Blanca.	57
Tabla 5.8: Comparación de los tiempos de ejecución por partida de los <i>caisson</i> del puente Pampa blanca.	58

Tabla 7.1: Costo directo de los <i>caissons</i> de concreto del puente Pampa Blanca mediante el procedimiento constructivo <i>Well foundation</i>	65
Tabla 7.2: Costo directo de los <i>caissons</i> de concreto del puente Pampa Blanca mediante el procedimiento Bajo la superficie.....	66
Tabla 7.3: Resumen de la variación porcentual, económica y de tiempo, del procedimiento Bajo la superficie respecto del procedimiento <i>Well foundation</i>	67
Tabla 7.4: Variación económica final del procedimiento Bajo la superficie, respecto del procedimiento <i>Well foundation</i> en la construcción de los <i>caisson</i> del puente Pampa Blanca.	68
Tabla 7.5: Costo directo de los <i>caisson</i> de concreto del puente Río Tambo mediante el procedimiento constructivo <i>Well foundation</i>	69
Tabla 7.6: Costo directo de los <i>caissons</i> de concreto del puente Río Tambo mediante el procedimiento Bajo la superficie	70
Tabla 7.7: Resumen de la variación porcentual, económica y de tiempo, del procedimiento Bajo la superficie respecto del procedimiento <i>Well foundation</i>	70
Tabla 7.8: Variación económica total del procedimiento Bajo la superficie, respecto del procedimiento <i>Well foundation</i> , en la construcción de <i>caisson</i> del Puente Río Tambo.....	71
Tabla 7.9: Costo directo de los <i>caissons</i> de concreto del puente Pampa blanca considerando encofrado metálico.....	72
Tabla 7.10: Variación de costo del puente Pampa Blanca, entre la propuesta de mejora y el procedimiento <i>Well foundation</i>	73
Tabla 7.11: Costo directo del procedimiento constructivo Bajo la superficie reemplazando el encofrado de madera por encofrado metálico	73
Tabla 7.12: Variación de costo del puente Río Tambo, entre la propuesta de mejora y el procedimiento <i>Well foundation</i>	74
Tabla 7.13: Metrados por sectores en Estribos y Pilar Central de la cimentación del puente Pampa blanca.....	77
Tabla 7.14: Circuito Fiel para la excavación los anillos del Pilar Central del puente Pampa blanca	79

INTRODUCCIÓN

Los puentes interrelacionan, comunican y generan desarrollo socioeconómico en las ciudades conectadas. También, son un componente importante en la infraestructura vial y el elemento que requiere de mayor inversión económica.

Así pues, los puentes se componen por la subestructura (cimentación) y la superestructura (pilar, losa, etc.), y ambos deben tener un correcto cálculo estructural y procedimiento constructivo. Sin embargo, las condiciones geográficas donde se construyen los puentes pueden causar adversidades durante su construcción. Por ejemplo, las propiedades del suelo y la presencia de agua complican la excavación para los cimientos de un puente.

En el Perú, la fundación de puentes en lecho de río contempla problemas debido a la presencia de agua, especialmente en aquellos ríos caudalosos y próximos al mar. En consecuencia, el método de excavación con presencia de agua más utilizado en nuestro país es el de *caisson* de concreto o cajones de cimentación [17] y [33]. Por ello, en la presente investigación “El método de excavación con presencia de agua” será expresado, únicamente, como *caisson* de concreto.

Por otra parte, entre los meses de febrero y marzo del presente año, el Perú fue azotado por el fenómeno del niño costero, el cuál trajo consigo pérdidas humanas y económicas. Así, respecto a las pérdidas económicas en infraestructura vial el Centro de Operaciones de Emergencia Nacional (COEN) comunicó que las regiones de Lima, Arequipa, Huancavelica, Lambayeque y Cajamarca registraron el mayor número de puentes destruidos y afectados. Además, informó que las regiones más perjudicadas fueron Lima con 31 puentes destruidos y 31 puentes afectados y Arequipa con 10 puentes destruidos y 43 puentes afectados [1]. Sin embargo, según el mapa vial del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) el 100% de los puentes destruidos en la región Arequipa tenían cimentación en lecho del río, mientras que los puentes de la región Lima correspondían tanto a fijos con fundación en río y a los del tipo Bailey.

En ese sentido, la presente investigación se centra en el análisis del procedimiento constructivo de *caissons* de concreto y posterior propuesta de mejora del método de excavación con presencia de agua para la fundación de puentes en la costa de la región Arequipa.

ANTECEDENTES

En lo que respecta a la fundación de puentes en el Perú con cimentaciones profundas y presencia de agua, se precisa que a la fecha no se ha documentado investigación alguna que analice y especifique el procedimiento constructivo que se realiza en la excavación para la fundación de puentes. Como lo reclama Ramírez (2000) en relación a los métodos de cimentación.

“La descripción de los métodos de cimentación empleados en la construcción, en general, y en los puentes en particular, no es un tema que habitualmente se trate en la bibliografía de los autores clásicos con el detalle que la trascendencia de su función requiere”. (Ramírez, 2000, p.879)

Así pues, en nuestro país, acerca de la excavación con presencia de agua para la fundación de puentes, se pueden diferenciar cuatro momentos de cambio a través del tiempo. El primer momento se registra a inicios del siglo XVII, con la construcción del puente Trujillo (1610) donde se detalla que para la excavación de los cimientos se colocaba tablestacas hasta llegar a suelo macizo, en dos hileras cerradas y unidas con riostras, rellenándose posteriormente con suelo impermeable [2]. El segundo momento data a mediados del siglo XIX, con la construcción del puente Balta (1869). Así, se registra que a partir de la fecha las excavaciones se ejecutaron con *caisson* de fierro recubiertas con arcilla [3]. El tercer instante se reconoce en el siglo XX, pues la excavación en lecho de río de los puentes construidos con más de veinte (20) años de anterioridad se ejecutó con *caissons* de concreto. Además, a partir de la fecha en mención, el método de excavación con presencia de agua forma parte de la fundación de puentes [4]. En el cuarto momento, siglo XXI en adelante, se percibe que sólo se proyectan los *caisson* abiertos ya que los del tipo neumático ocasionaban problemas de salud con los trabajadores [5].

Figura 0.1: Evolución del método de excavación con presencia de agua en fundaciones de puentes de Perú.

Fuente: propia.

Por otra parte, investigaciones extranjeras presentan, de manera general, el procedimiento constructivo realizado en la excavación de sus fundaciones. Por ejemplo, en Cádiz – España (2016) investigaron y publicaron un artículo científico sobre la construcción del Puente de la Constitución 1812, donde se describe que sus cimentaciones se ejecutaron con *caissons* de concreto, contruidos en el exterior e hincados con martinete para erradicar los problemas por desplazamiento horizontal [6]. También, en Japón (1994) recopilaron información sobre el cajón fondeado utilizado en la cimentación del Puente Akashi Kaikyo; dicho cajón fue colocado sobre el mar con una abertura para que el agua ingresara haciendo posible un hundimiento equilibrado, luego drenaron el agua del interior y colocaron concreto bajo agua [7]. Ambos proyectos hicieron ajustes en su procedimiento constructivo considerando las adversidades para hacer posible su ejecución y, también, para que el costo directo de sus fundaciones no exceda a lo presupuestado; como lo indica Furuya Noboaki es necesario evaluar una modificación en el procedimiento constructivo según las condiciones del área en el que se construirá ya que eso mejora los conocimientos en la ingeniería.

Del mismo modo, en el año 2005 la Organización Panamericana de la Salud (OPS) en el Perú, desarrolló un manual de Especificaciones técnicas para la construcción de captaciones especiales donde señalan que la construcción de un *caisson* de concreto se debe ejecutar por anillos y sobre una superficie seca, para luego ser hundida mediante excavación manual [8]. Sin embargo, dicho procedimiento no está centrado en la fundación de puentes sino en la construcción de pozos de captación. Por añadidura, en Arequipa en el año 2000 se inició la ejecución del proyecto “Construcción Puente Pampa Blanca y accesos”, dicho proyecto consideró en el diseño de sus fundaciones *caissons* de concreto, tanto para sus estribos como pilar. En una entrevista con el ingeniero residente,

Eduardo Mayhuire, indicó que el problema con mayor incidencia presentado en ese proyecto fue el desplome del elemento a partir de la cota -7.00m, debido al afloramiento excesivo de agua subterránea. Además, según Mayhuire, el vaciado de la tapa de *caisson* también se vio afectada por la abundante presencia de agua, la cual pudieron controlar con un vaciado sectorizado y no uniforme [9]. Esa solución fue propuesta por los trabajadores que tenían la experiencia de anteriores obras donde habían participado; lo ocurrido, expuso el desconocimiento por parte del grupo responsable del proyecto evidenciando así la falta de un sistema de información y difusión con respecto a la cimentación de puentes. También, señaló que el proyecto no sólo se ejecutó con el presupuesto dispuesto por el Ministerio de transportes y comunicaciones (MTC), sino que también recibieron ayuda de la comunidad de Islay, provincia de Arequipa, quienes aportaron mano de obra gratuita, la cual aumentó el costo directo del proyecto sin ser cuantificado.

En este sentido, se evidencia que el estudio del procedimiento constructivo para la fundación de puentes con *caisson* de concreto no es estudiado en la magnitud que requiere y, por el contrario, se tiene una gran cantidad de información almacenada en los ingenieros especialista en su construcción y/o diseño.

Realidad Problemática

La construcción de un puente nace de su cimentación, la que en muchos casos es una cimentación profunda debido a las considerables luces y su lejanía con un estrato resistente. En el caso específico de la cimentación profunda mediante *caisson* de concreto, el método de excavación desarrollado en Perú es el denominado *Well Foundation*, conocido por ejecutar la estructura del *caisson* sobre la superficie para luego proceder con el hincado del mismo.

En la construcción de *caissons* se identifica que, durante el hincado, distintos factores como presentar una fuerza de fricción mayor al peso propio del *caisson* [10], o no tener uniformidad en la excavación [9], desencadena el desplome de los muros de este; así como también, no tomar en cuenta la fuerza actuante generada por el empuje horizontal del suelo y la presencia de agua subterránea, en conjunto [11], generan desplome durante el hincado.

Las consecuencias que conlleva el desplome del *caisson* son los retrabajos realizados para controlar y reactivar el hincado de forma rápida. La paralización del hincado también es

una consecuencia que de complicarse resultaría en la prolongación del plazo de ejecución. Sin embargo, el vuelco del *caisson* se convierte en la consecuencia más crítica debido a que trae consigo pérdidas materiales y económicas y hasta accidentes leves o graves. Si bien no se tiene documentación de tal grave consecuencia se conoce el caso del puente Bolognesi que pese a tener una medida de control de verticalidad, ante la falta de consideración del agua subterránea en el diseño del *caisson*, en el proceso de hincado el elemento giró cerca a 45° respecto a su eje vertical, presentando así un latente riesgo de vuelco [12].

Figura 0.2: Árbol de problemas del desplome durante el hincado de *caisson* de concreto.

Fuente: Propia

En contexto con Arequipa, se presenta el caso del Puente Pampa Blanca. El proyecto en referencia presentó problemas durante la ejecución de su cimentación con *caissons* de concreto, específicamente, en el hincado, puesto que se tuvo desplome de las paredes en repetidas ocasiones, de esa forma los retrasos fueron acumulativos [9] y generó un impacto negativo tanto en el término de la partida, como en el costo de esta.

Ante lo anteriormente descrito, se opta por el análisis y mejora del procedimiento constructivo *caisson* de concreto en la medida de contrarrestar el problema en discusión mediante la eliminación del proceso de hincado, a través de una opción de mejora del procedimiento que se detallará en los capítulos siguientes.

Formulación del Problema

Después de identificar el problema de la investigación, se formula la siguiente pregunta: ¿Cómo mejorar el procedimiento constructivo de los *caissons* de concreto para la fundación de puentes en la costa de la región Arequipa?

Hipótesis

Como respuesta al problema formulado, en el ítem anterior, se propone que para mejorar el procedimiento constructivo del método de excavación con presencia de agua para la fundación de puentes en la costa de la región Arequipa, en adelante *caissons* de concreto, se realizará una excavación manual y progresiva del mismo. Es decir, se excavará entre 1.0 y 1.5 m desde la cota cero (0) hasta la cota de cimentación. Para ello, se deberá tener en cuenta que a partir del segundo anillo se hará uso de un Winche con baldes para extraer a la superficie el suelo excavado y, también, electrobombas sumergibles para controlar con mayor precisión el flujo del nivel freático (horizontal y vertical). Luego, se habilitará y colocará acero dejando las mechas correspondientes para los traslapes inferiores de los anillos del *caisson* y, seguidamente, juntas *wáter stop* para garantizar una mejor estanqueidad. Posteriormente, se empleará encofrado metálico con apuntalamiento interno, con la finalidad de optimizar su instalación y asegurar al encofrado de la presión horizontal ocasionada por el concreto. Cabe resaltar que los anillos sucesivos al primero deberán ser encofrados con una inclinación respecto al borde del anillo anterior para que así, el concreto pueda ser vertido y vibrado. Al respecto, debido a la restricción para el vaciado de las paredes de núcleo se hará uso de un balde cónico de descarga de concreto. Por añadidura, se propone desencofrar después de las 24 horas de vaciado puesto que los elementos verticales no requieren un tiempo prolongado con el encofrado. Asimismo, se propone construir cada uno de los anillos del núcleo con una inclinación mínima de 5° y el último anillo con una inclinación menor al ángulo de fricción del suelo para que no se tenga que excavar de manera cónica la base de los *caissons* de concreto, pero siempre tomando en cuenta lo determinado por el diseño estructural.

Objetivo General

Mejorar y elaborar un manual preliminar del procedimiento constructivo de *caissons* de concreto para la fundación de puentes en la costa de la región Arequipa.

Objetivos Específicos

- » Entrevistar a 9 especialistas en la construcción y/o diseño de *caissons* de concreto ejecutados en la fundación de puentes de Perú.
- » Determinar las complicaciones constructivas en la ejecución de *caisson* de concreto bajo el procedimiento *Well foundation*.
- » Identificar la actividad crítica del procedimiento constructivo *Well foundation*.
- » Definir las ventajas y desventajas entre el procedimiento convencional *Well foundation* y la propuesta de mejora, Bajo la superficie.
- » Calcular la variación económica y de tiempo entre los procedimientos *Well foundation* y Bajo la superficie de los puentes Pampa Blanca y Río Tambo.
- » Aplicar herramientas de productividad; tales como tren de actividades, sectorización y circuito fiel, en el procedimiento Bajo la superficie para la construcción de *caissons* de concreto del puente Pampa Blanca.

Descripción del contenido

La presente investigación se desglosa en los siguientes capítulos.

- » Capítulo I: Se estudia los principales conceptos teóricos, necesarios para el análisis y propuesta de mejora del procedimiento constructivo de *caissons* de concreto, los cuales están asociados a las propiedades hidráulicas de los suelos, el comportamiento hidrogeológico para la fundación de un puente, la descripción de los métodos de excavación con presencia de agua, sistemas de bombeo, entre otros.
- » Capítulo II: Se establece la metodología de investigación a partir de la cual se pudo delimitar el tema en estudio, así como también se plantean las técnicas para la recolección, procesamiento y análisis de datos.
- » Capítulo III: Recolección de información sobre proyectos de puentes ejecutados en el exterior del país, donde se determine el proceso constructivo realizado en la excavación de sus fundaciones.
- » Capítulo IV: Se recopila información sobre los proyectos de puentes construidos en

la costa de la región Arequipa, para así sustraer las prácticas realizadas en la excavación con presencia de agua.

- » Capítulo V: Entrevista a especialistas en la construcción de *caissons* de concreto armado. Revisión de la propuesta inicial de ejecución del puente Pampa Blanca y su finalización. Además, el reconocimiento del procedimiento constructivo del puente Río Tambo y el respectivo análisis comparativo.
- » Capítulo VI: Se detalla la propuesta de mejora del procedimiento constructivo convencional de *caissons* de concreto, para la fundación de puentes en la costa de la región Arequipa.
- » Capítulo VII: Se muestra los resultados de la propuesta de mejora en base a los puentes Pampa Blanca y Río Tambo y, además, se propone un manual preliminar del procedimiento constructivo de los *caissons* de concreto que incluya la propuesta de mejora.

CAPITULO 1 : MARCO TEÓRICO

1.1. PROPIEDADES HIDRÁULICAS DE LOS SUELOS

El interés por el conocimiento de las propiedades hidráulicas del suelo se basa en el contacto directo del suelo con el agua, a través del nivel freático, en excavaciones profundas.

1.1.1. Permeabilidad del suelo

La permeabilidad de los suelos se define como la condición de cuánto se permite el paso del agua, y se dice que un material es permeable cuando contiene huecos o intersticios continuos en su interior.

El coeficiente de permeabilidad se incrementa en relación a cuánto aumenta el tamaño de los intersticios (huecos), que a su vez crece al incrementar de tamaño los granos y, además, las formas de los intersticios tienen una marcada influencia en la permeabilidad. En la Tabla 1.1 se muestran los principales coeficientes de permeabilidad para los distintos tipos de suelos y la recomendación del método a utilizar para su determinación.

Tabla 1.1: Coeficiente de permeabilidad según el tipo de suelo.

k (cm/sec)	Drenaje	Tipo de suelo					Determinación de k	
10^2 10^1	Bueno Bueno	Gravas limpias Gravas limpias	Pruebas de bombeo. Realizables si se hacen correctamente.	El permeámetro de carga constante es seguro	Permeámetro de carga variable	Seguro	Cálculo empleando el tamaño del grano	
1.0 10^{-1} 10^{-2} 10^{-3} 10^{-4}	Bueno Bueno Bueno Bueno Bueno	Arenas limpias Arenas limpias y mezclas de grava						
10^{-5} 10^{-6}	Malo Malo	Arenas muy finas Limos orgánicos e inorgánicos, mezclas de arena limo y arcilla, morrena glacial, depósitos de arcilla estratificada.						
10^{-7} 10^{-8} 10^{-9}	Prácticamente impermeable	Suelos impermeables, por ejemplo, arcillas homogéneas abajo de la zona meteorizada.				Relativamente seguro	Cálculo empleando los datos de consolidación (seguro)	

Fuente: Peck R., Hanson W. y Thornburn T. (1998).

1.1.2. Humedad del suelo

1.1.2.1. Nivel Freático

El nivel de agua freática no es horizontal, sino una superficie suavemente ondulada. Se conforma por el agua que proviene de la lluvia, de la fusión de la nieve, o de fuentes artificiales como el riego. Además, circula continuamente a través del suelo, trasladándose de las elevaciones mayores a las menores, por efecto de la gravedad.

1.1.3. Filtración y redes de flujo

Las trayectorias del flujo de agua, a través de los suelos, y las correspondientes presiones de poro son extremadamente complejas, debido a la forma errática en la que varía la permeabilidad, de punto a punto y en diferentes direcciones. Por lo tanto, los análisis exactos de problemas tan comunes, como el efecto de un sistema de desagüe o el flujo bajo una ataguía colocada en la excavación de la pila de un puente, rara vez son posibles. Por ejemplo, en la Figura 1.1 se considera el flujo de agua a través de un material permeable en el que se ha hincado una ataguía y se asume que la permeabilidad del suelo es la misma en todos los puntos e igual en todas las direcciones. Así, el agua que entra al suelo aguas arriba del tablestacado, se mueve hacia la superficie del terreno aguas abajo siguiendo trayectorias curvas regulares como AB, que se conocen con el nombre de líneas de flujo. La circulación es producida por la carga hidráulica h , que impulsa el agua de A hacia B. Y al moverse una partícula de agua de A hacia B produce un arrastre por fricción en las partículas del suelo lo que a su vez genera un aumento en la viscosidad del fluido y, en consecuencia, la disminución continua de la carga hidráulica de aguas arriba a aguas abajo, a lo largo de cada línea de flujo. Finalmente, el nivel piezométrico en un punto C tiene un valor intermedio entre los de A y B. Entre los extremos de cualquier otra línea de flujo, como A'B', la carga hidráulica es también h y existe un punto C', donde el nivel piezométrico es el mismo que en C [13].

1.2. COMPORTAMIENTO HIDROGEOLÓGICO

El suelo actúa en función a su capacidad o propiedades para transportar y almacenar el agua subterránea, es decir, un determinado suelo con presencia de agua actuará según su grado de permeabilidad, porosidad, entre otras propiedades. A continuación, se describe dos tipos de comportamiento del medio frente a la existencia de agua subterránea.

Figura 1.1: Diagrama de Red de Flujo por debajo de una ataguía de tablestacas.

Fuente: Peck R., Hanson W. y Thornburn T. (1998).

1.2.1. Acuíferos

Es la formación geológica que almacena gran cantidad de agua y que consiente la circulación a través de ella. Generalmente se efectúa en suelos permeables y porosos, tales como, gravas, arenas y granito. Pueden ser de dos tipos, libre o confinado.

Asimismo, los acuíferos se forman debido a la filtración del agua de lluvia. Así, el agua absorbida forma varias capas subterráneas hasta llegar a una capa confinada, roca, que no permite su paso con tanta facilidad.

1.2.1.1. Acuífero libre

Son aquellos que tienen como límites, un estrato impermeable y la superficie freática. Es preciso indicar que la superficie freática se encuentra a presión atmosférica, es por ello que cuando se extrae agua este descenderá [14].

El margen superior derecho de la figura 1.2 muestra un acuífero libre y la formación de una laguna debido a una fisura topográfica generada por la superficie freática.

1.2.1.2. Acuífero confinado o cautivo

Son aquellos que tienen como límites, estratos impermeables o confinantes. Asimismo, el agua en este tipo de acuífero tiene mayor presión que la atmosférica, debido a la pérdida de velocidad con la que llega el agua al estrato confinado. En consecuencia, ante una perforación el agua se elevará con fuerza hasta sobrepasar el techo del acuífero cautivo [15]. La figura 1.2 muestra un acuífero confinado entre una capa de suelo impermeable y un Acuitardo.

Figura 1.2: Tipos de comportamiento hidrogeológico.

Fuente: Rebollo L.

1.3. MÉTODOS DE EXCAVACIÓN CON PRESENCIA DE AGUA

La cota de cimentación de los proyectos de puentes tiene como principal riesgo, ser ubicada por debajo de la cota del nivel freático. En consecuencia, el agua debe ser controlada para que se pueda continuar con el proceso de excavación y posterior pilotaje. A continuación, la descripción de los métodos.

1.3.1. Ataguías

Son elementos que se usan como protección a los flujos de agua subterránea, para posteriormente extraer el material a excavar en seco. Este método se ejecuta cuando se puede reducir el agua que surge del interior de un recinto excavado [16] y en específico, en terrenos de baja permeabilidad. Sin embargo, de ser implementado en un terreno muy permeable se debe realizar un Dragado previo y utilizar ataguías de concreto. Entonces, las ataguías deben ser impermeables a la filtración del agua subterránea y resistente al empuje del mismo.

Por añadidura, la altura de las ataguías se ve influenciada por el nivel de las aguas subterráneas durante la construcción del cimientó y por el tiempo total necesario para la ejecución de la fundación.

1.3.1.1. Método constructivo

El proceso de instalación de las ataguías se realiza mediante 4 etapas. En la primera etapa se limpia el área a excavar, de raíces o partes de árboles existentes, y luego se lleva a cabo el trazo y nivelación del terreno. En la segunda etapa se realiza la instalación de una guía en el terreno natural para que mantenga fija las ataguías a hincar, son ancladas a 2.5m de profundidad. En la tercera etapa se ejecuta el hincado de las ataguías, se subdivide en 2 fases. Primero, la fase del enfilado de paneles consiste en la unión de cuatro ataguías que sirven de refuerzo a las guías antes hincadas. Segundo, la fase del hincado de paneles consiste en la incorporación de todas las ataguías que se planificaron hincar. Por último, en la cuarta etapa se extraen las ataguías. Dicha extracción dependerá del buen hincado de las mismas.

Asimismo, el hincado de las ataguías se ejecuta con un equipo mecánico que contiene martinetes de caída libre o de vapor.

1.3.1.2. Tipos de ataguías

a) Madera

Son de uso frecuente y para suelos de baja permeabilidad. Se utilizan en forma de tablones o pilotes. Los tablones, deben estar superpuestos entre sí para impedir el paso del agua horizontal. En proyectos específicos pueden ser de machihembrado en forma de cuña, para longitudes y empujes no muy fuertes.

b) Metal o fierro

Las ataguías de metal se implementan en todo tipo de suelo, con permeabilidad media, y se utilizan en forma de perfiles laminados con viguetas horizontales. Respecto a su instalación, se introduce el perfil laminado posterior a la colocación de un conjunto de viguetas ubicadas en las paredes laterales de la excavación.

c) Concreto

Se utilizan en suelos muy permeables y en conjunto de un Dragado en el fondo de la excavación. También, se construyen ataguías de fondo, es decir, solera de concreto

sumergido, con el fin de evitar la filtración del agua subterránea por la base de la excavación.

1.3.2. Caissons

También es conocido como cajones de cimentación o cajones sin fondo. Son utilizados para el agotamiento del agua de río cuando es inconveniente o imposible construir un desvío parcial o total, para luego ejecutar las cimentaciones de un puente u obras hidráulicas. Asimismo, este tipo de cimentación tiene geometría circular o rectangular, pueden ser de metal o concreto y, además, pueden formar parte de la cimentación o ser extraídos. Se componen por el tapón, el borde cortante o brocal, el núcleo y la tapa. En la figura 1.3 se puede visualizar las partes que componen un *caisson*.

Por añadidura, el método de *caissons* se complementará con un sistema de agotamiento de agua para que ayude a reducir el nivel freático o el nivel constante de un río y así se pueda excavar en seco [16].

Figura 1.3: Componentes típicos de un *caisson* circular o rectangular.

Fuente: Bragagnini, I (2017).

1.3.2.1. Tipos

Se clasifican en dos tipos, abiertos y neumáticos. Los *caissons* abiertos se construyen en la superficie, por anillos, y se excavan manualmente en la parte inferior para que se

hunda por efecto de su propio peso siendo utilizados para profundidades menores a 20.0m. Por su parte, los *caissons* neumáticos se usan para grandes profundidades y para suelos que tienen corrientes de agua en abundancia. El procedimiento constructivo es semejante a los *caissons* abiertos con la diferencia que se requiere de una cámara de trabajo y una chimenea hermética [17]. La figura 1.4 describe gráficamente la construcción de los *caissons* neumáticos.

1.3.2.2. Método constructivo

Debido a los diferentes materiales que se utilizan en la construcción de caissons, los procedimientos constructivos tendrán algunas variaciones. En ese sentido, un caisson metálico será hincado con un martinete hasta llegar a la cota de cimentación, mientras que uno de concreto será construido en seco y, posteriormente hincado.

Figura 1.4: Excavación de una cimentación profunda con cajón neumático.

Fuente: Blog de la Universidad Politécnica de Valencia¹.

¹ <https://victoryepes.blogs.upv.es/2016/09/09/cimentacion-mediante-cajones-de-aire-comprimido/>

a) *Well foundation*

Se basa en la construcción, de los bordes de *caisson*, en la superficie y sobre una plataforma que permite la estabilidad de la obra falsa. Posteriormente, se excava manualmente en el interior para que la estructura se hincque por efecto de su propio peso [18]. Los *caisson* se construyen por anillos hasta llegar a la cota de cimentación según los planos estructurales y, después de culminado el hincado del borde del elemento, éste se rellena en su interior con tierra compactada o con concreto de baja resistencia.

1.3.3. Cajones fondeados

También conocido como cajón descendente o cajón flotante. Este método tiene características similares al método de cajones indios, con la diferencia que se utilizan cuando la capacidad portante del suelo donde se cimentará no es apta para soportar las cargas del puente. Dicha característica, hace posible la utilización de este método en cualquier tipo de suelo y bajo condiciones de proyecto crítico.

Asimismo, el material utilizado para el montaje de estos elementos se compone por aleaciones de metal capaces de resistir a la corrosión. Según los requerimientos del proyecto, los cajones flotantes se construyen in situ o se compran prefabricados, siempre teniendo en cuenta que los cajones fondeados que no se montan en obra son aquellos que se ubican en el lecho de un río o en el mar y, además, que se necesitará varias grúas y sistemas GPS que controlen la verticalidad del elemento y así, se logre un correcto anclaje.

1.3.3.1. Método Constructivo

La construcción de los cajones descendentes se realiza mediante instalaciones flotantes o terrestres, aunque generalmente son ejecutadas en agua.

De esta manera, el procedimiento de construcción de las instalaciones flotantes radica en colocar concreto a la solera del cajón y, a continuación, dejar caer el fuste del mismo. Seguidamente, se adhiere concreto al interior para que se sumerja en el agua, dicho vaciado se realiza de manera progresiva. Por ejemplo, para la cimentación de las dos torres del puente Akashi Kaikyo (Japón) utilizaron bombas de agua para hundir la estructura mediante la presión hidrostática del agua de mar. Así, la figura 1.5 esquematiza el procedimiento de hincado explicado con anterioridad. Además, se requieren

instalaciones auxiliares que contribuirán con el hincado del cajón, tales como el Muelle o línea de atraque, la Grúa torre y los puntos de amarre para su transporte y fondeo [19].

Figura 1.5: Esquema del hincado del cajón fondeado utilizado en la cimentación del puente Akashi Kaikyo, Japón.

Fuente: History-Mega estructuras (2014).

1.4. TÉCNICAS DE CONTROL DE AGUA O SISTEMAS DE BOMBEO

Los sistemas de bombeo son de gran importancia para la depresión del nivel freático presente en las excavaciones profundas. Asimismo, para determinar la técnica de control de agua a utilizar se debe analizar el tipo de suelo, la permeabilidad, porosidad y el comportamiento hidrogeológico del mismo y, además, se tendrá en cuenta el costo requerido por cada sistema. Los sistemas a estudiar se presentan a continuación.

1.4.1. Bombeo asistido por vacío

También conocido como sistema de bombeo Wellpoint. Esta técnica se conforma por tubos filtrantes hincados en el suelo, los mismos que son separados entre 1 y 1.5m de forma paralela a la excavación planificada. Estos filtros son unidos a un tubo colector, con mangueras de presión, que a su vez se une a la aspiración de una bomba de vacío, tal y como se muestra en la figura 1.6.

Figura 1.6: Bosquejo de la instalación de un sistema de bombeo asistido por vacío –
Wellpoint.

Fuente: Página web de empresa de drenajes MCP.

1.4.1.1. Eficiencia del método

El sistema de control de descenso de agua subterránea tiene su mayor eficiencia en los suelos granulares saturados de moderada permeabilidad, densidad media a baja y comportamiento no plástico, tales como arenas de grano medio e incluso arenas limosas, siempre y cuando el descenso requerido no sea superior a los 4 metros y no haya obstrucciones verticales del suelo que limiten o modifiquen el flujo horizontal [20].

1.4.1.2. Equipos y herramientas

Los equipos a utilizar en un bombeo asistido por vacío son tubo filtrante, manguera de presión, tubo colector, alargadores y accesorios (tapones, tubos bifurcados, uniones, etc), bomba de vacío y filtros Wellpoint.

1.4.2. Bombeo con pozos Profundos

El sistema de bombeo con pozos profundos consiste en la interacción de un conjunto de pozos de bombeo, que utilizan bombas para el agotamiento de agua subterránea. Esta técnica, se utiliza a diferentes profundidades y caudales.

Por añadidura, la eficiencia del sistema no se ve afectado por el tipo de suelo. Por el contrario, la implementación del mismo se efectúa en suelos granulares sedimentarios, roca y en suelos densos cohesivos. Asimismo, la parte más compleja en la

implementación de este sistema de descenso de agua subterránea es la construcción del pozo profundo.

1.4.2.1. Profundidad de bombeo

La profundidad total de bombeo depende de dos factores, la cota del nivel freático en la zona de estudio y las características del manto acuífero donde se quiera agotar el agua subterránea.

Para obtener las características del acuífero se debe realizar aforos y/o pruebas de sondeo que determinen el tipo de suelo que limita el mismo, es decir, se debe comprobar la existencia de suelo confinante, para que no se exceda la profundidad de perforación y no se des controle la salida de agua.

1.4.2.2. Equipo de bombeo

En el sistema con pozos profundos se utilizan bombas de tipo turbina o sumergible. La elección, depende de la capacidad para alcanzar diversidad en sus velocidades. Así, la bomba tipo turbina presenta entre 900 R.P.M y 2000 R.P.M², y la bomba tipo sumergible ostenta entre 2800 R.P.M y 3500 R.P.M [21]. En general, los proyectos que usan el sistema con pozos profundos como control de descenso de agua subterránea, utilizan bombas tipo sumergible.

1.4.2.3. Excavación del pozo profundo

La excavación de un pozo se realiza mediante una técnica de perforación y, de ser necesario, se hace uso de estructuras verticales de contención de suelos, tales como, muros pantalla, tablestacas, barreras impermeables al flujo horizontal, entre otros.

Son cuatro las técnicas de perforación más utilizadas. Primero, la perforación por inyección consiste en el hincado de un filtro que en su interior contiene agua a presión y que es suspendida desde el gancho de una grúa. Segundo, la perforación con balde o cubo con barrena se basa en la excavación que se realiza con el varillaje de una máquina perforadora. Tercero, la perforación a rotación se fundamenta en utilizar un fluido de perforación (lodos o geles), que será bombeado desde el interior de una broca, denominada Trícono o Trepano perforador. Así, la figura 1.7 esquematiza la perforación a rotación y muestra el Trepano perforador de la máquina para excavar. Cuarto, la

² Revoluciones por minuto (R.P.M)

perforación dúplex o dual se basa en el avance paralelo, durante la perforación, de las tuberías de varillaje y de revestimiento [21] evitando así el deslizamiento del suelo.

Figura 1.7: Esquema de perforación a rotación.

Fuente: Blog de la Universidad Politécnica de Valencia³.

1.5. RENDIMIENTO (R)

Es la cantidad de recursos utilizados (hh, hm) para realizar una unidad de producción (m, m², m³) [22]. Así, el rendimiento se expresa en la ecuación 1.

$$R = \frac{O \times t}{M} \quad \text{Ec. 1}$$

Dónde:

- R = rendimiento
- O = N° de obreros
- t = tiempo (jornada)
- M = avance diario (metrado)

Asimismo, se utiliza durante dos de las etapas de un proyecto. En la planificación, para determinar el número de obreros que se requerirán en un proyecto; y durante la construcción, para evaluar la eficiencia de los obreros y sobre cómo reducir los costos por mano de obra. En ese sentido, se evalúa las horas hombre (hh) según la ecuación 2.

$$hh = R \times M \quad \text{Ec. 2}$$

Dónde:

- hh = horas hombre
- R = rendimiento
- M = metrado

³ <https://victoryepes.blogs.upv.es/tag/perforacion-a-rotacion/>

1.6. HERRAMIENTAS DE PRODUCTIVIDAD

Son diversas las herramientas que se utilizan para mejorar la productividad de un proyecto, sin embargo, sólo se evaluarán las siguientes:

1.6.1. Tren de Actividades

Es el sistema que equilibra la producción de manera constante, también llamado programación rítmica o lineal ya que se programan actividades secuenciales y cada una de ella se considera como una estación de trabajo. Asimismo, con el tren de actividades se realiza el balance de las cuadrillas de trabajo para que todas las actividades culminen un sector en el mismo periodo de tiempo, es decir, se busca que todas las estaciones estén balanceadas en capacidad y demanda [23].

1.6.2. Sectorización

Sistema de trabajo que divide, en áreas iguales o similares, un determinado proyecto y por ende cada sector comprenderá una fracción pequeña de la tarea total. Al sectorizar se debe cuidar que la cantidad de tarea por sector sea ejecutada en un día de trabajo.

Para sectorizar son cuatro (04) los pasos a seguir. Primero, se debe realizar el metrado de los elementos verticales y luego, dividirlos en la cantidad de sectores que se desee. Segundo, se busca la mayor similitud entre los metrados de cada sector. Tercero, una vez balanceado el metrado de los elementos verticales, se evalúa la similitud del metrado de encofrado horizontal dentro de cada sector. Cuarto, se elige el área de vaciado horizontal de forma que se busque la mayor equidad entre los sectores del proyecto [24].

Asimismo, para realizar una sectorización se debe tener en cuenta algunos aspectos constructivos, tales como que las vigas no se encofran parcialmente, las losas aligeradas se pueden encofrar por partes considerando que el corte se da en el sentido de las viguetas y que el vaciado de las vigas si puede ser fraccionada a los tercios de longitud.

1.6.3. Circuito fiel

Es un proceso que acepta la secuencia propuesta en el tren de actividades mediante un análisis del recurso humano, necesario para la culminación de los trabajos, en un tiempo establecido. También, tiene como finalidad establecer la mano de obra necesaria para ejecutar una actividad y, es un importante indicador para que las empresas den incentivos económicos a sus colaboradores.

El análisis mediante circuito fiel se realiza en una tabla que contiene las HH diarias y acumuladas, los metrados diarios y acumulados, los rendimientos diarios y acumulados; y el rendimiento presupuestado [25].

1.7. TAMAÑO DE LA MUESTRA ALEATORIA

El cálculo del tamaño de la muestra que se desea seleccionar, para una determinada investigación, debe estar alineado al planteamiento del problema, la población, los objetivos y el propósito de la investigación.

Entonces, la muestra aleatoria dependerá de las variables estadísticas y de aquellas que no lo son. Así, se precisa que son cuatro (04) las variables a definir. Primero, el tamaño de la población es la cantidad, bien definida, de personas u objetos con características similares. Existen dos tipos: población teórica y población accesible. Segundo, el Margen de error o intervalo de confianza es la cantidad de error del muestreo circunstancial. Tercero, el Nivel de confianza es el valor porcentual que se utiliza para determinar una probabilidad alta. Cuarto, La desviación estándar es el valor numérico que indica la dispersión de la población. En ese sentido, la ecuación 3 establece cómo calcular el tamaño de la muestra aleatoria [26].

$$n = \frac{N \times Z^2 \times p \times q}{d^2 \times (N - 1) + Z^2 \times p \times q} \quad \text{Ec. 3}$$

Dónde: N = Tamaño de la población

Z = Nivel de confianza

p = Probabilidad de éxito

q = Probabilidad de fracaso

d = Margen de error

1.8. FÓRMULA POLINÓMICA

La fórmula polinómica de reajuste es utilizada para la actualización de los presupuestos en base a los índices unificados de precio al consumidor, tiene como fin equiparar el presupuesto base de un periodo “X” anterior a un tiempo “Y” de una obra civil, considerando las fluctuaciones en los precios de mano de obra, maquinaria, materiales, equipos, entre otros recursos.

El Artículo 2° del Decreto Supremo N°011-79-VC [27] detalla la forma general básica de la fórmula polinómica:

$$K = a \frac{Jr}{Jo} + b \frac{Mr}{Mo} + c \frac{Er}{Eo} + d \frac{Vr}{Vo} + e \frac{GUr}{GUo} \quad Ec. 4$$

Dónde: K: coeficiente de reajuste de valorizaciones de obra.

a, b, c, d, e: Coeficientes de incidencia en el costo de la obra, de los elementos mano de obra, materiales, equipo de construcción, varios, gastos generales y utilidad.

Jo, Mo, Eo, Vo, GUo: Índices de precio de los recursos a la fecha del Presupuesto Base, los cuales permanecen invariables durante la ejecución de la obra.

Jr, Mr, Er, Vr, GUr: Índices de precio de los mismos elementos, a la fecha del reajuste.

Cada coeficiente de Incidencia podrá corresponder a un elemento o grupo de elementos representativos. Los coeficientes de incidencia varían de acuerdo con el tipo de obra. La suma de todos los coeficientes de incidencia (a+b+c+d+e) siempre será igual a la unidad (1).

El Artículo 3° del D.S. N°011-79-VC indica que los monomios mostrados en la fórmula descrita líneas arriba pueden subdividirse en 2 a más, en la medida que no se exceda un máximo de 8 monomios [27]. Con la finalidad de obtener una mayor aproximación en el reajuste. Adicional a ello el coeficiente de incidencia de cada monomio no deberá ser inferior a 5%.

CAPITULO 2 : METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

2.1. MATERIAL

2.1.1. Población

La población para quienes serán válidos los enunciados concluidos corresponde a todos aquellos proyectos de puentes que se deseen ejecutar en la costa de la Región Arequipa. Estos puentes deberán contemplar en su estudio definitivo la utilización de cimentación profunda mediante *caissons* de concreto, luces mayores a los 100 m de longitud, suelos cohesivos y de mediana - baja permeabilidad.

2.1.2. Muestra

La muestra elegida la conforman dos puentes, ubicados en la costa de la Región Arequipa, específicamente en las provincias de Camaná e Islay. Los puentes son Pampa Blanca y Río Tambo, los cuales presentan características semejantes; tales como, el tamaño de sus luces, el perfil estratigráfico, el método de excavación con presencia de agua, *caissons* de concreto, y el procedimiento constructivo de sus fundaciones.

2.2. MÉTODO

2.2.1. Nivel de Investigación

El grado de profundidad con el que se realiza la investigación corresponde a un nivel de indagación exploratoria y descriptiva, debido a que el tema de investigación es poco estudiado y difundido en la escena nacional y porque, además, se busca establecer la estructura del procedimiento constructivo para *caissons* de concreto.

2.2.2. Diseño de investigación

La estrategia adoptada para realizar el análisis y posterior propuesta de mejora es de manera documental, puesto que el estudio se basa en el análisis de datos provenientes de

expedientes técnicos, informes de liquidación y de entrevistas a profesionales en la construcción y/o diseño de la fundación de puentes en el Perú.

2.2.3. Variable de estudio y operacionalización

La presente investigación considera como variable independiente al procedimiento *Well foundation*, el cual se mide mediante el porcentaje de satisfacción de ingenieros especialistas en la fundación de puentes y tiene como instrumento de investigación las entrevistas, y como variable dependiente a la mejora del procedimiento constructivo para *caissons* de concreto, el cual está medido por la dimensión económica y de tiempo.

Tabla 2.1: Descripción de los componentes de la variable independiente y dependiente de la presente investigación

Variable	Dimensión	Indicador	Unidad de medida	Instrumento de investigación
Independiente X: Procedimiento <i>Well foundation</i>	X1: Satisfacción	Grado de satisfacción de los ingenieros especialistas en fundación de puentes	Porcentaje de satisfacción de los ingenieros especialistas	Entrevistas
Dependiente Y: Mejora del procedimiento constructivo para <i>caissons</i> de concreto	Y1: Económica	Porcentaje de variación del costo directo	Unidad monetaria	Análisis de procedimiento y experticia
	Y2: Tiempo	Tiempo optimizado por cada actividad	Unidad porcentual	Expediente técnico y de liquidación

Fuente: Propia.

2.2.4. Técnicas e Instrumentos de recolección de datos

Las técnicas e instrumentos que se utilizarán para la recopilación de datos de la presente investigación se realizará mediante, entrevistas a ingenieros especialistas en la construcción y/o diseño de *caissons* de concreto, ver formato de entrevista en el **Anexo N° 05**, expedientes técnicos de los puentes Pampa blanca y Río tambo y, además, el informe de liquidación de los mismos, los cuales serán proporcionados por Provias Nacional, Provias Descentralizado y el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC).

2.2.5. Técnicas de Procesamiento y Análisis de datos

Como técnicas de procesamiento se utiliza: gráficos circulares ya que muestran las proporciones de un conjunto, en esta indagación el conjunto serán los ingenieros especialistas en la construcción y/o diseño de *caissons*, cuadros comparativos donde se pueda identificar el porcentaje de mejora del procedimiento constructivo para *caissons* de concreto y, también, tablas que permitan filtrar, ordenar y dar formato a los datos recolectados de los expedientes técnicos e informe de liquidación de los puentes Pampa blanca y Río tambo.

Asimismo, para el análisis de datos de las entrevistas se utiliza primero la fórmula para el tamaño de la muestra aleatoria y luego, se calcula las proporciones del conjunto (porcentual). Además, para analizar la cantidad de horas utilizadas para producir una unidad de producción se utilizará la fórmula del Rendimiento y, finalmente, se utiliza el análisis de precios unitarios (APUS) y la fórmula polinómica de reajuste para determinar la variación porcentual, económica y de tiempo.

CAPITULO 3 : IDENTIFICACIÓN DE LA PROBLEMÁTICA DEL MÉTODO DE EXCAVACIÓN CON PRESENCIA DE AGUA EN DIVERSOS PROYECTOS

Son incontables las infraestructuras de puentes que han requerido de un método de excavación con presencia de agua y un sistema de bombeo para ejecutar la construcción de sus cimentaciones, muchas de ellas se adecuaron a las condiciones del terreno en el que iban a cimentar e innovaron el procedimiento constructivo convencional. En ese sentido, el presente capítulo detalla el problema y solución durante la construcción de las fundaciones del puente Akashi Kaikyo (Japón) y el puente Yuracyaku (Perú); así como también el procedimiento constructivo de los *caissons* de concreto del edificio Torres del Parque en Colombia, el mismo que marcó un hito en la construcción de cimentaciones profundas de ese país [28].

3.1. Puente Akashi Kaikyo

El puente Akashi Kaikyo se ubica en Kobe – Japón, tiene una longitud de 3,911.0m, un ancho de 36.0m y una altura aproximada de 280.0m de la superficie de agua. Su perfil estratigráfico determina estar conformado por suelos gravosos y semi sueltos, lo que les obligó a tener cimentaciones profundas. Asimismo, la estructura se apoya sobre cuatro cajones fondeados, dos en tierra y dos en mar.

Según lo descrito por Furuya, Yamaoka y Paulson, la cimentación en mar fue todo un reto para los ingenieros a cargo, debido a dos razones principales; primero, porque el estrato firme se encontraba a una profundidad económicamente inviable y segundo, porque el hundimiento del cajón fondeado de 80.0 de diámetro y 70.0m de profundidad, no podía realizarse mediante su propio peso, ni con el uso de maquinaria, siendo este último problema el causante del desaplome del elemento [7]. En consecuencia, la colocación de los cajones fondeado como método de excavación con presencia de agua se ejecutó con coordenadas para ubicar, de manera exacta, el cajón metálico sobre el mar,

luego le añadieron 32 bombas de agua para llenar su interior y así lograr un hundimiento equilibrado (ver esquema en la figura 3.1). Una vez posicionado, drenaron toda el agua del interior, vertieron concreto bajo agua hasta una cota de - 20m [7], respecto del nivel del mar y, finalmente, colocaron la estructura de acero de puente. La tabla 3.1 muestra el resumen de la solución a la problemática en la construcción de las fundaciones del puente Akashi Kaikyo (Japón).

Figura 3.1: Instalación flotante del cajón fondeado de la cimentación del puente Akashi Kaikyo.

Fuente: History-Mega estructuras (2014).

Tabla 3.1: Características de la cimentación en mar del puente Akashi Kaikyo.

Puente Akashi Kaikyo	
Condición geológica	Grava semi-suelta saturada
Método de excavación	Cajón fondeado
Procedimiento constructivo	<i>Well foundation</i>
Problema	Estabilidad en el hundimiento del cajón metálico debido a la fuerte oleada en el mar
Bombeo	Invertido
Innovación	<ul style="list-style-type: none"> - 32 bombas en el interior de la caja metálica para hundir de manera sincronizada el elemento - Concreto vertido bajo agua hasta la cota -20.0.

Fuente: Propia.

3.2. Puente Yuracyaku

Se ubica entre las provincias de Rioja y Moyobamba en la región de San Martín - Perú, tiene una longitud de 150.0m (de estribo a estribo) y un ancho de 8.40m. Su perfil estratigráfico muestra estar conformado por arena arcillosa semi impermeable en la superficie y, un aumento de la misma, a mayor profundidad. Asimismo, el puente tiene como cimientos 04 *caissons*, dos para estribos y dos para pilares.

La construcción de los *caissons* del puente Yuracyaku se ejecutaron mediante el procedimiento constructivo *Well foundation*, pero debido a las adversidades presentadas por el suelo, los ejecutores añadieron otras actividades. Según Marreros (2001) los problemas más graves durante la construcción de los *caissons* de concreto fueron la inclinación y deslizamiento de los elementos siendo incontrolables a partir de la cota - 15.0m ya que el estrato de suelo presenciaba una gran cantidad de arena que hacía imposible la depresión de la napa freática [12]. La solución a la problemática fue incorporar el método de cajones neumáticos; sin embargo, el proceso de traslape entre un método y otro ocasionó complicaciones en el descenso de los *caissons*, puesto que al comprimir las paredes del elemento se producían fuerzas ascendentes de gran magnitud generando que el *caisson* ascienda hasta 1.0cm [12]. Finalmente, optaron como solución, colocar una tubería perimetral hasta el borde cortante para lubricar el suelo y, también, aplicaron bentonita en los orificios de los encofrados para aumentar el peso y acelerar el hundimiento, dicho procedimiento mejoró el hundimiento hasta en 13cm por semana, pero su costo sobrepasó lo establecido contractualmente [12]. La tabla 3.2 resume el problema y solución de la cimentación del Puente Yuracyaku.

Tabla 3.2: Características de la cimentación del Yuracyaku (San Martín)

Puente Yuracyaku	
Condición geológica	Arena arcillosa, semi-impermeable en la superficie pero con un aumento a mayor profundidad
Método de excavación	<i>Caisson</i> de concreto y cajones neumáticos
Procedimiento constructivo	<i>Well foundation</i> con variaciones
Bombeo	Pozos profundos / electrobombas

Problema	Desplome y desplazamiento lateral
Innovación	<ul style="list-style-type: none"> - Tubería perimetral con llegada al borde cortante para lubricar el suelo - Aplicación de bentonita en las paredes del <i>caisson</i>

Fuente: propia.

3.3. Caissons del edificio Torres del Parque

El edificio Torres del parque (Colombia) fue construido en el año 1972, marca un hito en la construcción edificios y aporta, significativamente, en el procedimiento constructivo de la fundación de puentes, en lecho de río, de Colombia [29].

En la entrevista realizada al supervisor de obra (2004), el Ing. Augusto Espinosa, precisó que el edificio Torres del Parque tiene cimentación profunda tipo *caisson* de concreto y que su procedimiento constructivo no fue el tan utilizado, *Well foundation*, puesto que la profundidad de los elementos variaba de 15.0 a 20.0 m y, también, porque los *caissons* laterales de ese edificio se diseñaron con una inclinación aproximada de 45° con la horizontal [29].

Así, Espinosa comenta que el procedimiento constructivo fue incluido por el Ing. Antonio Paez, en ese entonces el ingeniero de suelos del proyecto, quien determinó que los *caissons* serían construidos de la superficie hasta la cota de cimentación sin la necesidad de realizar un procedimiento de hincado. En otras palabras, la construcción fue la siguiente: primero se excavó hasta una profundidad de 1.0m, seguidamente se colocó el acero perimetral y, continuo a ello, el encofrado, luego vaciaron el concreto (ver figura 3.2) y esperaron para desencofrar [29]. Es preciso resaltar que el procedimiento explicado se utilizó en cada uno de los anillos del *caisson*, los mismos que era consecutivos hasta llegar a la cota de cimentación.

Con el pasar de los años, algunos proyectos de puentes en Colombia como el Puente Timbío, Guanacas, entre otros, utilizaron el ya mencionado procedimiento constructivo. Específicamente, aquellos puentes que tenían cimentación profunda en lecho de río, cauces profundos, luces relativamente cortas, cargas muy elevadas hacia la cimentación y suelos medianamente cohesivos [30].

Figura 3.2: Vaciado de *caisson* de concreto en Colombia – corte transversal.

Fuente: CYPE Ingenieros S.A.

Tabla 3.3: Características de la cimentación del Edificio Torres del Parque (Colombia)

Edificio Torres del Parque	
Condición geológica	Arena arcillosa, semi-impermeable
Método de excavación	<i>Caisson</i> de concreto
Procedimiento constructivo	Invertido
Bombeo	Pozos profundos / Motobombas
Problema	<i>Caissons</i> profundos con inclinación a 45°
Innovación	<p>Procedimiento constructivo invertido, es decir:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Excavación - Encofrado, acero, concreto - Excavación para el segundo anillo <p>El encofrado bajaba con la excavación para que no tengan problemas de deslizamiento.</p>

Fuente: Propia.

CAPITULO 4 : IDENTIFICACIÓN DE PUENTES CONSTRUIDOS EN LA COSTA DE LA REGIÓN AREQUIPA

4.1. PUENTE PAMPA BLANCA

4.1.1. Aspectos generales

El proyecto Puente Pampa Blanca se ejecutó en el año 2000, está constituido por dos tramos de 50.0m cada uno sumando una longitud total de 101.2m. Se localiza en el km. 8+440 de la carretera El Fiscal – Cocachacra – Mollendo, entre los poblados del El Fiscal y Cocachacra, provincia de Islay – Arequipa.

4.1.1.1. Características de la cimentación

Respecto de las características geotécnicas como el perfil estratigráfico del área geográfica, obtenida del registro *in situ*, infiere que de la cota 0.00 a 7.50m el suelo es una grava arenosa limosa y que desde la cota 7.5 a 20.0m el suelo es una grava arenosa con fragmentos de rodados. Es por ello, que la dirección de caminos del MTC concluye ejecutar *caissons* de concreto tanto para el pilar central del puente como para los estribos del mismo.

Su cimentación está conformada por tres *caissons* de sección rectangular y elevación escalonada, además poseen un borde cortante de ½” de espesor y 0.5m de altura para proteger al concreto de posibles voladuras producto de la bolonería existente. Los **Anexos N° 01, N° 02 y N° 03** detallan las dimensiones de las fundaciones del pilar central y estribos, izquierdo y derecho, respectivamente. Asimismo, las características geométricas de la cimentación se resumen en las tablas 4.1 y 4.2.

4.1.1.2. Características de la excavación para la fundación del puente

a) Costo de ejecución

Los costos en mención, corresponden a la planificación del proyecto Puente Pampa Blanca e infieren, únicamente, a los costos destinados para la fundación del mismo. El

Análisis de Precios Unitarios (APU) por cada partida se puede visualizar en el **Anexo N°04**. Además, la tabla 4.3 detalla las partidas necesarias para la construcción de los *caissons* de concreto.

Tabla 4.1: Características geométricas y de material del estribo izquierdo y pilar central de la fundación del Puente Pampa Blanca

	ESTRIBO IZQUIERDO				PILAR CENTRAL			
	Caisson de concreto e=0.60				Caisson de concreto e=0.60			
	Dimensiones		Profundidad	Resistencia	Dimensiones		Profundidad	Resistencia
	L1 (m)	L2 (m)	h (m)	f'c (kg7cm2)	L1 (m)	L2 (m)	h (m)	f'c (kg7cm2)
Tapón (curvo)	7.9	12.9	1.0	210.0	7.6	12.9	1.0	210.0
Borde Cortante (cónico)	6.66	12.9	2.5	210.0	6.36	6.36	2.5	210.0
	Estructura metálica e=0.3				Estructura metálica e=0.3			
Núcleo	5.1	9.1	3.7	140.0	4.8	10.1	3.7	140.0
Tapa	5.1	9.1	1.8	210.0	4.8	10.1	1.8	210.0

Fuente: Propia

Tabla 4.2: Características geométricas y de material del estribo derecho de la fundación del Puente Pampa Blanca.

	ESTRIBO DERECHO			
	Caisson de concreto e=0.60			
	Dimensiones		Profundidad	Resistencia
	L1 (m)	L2 (m)	h (m)	f'c (kg7cm2)
Tapón (curvo)	7.9	12.9	1.0	210.0
Borde Cortante (cónico)	6.66	12.9	2.5	210.0
	Estructura metálica e=0.3			
Núcleo	5.1	9.1	3.7	140.0
Tapa	5.1	9.1	1.8	210.0

Fuente: Propia.

El costo directo, contemplado, para la fundación del Puente Pampa Blanca fue de S/ 1, 142,989.78 (Un millón ciento cuarenta y dos mil novecientos ochenta y nueve con 78/00 soles) [4].

b) Tiempo de ejecución

El tiempo de construcción de todo el puente se fijó en un plazo contractual de ocho meses, teniendo una duración de dieciséis semanas y media para la fundación del puente [4]. El cronograma de ejecución planificado se visualiza en la figura 4.1, donde se detallan los tiempos máximos para llevar a cabo cada una de las partidas relacionadas con el

procedimiento constructivo de los *caissons* de concreto. También, se puede visualizar que los hitos del método de excavación con presencia de agua son: la excavación en seco y el vertido del concreto y que la excavación para hincado de *caisson* es la actividad con mayor tiempo de ejecución.

Figura 4.1: Cronograma de ejecución planificado del Puente Pampa Blanca.

Fuente: MTC (2000).

Tabla 4.3: Partidas involucradas en la ejecución de los *caissons* del puente Pampa Blanca

ID	Partida	Unidad	Metrado
1.00	Excavación en seco	m3	1,980.12
2.00	Excavación bajo agua (Estribo)	m3	114.75
3.00	Plataforma de trabajo	m2	157.59
4.00	Acero $f_y=4200\text{kg/cm}^2$	kg	56,290.59
5.00	Borde cortante del caisson	m	131.20
6.00	Encofrado no visto en seco	m2	1,665.84
7.00	Encofrado curvo en seco	m2	56.55
8.00	Encofrado cara vista en seco	m2	282.50
9.00	Concreto $f'c=210\text{kg/cm}^2$ en seco	m3	672.80
10.00	Concreto $f'c=210\text{kg/cm}^2$ b/ agua (tapa de caisson)	m3	260.18
11.00	Concreto $f'c=210\text{kg/cm}^2$ b/agua (tapón de caisson)	m3	175,328.04
12.00	Concreto ciclópeo b/agua +30% piedra grande	m3	613.46
13.00	Excavación para hincado de Caisson	m3	3,071.29
14.00	Relleno compactado de estructuras	m3	680.37
15.01	Encofrado no visto en seco (falso fuste)	m2	134.64
15.02	Acero $f_y=4200\text{kg/cm}^2$	kg	954.00
15.03	Concreto $f'c=175\text{kg/cm}^2$ en seco	m3	27.21
15.04	Demolición de falso fuste	m3	27.21

Fuente: Propia.

c) Rendimientos

El rendimiento de una actividad es de vital importancia en el Análisis de Precios Unitarios (APU). Por ello, se documentó los rendimientos de las partidas involucradas, la Tabla 4.4 los describe de manera detallada.

En la presente investigación se considerará como “Cuadrilla completa” aquella que está conformada por Capataz, Oficial, Operario y Peón, de lo contrario se describirá qué personal técnico la compone.

Tabla 4.4: Rendimientos de la mano de obra de las partidas pertenecientes a la excavación de la fundación del Puente Pampa Blanca.

ID	Mano de obra	Rendimiento	Und.
1.00	Capataz y Peón	0.0571	hh/m3
2.00	Capataz y Peón	0.0571	hh/m3
3.00	Capataz y Peón	0.0137	hh/m2
4.00	Cuadrilla completa	0.0992	hh/kg
5.00	Operario y peón	0.6666	hh/m
6.00	Cuadrilla completa	2.24	hh/m2
7.00	Cuadrilla completa	3.36	hh/m2
8.00	Cuadrilla completa	2.8	hh/m2
9.00	Cuadrilla completa	6.5	hh/m3
10.00	Cuadrilla completa	6.5	hh/m3
11.00	Cuadrilla completa	6.5	hh/m3
12.00	Cuadrilla completa	5.7777	hh/m3
13.00	Capataz , operario y peón	8.6667	hh/m3
14.00	Capataz , operario y peón	3.0223	hh/m3
15.01	Cuadrilla completa	2.24	hh/m2
15.02	Cuadrilla completa	0.0992	hh/kg
15.03	Cuadrilla completa	5.7777	hh/m3
15.04	Capataz, oficial y peón	1.44	hh/m3

Fuente: Propia.

De la tabla anterior, se observa que las actividades de: Excavación para hincado de *caisson* (13.0), vaciado de concreto en seco (9.0) y bajo agua (10.0 y 11.0) y el concreto ciclópeo (12.0) son las que mayor cantidad de mano de obra requieren. Esto se debe, a que la excavación se realizó manualmente y que el concreto fue fabricado *in situ*.

4.1.2. Procedimiento constructivo de la excavación para las fundaciones

El procedimiento constructivo para los *caissons* de concreto del Puente Pampa Blanca se planificó en seis etapas. La primera etapa, según sus especificaciones técnicas, constaría de la excavación en seco y bajo agua tanto del pilar central como de los estribos, para así dejar libre la zona de trabajo. En el caso del pilar central se proyectó compactar una plataforma de área similar a la del *caisson* solo que con un espesor de 30.0cm. En la segunda etapa, se construiría el Brocal (h=2.5m) y para ello, primero se debía colocar sobre la superficie de la plataforma el Borde cortante (e=0.50m), luego la armadura de acero, el encofrado curvo en seco y finalmente el concreto $f'c=210\text{kg/cm}^2$. Después de

tres días se procedería con el desencofrado y, posteriormente, la excavación para su hincado. En la tercera etapa, se proyectó fundar un falso fuste de altura 1.80m que bordea la entrada de la fundación del puente, este elemento sirve como medida de protección al ingreso de agua y/o a la caída de objetos en la parte interior del elemento. El procedimiento a ejecutar empieza con el encofrado no visto en seco, la colocación de acero y el vaciado de concreto $f'c = 175 \text{ kg/cm}^2$ en seco. En la cuarta etapa se vacía por anillos el núcleo del *caisson*, de manera similar al procedimiento constructivo del Brocal, se desencofra y se procede con el hincado manual del anillo ejecutado. Dicho procedimiento debe ser repetitivo hasta culminar con la construcción e hincado de todo el *caisson*. En la quinta etapa se debe vaciar el tapón, después de veinticuatro horas rellenar el núcleo con concreto ciclópeo $f'c = 140 \text{ kg/cm}^2$ y finalmente, vaciar la tapa del elemento. En la sexta y última etapa, se debe compactar el relleno de los bordes exteriores y luego proceder con la demolición del falso fuste [4].

4.2. PUENTE RÍO TAMBO

4.2.1. Aspectos generales

El puente Río Tambo forma parte del proyecto de mejoramiento de la Carretera Camaná - Dv. Quilca – Matarani - Ilo, Tramo I. Se emplaza entre el km 42+088.26 y el km 42+278.81 de la carretera Camaná – Quilca, se ubica entre los distritos de Dean Valdivia y Punta de Bombón, los cuales pertenecen a la provincia de Islay, departamento de Arequipa.

El diseño del puente permitió plantear la construcción de una estructura de tramos múltiples, de esta forma está conformado por cuatro tramos de 47.0m cada uno, completando una longitud total de 190.55m. El presupuesto planificado para su construcción fue de S/ 18, 632, 985.05 (Dieciocho millones seiscientos treinta y dos mil novecientos ochenta y cinco con 05/100 soles) y un tiempo de ejecución de 12 meses [5].

El Puente se emplaza entre el km 42+088.26 de la carretera mencionada, hasta el km 42+278.81 de la misma. A su vez, está ubicado entre los distritos Dean Valdivia y Punta de Bombón pertenecientes a la provincia de Islay del departamento de Arequipa.

4.2.1.1. Características de la cimentación

La subestructura del puente está compuesta por dos estribos extremos y tres pilares, los cuales tienen por estructura de cimentación *caissons* de concreto. Para los estribos la geometría del elemento es rectangular de 13.0m x 15.9m con una profundidad de 10.0m y para las pilas, *caissons* octogonales de 5.0m x 18.6m con una profundidad de 7.0m [5]. En la Tabla 4.5 se muestra el resumen de las características geométricas de los elementos de la cimentación del Puente Río Tambo.

La geología de los pilares se caracteriza por la presencia de grava mal gradada y, arena limosa en menor porcentaje (10-45%). Por su parte, el estribo izquierdo presenta en su estrato superficial, arena limosa y en su estrato profundo, grava sub-redondeada con un 10% de arena limosa de grano fino; mientras que la estratigrafía del estribo derecho presenta una mayor presencia de grava sub-redondeada y un 15% de arena limosa [5].

Tabla 4.5: Características de la cimentación del Puente Río Tambo.

	ESTRIBO				PILAR			
	Caisson de concreto e=0.60				Caisson de concreto e=0.60			
	Dimensiones		Profundidad	Resistencia	Dimensiones		Profundidad	Resistencia
	L1 (m)	L2 (m)	h (m)	f'c (kg/cm ²)	L1 (m)	L2 (m)	h (m)	f'c (kg/cm ²)
Tapón (curvo)	15.9	13	1.5	210.0	18.8	5	1.5	210.0
Borde Cortante (cónico)	15.9	13	1.5	210.0	18.8	5	1.5	210.0
Núcleo	14.1	11.2	6.5	140.0	17	3.8	3.5	140.0
Tapa	15.9	13	2	210.0	18.8	5	2	210.0

Fuente: Propia

4.2.2. Procedimiento constructivo del caisson de concreto

Para la construcción del *caisson*, en el caso de los pilares, se tiene como primera etapa la conformación de una plataforma compactada que permita trabajar en seco y a un mismo nivel. Luego, se procede a la construcción de la corona o brocal, este elemento se conforma por una uña donde se integra una plancha metálica perimetral (borde cortante) de acero estructural Grado 50 $f_y=3500 \text{ kg/cm}^2$ de espesor $\frac{1}{4}$ ", y de media pulgada de espesor en los estribos. Después del encofrado y vaciado de concreto de 1.5m de altura correspondiente al brocal, se procede con la construcción del primer anillo de 1.2m de altura. En esta etapa, se instala una plataforma elevada que permita a los trabajadores realizar las actividades de colocación de armadura, encofrado/desencofrado y vaciado de concreto, teniendo listos el brocal y el primer anillo se procede con el hincado del caisson,

a través de una excavación manual controlada de 10.0cm para evitar desbalances en el hundimiento. Entonces, se prosigue con la construcción del resto de anillos, en esta etapa ya se considera un equipo de bombeo pues el afloramiento de filtraciones de agua se vuelve más recurrente y visible, a parte de ello se realizan las mismas actividades que son parte de la construcción e hincado del brocal.

Posteriormente, se ejecuta el tapón de fondo con la utilización del concreto bajo agua. Acto seguido, se procede a vaciar el cuerpo del *caisson* con concreto ciclópeo $f'c=140 \text{ kg/cm}^2$ y, para finalizar la construcción del elemento se vacía la tapa con concreto $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$, este elemento se convierte en una zapata donde se apoyará el pilar. Por último, se procede con el relleno y compactación del área perimetral que fue excavada para el hincado.

4.3. PUENTE OCOÑA

El Puente Ocoña se emplaza en el distrito de Ocoña perteneciente a la provincia de Camaná en el departamento de Arequipa. El puente se encuentra dentro del trazo de la Panamericana Sur y tiene una longitud total de 360m.

4.3.1. Características de cimentación

La subestructura del Puente Ocoña está compuesta por dos estribos y tres pilares centrales. Estos elementos se encuentran apoyados sobre *caissons* de concreto.

4.3.2. Procedimiento constructivo de la excavación para las fundaciones

El procedimiento que se siguió para la excavación y construcción de la cimentación se diagramó de la misma forma que los puentes ya descritos con anterioridad, Pampa Blanca y Río Tambo.

4.4. PUENTE CAMANÁ

El Puente Camaná forma parte de la Panamericana Sur y se ubica en el distrito y provincia de Camaná, en el departamento de Arequipa. El puente se desarrolla en una longitud de 220.0m.

4.4.1. Características de cimentación

La subestructura del Puente Camaná está conformada por dos estribos y seis pilares distribuidos en tres ejes, cada uno de ellos apoyados en caissons de concreto.

4.4.2. Procedimiento constructivo de la excavación para las fundaciones

El procedimiento realizado, para la excavación y construcción de la cimentación de tipo *caisson* de concreto siguió los mismos lineamientos ejecutados en el Puente Pampa Blanca y del nuevo Puente Río Tambo.

4.5. PUENTE SANTA ROSA “EL FISCAL”

El Puente Santa Rosa, antes llamado El Fiscal, se emplaza en el km 1028+700 de la Panamericana Sur y tiene una longitud de 123.60m. A su vez, se ubica entre los distritos de Cocachacra y Mollendo, ambos pertenecientes a la provincia de Islay en el departamento de Arequipa.

4.5.1. Características de cimentación

La subestructura del Puente Santa Rosa está compuesta por dos estribos y dos pilares centrales, donde los pilares se apoyan sobre *caissons* y los estribos sobre zapatas [23].

4.5.2. Procedimiento constructivo de la excavación para las fundaciones

El procedimiento realizado para la excavación y construcción de los *caissons* de concreto fue el mismo que se siguió en el Puente Pampa Blanca.

Todos los puentes, descritos líneas arriba, pertenecientes a la Costa de la Región Arequipa se proyectaron con cimentación profunda tipo *caissons* de concreto [31]. De esta forma, se llega a identificar que el procedimiento constructivo realizado para la excavación y construcción de los *caissons* de concreto es similar entre ellos. Por ello, se toma como referencia de cálculo a los puentes Pampa Blanca y Río Tambo.

CAPITULO 5 : ANÁLISIS DEL PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO PARA CAISSONS DE CONCRETO

5.1. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

En términos generales, y de acuerdo con el estudio de una muestra de cinco (05) puentes, Pampa Blanca, Río Tambo, Ocoña, Camaná y El Fiscal, la región de Arequipa presenta una matriz gravo arenosa y, además, un pequeño porcentaje de limos en las zonas más cercanas al mar del valle del Río Tambo. En consecuencia, la fundación de sus puentes tiende a ser del tipo profunda; y, dependiendo de la longitud, la carga viva, socavación y cargas laterales, éstas terminan siendo de *caissons* de concreto.

Actualmente, el puente Río Tambo se encuentra en ejecución y es el reemplazo del puente Freyre que se encuentra a 2.3 km aguas abajo. Por su parte, los puentes Pampa Blanca, Ocoña, Camaná y El Fiscal son puentes ya ejecutados.

5.2. ENTREVISTA A ESPECIALISTAS

Para obtener información real y verídica se entrevistó a especialistas en la construcción y/o diseño de puentes con cimentación de *caissons* de concreto armado. En ese sentido, para establecer el tamaño de la muestra aleatoria se hizo uso de la *Ec. 3* descrita en el capítulo I del presente documento.

$$n = \frac{10 \times 1,645^2 \times 0.5 \times 0.5}{0.009^2 \times (10 - 1) + 1.645^2 \times 0.5 \times 0.5} = 9$$

Donde:

N = El tamaño de la población es representada por 10 puentes con cimentación de *caissons* de concreto, ubicados en la Red vial Nacional según el mapa vial del MTC (ver tabla 5.1).

Z = 1.645 para un nivel de confianza de 90%.

p = Probabilidad de éxito 0.5 (Puede asumirse un valor entre 0 y 1)

q = Probabilidad de fracaso 0.5 (1 - p)

d = Margen de error 9% (Puede asumirse un valor entre 5 – 9%)

Respecto a los valores asumidos en la *Ec. 3*, el nivel de confianza y el margen de error se fundamenta en el bajo número del tamaño de la población más no en la confiabilidad de lo expresado por los especialistas. Del cálculo realizado, se obtiene que la muestra representativa, para un nivel de confianza de 90%, es de 9 especialistas.

Tabla 5.1: Puentes pertenecientes a la red vial nacional construidos con caissons de concreto.

Puentes	Ubicación	Red vial
Cruz verde	Ica	Nacional
Ocoña	Arequipa	Nacional
Camana	Arequipa	Nacional
Fiscal	Arequipa	Nacional
Huanchuy	Huancavelica	Departamental
Combareque	Cuzco	Departamental
Bolognesi (Piura)	Piura	Nacional
Pampa Blanca	Arequipa	Nacional
Capiri	Cuzco	Departamental
Salitral	Piura	Nacional
Río negro	Junín	Nacional
Carozable Echarti	Cuzco	Nacional
Bocasatipo	San Martín	Departamental
Freyre	Arequipa	Departamental
Río Tambo	Arequipa	Nacional
Pispita	Salamanca	Departamental

Fuente: Propia.

La entrevista constó de dos partes, ver formato en el **Anexo N°05**, una para el análisis del procedimiento constructivo de *caissons* mediante *Well foundation* y otra para la validación de la propuesta de mejora. Los resultados de la etapa I se muestran a continuación:

Figura 5.1: Años de experiencia.

Fuente: Propia.

Figura 5.2: ¿Ha ejecutado *caissons* de concreto?

Fuente: Propia.

Figura 5.3: ¿Debería optimizarse el procedimiento constructivo?

Fuente: Propia.

Figura 5.4: Clasificación del proceso constructivo.

Fuente: Propia.

Figura 5.5: ¿Qué proceso constructivo optimizaría?

Fuente: Propia.

Figura 5.6: ¿Qué actividades considera críticas?

Fuente: Propia.

De los resultados mostrados, se tiene que el 56.0% de los entrevistados tiene una experiencia entre 40 – 60 años (ver figura 5.1) lo que significa un vasto conocimiento almacenado y un aporte significativo a la presente investigación. Asimismo, se observa que el 11.0% de los encuestados, una entrevista, no ha construido *caissons* de concreto (ver figura 5.2); sin embargo, se precisa que el especialista es estructural en puentes y sus recomendaciones se detallaran posteriormente. Además, el 100% de los ingenieros especialistas clasifica al procedimiento constructivo *Well foundation* como aquel método que necesita mejorar y por ende, que sí debería optimizarse (ver figuras 5.3 y 5.4). En la figura 5.5 se concibe que el orden de las actividades a optimizar es: Excavación para hincado de *caisson*, obra falsa, otros (Control del nivel freático) y vaciado de concreto. Se constata, también, que la excavación para hincado de *caisson* es la actividad crítica del *Well foundation* que necesita mayor optimización, seguida del control del nivel freático, el encofrado y el vaciado de concreto (ver figura 5.6).

Por otro lado, las complicaciones que tuvieron los especialistas en la excavación para hincado de *caisson* son: desplome, exceso de flujos de agua, presencia de bolonería y exceso de rozamiento o fricción lateral. En consecuencia, las medidas correctivas se presentan a continuación:

Figura 5.8: Exceso de flujo de agua.

Fuente: Propia.

Figura 5.7: Desplome.

Fuente: Propia.

Para contrarrestar el Desplome se recomienda excavar en el lado opuesto de la inclinación (ver figura 5.7), pero con la ayuda del topógrafo se debe cuidar que no se genere desplome del lado opuesto. El 40% de los especialistas infiere en incrementar el número de motobombas o electrobombas cuando hay exceso de flujo de agua (ver figura 5.8); sin embargo, recomiendan iniciar la depresión del nivel freático usando bombas sumergibles. El ítem “Otros” como medida correctiva al exceso de flujo de agua hace referencia a lo indicado por el ingeniero Mayhuire, quien declaró que para la ejecución del puente Pampa Blanca tuvieron problemas con el sellado de *caisson* del pilar ya que la sub presión aumentaba a gran escala, su solución fue dividir la sección del *caisson* en cuatro cuadrantes, derivar el agua mediante drenes hacia un cuadrante en específico, bombear el agua hacia el exterior, vaciar concreto en los cuadrantes drenados, trasladar todo el agua del cuadrante por vaciar hacia una caja de concreto usando una tubería de succión, luego colocar concreto y, finalmente, retirar la tubería y vaciar rápidamente. Por añadidura, para solucionar la presencia de bolonería recomiendan el uso de explosión controlada como primera medida, pero si la roca tiene dimensiones medias se puede hacer uso de cachorros de dinamita o martillos neumáticos (ver figura 5.9). Asimismo, la figura 5.10 muestra que el 56.0% de los encuestados indica que se debe generar un sismo local cuando la estructura no se hunde.

Figura 5.9: Presencia de bolonería.

Fuente: Propia.

Figura 5.10: Parar hincado por exceso de rozamiento.

Fuente: Propia.

Para tener un mayor alcance sobre la optimización económica en la construcción de *caissons*, se consultó a los ingenieros en la construcción y/o diseño de puentes sobre cuál era el método e índice porcentual que consideraban para determinar que el costo directo de la fundación de un puente se había optimizado; la respuesta unánime al análisis fue la comparación económica con el método más usado o tradicional y respecto al índice porcentual, el 45% de los entrevistados indicó que el porcentaje de mejora económica debía variar entre 16-20% considerando que el nuevo procedimiento no ha sido ejecutado en campo y por ende no se ha considerado la curva de aprendizaje de la masa obrera (ver figura 5.11 con todos los porcentajes).

Figura 5.11: Porcentaje de optimización económica considerada por los ingenieros especialistas en la construcción y/o diseño de puentes.

Fuente: Propia.

5.3. ANÁLISIS DEL PLANEAMIENTO INICIAL DE LOS PUENTES PAMPA BLANCA Y RÍO TAMBO

5.3.1. Procedimiento constructivo

El procedimiento constructivo de ambos puentes se realizó mediante *Well foundation* pero, como se puede apreciar en los ítems 4.1.1 y 4.2.1, la diferencia constructiva de ambos proyectos es: la forma de los *caissons*, el uso de la junta *water stop* para obstruir el ingreso de agua por los espacios entre anillos y la antigüedad de su construcción, diferencia aproximada de 15 años, donde el procedimiento del hincado de *caisson* se modifica, eliminando el falso fuste que era construido en la superficie como medida de protección ante la caída de objetos y/o posibles flujos de agua en la superficie. Dicha modificación, se sustituye dejando por encima de la superficie, entre 20.0 y 30.0 cm de núcleo cada vez que se realice el hincado.

Asimismo, de la entrevista con el ingeniero residente de la construcción del Puente Pampa Blanca, se detalla que la actividad más crítica y, además, la que mayor esfuerzo emitió fue la excavación para hincado de *caisson*, ya que a partir de la cota -7.00m tuvieron problemas de desplome del elemento. Asimismo, se da a conocer que un problema

puntual fue controlar el nivel freático al momento de sellar el *caisson*, puesto que las aguas subterráneas emergían y el concreto corría el riesgo de un deslave.

De lo expresado, se observa que el procedimiento seguido por el *Well foundation* presenta problemas en la excavación para el hincado de los *caisson*, mientras más profundo sea el elemento mayor la desventaja, así como también se incrementa los flujos de agua, ya que una de las características hidrogeológicas de la región Arequipa es que se encuentra sobre un gran acuífero.

5.3.2. Puente Pampa Blanca

5.3.2.1. Análisis del procedimiento constructivo según la propuesta inicial

Debido a que el Puente Pampa Blanca se ejecutó desde el año 2000 hasta el año 2001 se analizará el procedimiento constructivo mediante las partidas presupuestadas y, además, se evaluará los posibles ítems a optimizar. En ese sentido, la Tabla 5.2 muestra los metros y el costo parcial de cada una de las partidas planificadas para su construcción.

Tabla 5.2: Detalle del metrado y precio unitario por partidas del Presupuesto Inicial del puente Pampa blanca.

ACTIVIDADES	Unidad	Metrado	P.U. (\$/.)	Parcial
01. Excavación en seco				S/. 4,257.26
01.01 Estribos	m3	1,931.04	2.15	4,151.74
01.02 Pilar	m3	49.08	2.15	105.52
02. Excavación bajo agua (ESTRIBO)	m3	114.75	3.64	S/. 417.69
03. Plataforma de trabajo (PILAR)	m2	157.59	7.06	1,112.59
04. Acero fy=4200kg/cm2				S/. 113,144.09
04.01 Estribos	kg	37,798.56	2.01	75,975.11
04.02 Pilar	kg	18,492.03	2.01	37,168.98
05. Borde cortante del caisson				S/. 63,300.06
05.01 Estribos	m	88.00	482.47	42,457.36
05.02 Pilar	m	43.20	482.47	20,842.70
06. Encofrado no visto en seco				S/. 71,564.49
06.01 Estribos	m2	1,128.48	42.96	48,479.50
06.02 Pilar	m2	537.36	42.96	23,084.99
07. Encofrado curvo en seco	m2	56.55	71.45	S/. 4,040.50
08. Encofrado cara vista en seco				S/. 14,543.10
08.01 Estribos	m2	190.00	51.48	9,781.20
08.02 Pilar	m2	92.50	51.48	4,761.90
09. Concreto f'c=210kg/cm2 en seco				S/. 190,449.50
09.01 Estribos	m3	453.06	283.07	128,247.69
09.02 Pilar	m3	219.74	283.07	62,201.80
10. Concreto f'c=210kg/cm2 b/agua (tapa de caisson)				S/. 75,361.14
10.01 Estribos	m3	178.10	289.65	51,586.67
10.02 Pilar	m3	82.08	289.65	23,774.47
11. Concreto f'c=210kg/cm2 bajo agua (tapón de caisson)				S/. 175,328.04
11.01 Estribos	m3	411.08	289.65	119,069.32
11.02 Pilar	m3	194.23	289.65	56,258.72
12. Concreto ciclópeo bajo agua +30% piedra grande				S/. 111,392.07
12.01 Estribos	m3	419.86	181.58	76,238.18
12.02 Pilar	m3	193.60	181.58	35,153.89
13. Excavación para hincado de Caisson				S/. 288,885.54
13.01 Estribos	m3	1,968.72	94.06	185,177.80
13.02 Pilar	m3	1,102.57	94.06	103,707.73
14. Relleno compactado de estructuras				S/. 13,695.85
14.01 Estribos	m3	450.45	20.13	9,067.56
14.02 Pilar	m3	229.92	20.13	4,628.29
15. FALSO FUSTE				S/. 15,497.88
15.01 Encofrado no visto en seco	m2	134.64	42.96	5,784.13
15.02 Acero fy=4200kg/cm2	kg	954.00	2.01	1,917.54
15.03 Concreto f'c=175 kg/cm2 en seco	m3	27.21	254.48	6,924.40
15.04 Demolición de Falso fuste	m3	27.21	32.04	871.81

Fuente: Propia.

Se puede distinguir que la partida con la mayor cantidad de metrado (3071.29m^3) es la Excavación para hincado de *caisson*; sin embargo, su precio unitario no es tan elevado ya que el procedimiento constructivo es manual y sólo se hace uso de un Winche con dos baldes y una motobomba de 4" que permiten extraer el material excavado hacia la

superficie y trabajar en seco, respectivamente. Asimismo, otras partidas que son significativas en cuanto a metrados y, también, en costo total son el acero y el concreto armado con 56, 290.59 kg y 1, 538.29 m³, respectivamente. En contraparte, el precio unitario de la partida “acero” es mínima, S/ 2.01, y según la tabla 4.4 del capítulo IV esta partida tiene un rendimiento de 0.099 hh/kg, es por ello que el acero no será una partida representativa donde se pueda aplicar una mejora del procedimiento constructivo de los *caisson* de concreto.

5.3.2.2. Cronograma Inicial

El cronograma programado, del estudio definitivo, para la ejecución del puente Pampa Blanca fue planteado para la construcción en su totalidad, pero para el análisis del proceso de excavación se generó un nuevo cronograma a partir de la relación de metrados y tiempos programados, ver *Anexo N°06*. De esta forma, se determina que el plazo total para la ejecución del método de excavación es de 123 días, siendo este plazo el planificado.

Asimismo, las actividades con mayor tiempo de ejecución son, en orden descendente, concreto armado, encofrado, acero y excavación para hincado. Por lo tanto, una optimización del procedimiento de éstas actividades se vería reflejada en menores tiempos de ejecución.

Tabla 5.3: Horas Hombre (hh), por partida, del método de excavación para la cimentación del puente Pampa blanca.

CUANTIFICACIÓN DE HORAS HOMBRE				
Partida	Unidad	Metrado	Rendimiento	HH
01. Excavación en seco	m3	1,980.12	0.06	114.00
02. Excavación bajo agua (ESTRIBO)	m3	114.75	0.06	7.00
03. Plataforma de trabajo (PILAR)	m2	157.59	0.01	3.00
04. Acero fy=4200kg/cm2	kg	56,290.59	0.10	5,585.00
05. Borde cortante del caisson	m	131.20	0.67	88.00
06. Encofrado no visto en seco	m2	1,665.84	2.24	3,732.00
07. Encofrado curvo en seco	m2	56.55	3.36	191.00
08. Encofrado cara vista en seco	m2	282.50	2.80	791.00
09. Concreto f'c=210kg/cm2 en seco	m3	672.80	6.50	4,374.00
10. Concreto f'c=210kg/cm2 b/agua (tapa de caisson)	m3	260.18	6.50	1,692.00
11. Concreto f'c=210kg/cm2 bajo agua (tapón de caisson)	m3	605.31	6.50	3,935.00
12. Concreto ciclópeo bajo agua +30% piedra grande	m3	613.46	5.78	3,545.00
13. Excavación para hincado de Caisson	m3	3,071.29	8.67	26,619.00
14. Relleno compactado de estructuras	m3	680.37	3.02	2,057.00
15.01 Encofrado no visto en seco	m2	134.64	2.24	302.00
15.02 Acero fy=4200kg/cm2	kg	954.00	0.10	95.00
15.03 Concreto f'c=175 kg/cm2 en seco	m3	27.21	5.78	158.00
15.04 Demolición de Falso fuste	m3	27.21	1.44	40.00
TOTAL				53,328.00

Fuente: Propia

a) Rendimientos

Los rendimientos planificados se obtuvieron del análisis de precios unitarios del estudio definitivo del proyecto. En la Tabla 5.3 se detalla la cuantificación de las horas-hombre, correspondientes a los metrados de cada partida. La cantidad de hh empleadas en la ejecución de los *caisson* de concreto se calculó utilizando la Ec.2 y, la suma de todas las horas necesarias da un total de 53 328 hh. En ese sentido, se identifica que la mayor cantidad de hora hombre va destinada a la excavación para hincado de *caisson*, con un total de 26 619 hh y 49.92% de incidencia respecto del total de hh y, también, para el concreto que tiene un total de 10 001 hh y 18.75% de incidencia. Por su parte, la partida “Acero” no es un punto crítico que requiera mejorar, puesto que tiene un alto rendimiento (ver tabla 5.3) y, además, porque la cantidad de horas de mano de obra no es tan representativa, respecto del total (10.47%).

5.3.2.3. Análisis del procedimiento constructivo según la finalización de la ejecución

Luego de finalizada la construcción del puente Pampa blanca, los costos de las partidas tuvieron variaciones, debido a los metrados totales ejecutados. En ese sentido, en la Tabla 5.4 se detalla el costo por partida ejecutada. Así como también, se determina que el costo directo de ejecución alcanzó los S/ 1, 079 669.39 (Un millón setenta y nueve mil seiscientos sesenta y nueve con 39/00 soles) [32].

Tabla 5.4: Detalle del presupuesto de liquidación del puente Pampa Blanca.

ACTIVIDADES	Unidad	Metrado	P.U. (PEN)	Parcial (PEN)
01. Excavación en seco				S/. 3,352.04
01.01 Estribos	m3	1,392.21	2.15	2,993.25
01.02 Pilar	m3	166.88	2.15	358.79
02. Excavación bajo agua (ESTRIBO)	m3	870.01	3.64	S/. 3,166.84
03. Plataforma de trabajo (PILAR)	m2	157.59	7.06	1,112.59
04. Acero fy=4200kg/cm2				S/. 122,082.16
04.01 Estribos	kg	40,659.28	2.01	81,725.16
04.02 Pilar	kg	20,078.11	2.01	40,357.00
05. Borde cortante del caisson				S/. 63,300.06
05.01 Estribos	m	88.00	482.47	42,457.36
05.02 Pilar	m	43.20	482.47	20,842.70
06. Encofrado no visto en seco				S/. 70,191.06
06.01 Estribos	m2	1,099.50	42.96	47,234.52
06.02 Pilar	m2	534.37	42.96	22,956.54
07. Encofrado curvo en seco	m2	56.55	71.45	S/. 4,040.50
08. Encofrado cara vista en seco				S/. 14,543.10
08.01 Estribos	m2	190.00	51.48	9,781.20
08.02 Pilar	m2	92.50	51.48	4,761.90
09. Concreto f'c=210kg/cm2 en seco				S/. 189,467.24
09.01 Estribos	m3	450.68	283.07	127,573.99
09.02 Pilar	m3	218.65	283.07	61,893.26
10. Concreto f'c=210kg/cm2 b/agua (tapa de caisson)				S/. 75,361.14
10.01 Estribos	m3	178.10	289.65	51,586.67
10.02 Pilar	m3	82.08	289.65	23,774.47
11. Concreto f'c=210kg/cm2 bajo agua (tapón de caisson)				S/. 175,328.04
11.01 Estribos	m3	411.08	289.65	119,069.32
11.02 Pilar	m3	194.23	289.65	56,258.72
12. Concreto ciclópeo bajo agua +30% piedra grande				S/. 111,392.07
12.01 Estribos	m3	419.86	181.58	76,238.18
12.02 Pilar	m3	193.60	181.58	35,153.89
13. Excavación para hincado de Caisson				S/. 232,636.72
13.01 Estribos	m3	1,557.88	94.06	146,534.19
13.02 Pilar	m3	915.40	94.06	86,102.52
14. Relleno compactado de estructuras				S/. 13,695.85
14.01 Estribos	m3	450.45	20.13	9,067.56
14.02 Pilar	m3	229.92	20.13	4,628.29

Fuente: Propia.

Del costo de ejecución de los *caisson* se obtiene que la partida total de concreto tiene una incidencia de 40.72% respecto del costo directo y que la partida de excavación para el hincado tiene una incidencia de 21.55%. Esto refleja que ambas partidas son representativas para su construcción y deben mejorarse mediante procedimiento constructivo y/o tecnología.

Por añadidura, las partidas pertenecientes a la ejecución del Falso Fuste tuvieron un metrado igual a cero, y de ello se infiere que este elemento no fue necesario para la ejecución del método, lo que significó un menor costo del mismo.

a) Cronograma de liquidación

En el **Anexo N°07** se detalla el cronograma real ejecutado para la construcción del Puente Pampa Blanca, a partir de este elemento se pudo contabilizar los días de ejecución, reales, de cada partida y servirá de input para calcular los rendimientos reales por partida ejecutada. En la Tabla 5.5 se presentan los tiempos de cada partida.

Tabla 5.5: Tiempo de ejecución y metrado de las partidas necesarias para la fundación del puente Pampa Blanca

DESCRIPCIÓN	UND	Metrado	Tiempo (días)
01. Excavación en seco	m3	1559.09	12
02. Excavación bajo agua (ESTRIBO)	m3	870.01	17
03. Plataforma de trabajo (PILAR)	m2	157.59	5
04. Acero $f_y=4200\text{kg/cm}^2$	kg	60737.39	62
05. Borde cortante del caisson	m	131.20	14
06. Encofrado no visto en seco	m2	1633.87	66
07. Encofrado curvo en seco	m2	56.55	8
08. Encofrado cara vista en seco	m2	282.50	50
09. Concreto $f'_c=210\text{kg/cm}^2$ en seco	m3	669.33	60
10. Concreto $f'_c=210\text{kg/cm}^2$ b/agua (tapa de caisson)	m3	260.18	17
11. Concreto $f'_c=210\text{kg/cm}^2$ bajo agua (tapón de caisson)	m3	605.31	21
12. Concreto ciclópeo bajo agua +30% piedra grande	m3	613.46	14
13. Excavación para hincado de Caisson	m3	2473.28	38
14. Relleno compactado de estructuras	m3	680.37	10

Fuente: Propia.

b) Rendimientos

Los rendimientos de las partidas ejecutadas se calcularon a partir de la *Ec. 1*, donde se tomó en cuenta el cronograma de liquidación, la cantidad de obreros, detallada en el análisis de precios unitarios, y el metrado final ejecutado. De esta forma, en la Tabla 5.6

se detalla los rendimientos obtenidos y la cantidad de horas hombre necesario para cada actividad. Se identifica que la partida que requirió de mayor recurso humano fue el Concreto $f_c=210$ kg/cm² en seco con un total de 5, 889.0 hh, lo cual corresponde a un bajo rendimiento de 8.80hh/m³.

Tabla 5.6: Rendimientos de la ejecución del puente Pampa Blanca.

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	METRAJE PUENTE	DURACION (DIAS)	RAPIDEZ (UND/DIA)	CUADRILLA	JORNADA	RENDIMIENTO	METRAJE CAISSON	HH
01. Excavación en seco	m3	1,559.09	12	130	4.2	8.00	0.26	1,559.09	404
02. Excavación bajo agua (ESTRIBO)	m3	870.01	17	51	4.2	8.00	0.66	870.01	572
03. Plataforma de trabajo (PILAR)	m2	157.59	5	32	1.2	8.00	0.30	157.59	48
04. Acero fy=4200kg/cm2	kg	122,397.98	90	1360	3.1	8.00	0.02	60,737.39	1,108
05. Borde cortante del caisson	m	131.20	14	9	2.5	8.00	2.13	131.20	280
06. Encofrado no visto en seco	m2	2,462.59	89	28	4.2	8.00	1.21	1,633.87	1,985
07. Encofrado curvo en seco	m2	56.55	8	7	4.2	8.00	4.75	56.55	269
08. Encofrado cara vista en seco	m2	793.86	77	10	4.2	8.00	3.26	282.50	921
09. Concreto f'c=210kg/cm2 en seco	m3	922.06	78	12	13	8.00	8.80	669.33	5,889
10. Concreto f'c=210kg/cm2 b/agua (tapa de caisson)	m3	291.49	18	16	13	8.00	6.42	260.18	1,671
11. Concreto f'c=210kg/cm2 bajo agua (tapón de caisson)	m3	605.31	21	29	13	8.00	3.61	605.31	2,184
12. Concreto ciclópeo bajo agua +30% piedra grande	m3	613.46	14	44	13	8.00	2.37	613.46	1,456
13. Excavación para hincado de Caisson	m3	2,473.28	38	65	13	8.00	1.60	2,473.28	3,952
14. Relleno compactado de estructuras	m3	2,252.18	40	56	17	8.00	2.42	680.37	1,644

Fuente: Propia.

5.3.2.4 Discusión entre la propuesta inicial y la finalización de la ejecución

En base al procesamiento, de la data obtenida de los informes: definitivo y de liquidación, se describe lo siguiente:

En la Tabla 5.7 se compara (inicio vs final) los rendimientos y la cantidad total de horas hombre por partida, donde se identifica que la diferencia de rendimientos del procedimiento “Excavación para hincado de *caisson*” tiene la mayor variación, 7.07hh/m³, puesto que el rendimiento presupuestado fue de 8.67hh/m³ mientras que el rendimiento en obra fue de 1.60hh/m³. Entonces, se percibe que una de las causas de la abrupta variación de la “Excavación para hincado de *caisson*” es la especialización del personal, el uso de Winche eléctrico y el procedimiento en sí, ya que con la misma cantidad de cuadrilla se logra excavar un volumen mayor.

Tabla 5.7: Comparación de rendimientos y cantidad total de horas hombre por partida entre la propuesta inicial y la finalización de la ejecución del puente Pampa Blanca.

Partida	UND	RENDIMIENTOS			HORAS-HOMBRE		
		Inicial	Final	Variación	Inicial	Final	Variación
01. Excavación en seco	m3	0.06	0.26	0.20	114	404	-290
02. Excavación bajo agua (ESTRIBO)	m3	0.06	0.66	0.60	7	572	-565
03. Plataforma de trabajo (PILAR)	m2	0.01	0.30	0.29	3	48	-45
04. Acero fy=4200kg/cm2	kg	0.10	0.03	-0.07	5585	1108	4477
05. Borde cortante del caisson	m	0.67	2.13	1.47	88	280	-192
06. Encofrado no visto en seco	m2	2.24	1.36	-0.88	3732	1985	1747
07. Encofrado curvo en seco	m2	3.36	4.75	1.39	191	269	-78
08. Encofrado cara vista en seco	m2	2.80	5.95	3.15	791	921	-130
09. Concreto f'c=210kg/cm2 en seco	m3	6.50	9.32	2.82	4374	5889	-1515
10. Concreto f'c=210kg/cm2 b/agua (tapa de caisson)	m3	6.50	6.80	0.30	1692	1671	21
11. Concreto f'c=210kg/cm2 bajo agua (tapón de caisson)	m3	6.50	3.61	-2.89	3935	2184	1751
12. Concreto ciclópeo bajo agua +30% piedra grande	m3	5.78	2.37	-3.40	3545	1456	2089
13. Excavación para hincado de Caisson	m3	8.67	1.60	-7.07	26619	3952	22667
14. Relleno compactado de estructuras	m3	3.02	2.00	-1.02	2057	1644	413
15.01 Encofrado no visto en seco	m2	PARTIDAS NO EJECUTADAS			302	0	302
15.02 Acero fy=4200kg/cm2	kg				95	0	95
15.03 Concreto f'c=175 kg/cm2 en seco	m3				158	0	158
15.04 Demolición de Falso fuste	m3				40	0	40

Fuente: Propia

También, se evalúa que los rendimientos de las partidas de Encofrado son altos debido a que el recurso utilizado es la madera y este material requiere de mayor esfuerzo para armar la obra falsa, en total 3, 175hh, es decir el 14.18% del total de hh. El rendimiento de esta actividad puede ser mejorado haciendo uso de un sistema de encofrados metálicos que optimice el procedimiento constructivo y el costo de ejecución. Además, se observa que la excavación para hincado de *caisson* y la partida Concreto, según las horas hombre ejecutadas, representan un 17.66% y 43.53%, respectivamente.

En la Tabla 5.8 se muestra la comparación del tiempo de ejecución de cada actividad, dónde el signo positivo (+) significa que el tiempo real de ejecución fue mayor al presupuestado y el signo negativo (-) que el presupuestado fue mayor al real ejecutado. Las partidas de encofrado, en conjunto, tuvieron una mayor duración debido a mayores metrados, y del mismo modo, el tiempo de excavación para hincado se redujo debido a menores cantidades ejecutadas. Por el contrario, la colocación de concreto no tuvo variación en su metrado y sin embargo, el tiempo real de ejecución, 98 días, fue menor al tiempo programado, 154 días. Esto indica que la actividad ejecutada tuvo un mejor desarrollo, no obstante, las partidas de concreto son las de menor rendimiento.

Tabla 5.8: Comparación de los tiempos de ejecución por partida de los *caisson* del puente Pampa blanca.

Partida	UND	INICIAL	FINAL	COMPARACIÓN
01. Excavación en seco	m3	7.00	12.00	+
02. Excavación bajo agua (ESTRIBO)	m3	3.00	17.00	+
03. Plataforma de trabajo (PILAR)	m2	3.00	5.00	+
04. Acero $f_y=4200\text{kg/cm}^2$	kg	93.00	62.00	-
05. Borde cortante del caisson	m	7.00	14.00	+
06. Encofrado no visto en seco	m2	79.00	66.00	-
07. Encofrado curvo en seco	m2	7.00	8.00	+
08. Encofrado cara vista en seco	m2	10.00	50.00	+
09. Concreto $f'c=210\text{kg/cm}^2$ en seco	m3	103.00	60.00	-
10. Concreto $f'c=210\text{kg/cm}^2$ b/agua (tapa de caisson)	m3	15.00	17.00	+
11. Concreto $f'c=210\text{kg/cm}^2$ bajo agua (tapón de caisson)	m3	36.00	21.00	-
12. Concreto ciclópeo bajo agua +30% piedra grande	m3	36.00	14.00	-
13. Excavación para hincado de Caisson	m3	79.00	38.00	-
14. Relleno compactado de estructuras	m3	3.00	10.00	+
15.01 Encofrado no visto en seco	m2	PARTIDAS NO EJECUTADAS		
15.02 Acero $f_y=4200\text{kg/cm}^2$	kg			
15.03 Concreto $f'c=175\text{ kg/cm}^2$ en seco	m3			
15.04 Demolición de Falso fuste	m3			

Fuente: Propia

5.4 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO *WELL FOUNDATION*

Las ventajas del procedimiento constructivo *Well foundation*, se determinan a partir de las entrevistas a los especialistas y el análisis de la ejecución de la construcción del puente Pampa Blanca. En ese sentido, se presentan a continuación:

- No presenta riesgo de deslizamiento lateral de terreno.

- El procedimiento constructivo es apto para todo tipo de terreno.
- Vaciado de concreto en seco.
- No hay presencia de flujo de agua horizontal al momento de vaciar el concreto.

Respecto a las desventajas del procedimiento constructivo *Well foundation* se tienen lo siguiente:

- Desplome de *caisson* durante la excavación para hincado del elemento.
- Fricción lateral, actuante, durante el hincado.
- Plataforma de trabajo en la superficie.
- Encofrado a doble cara.
- Estructura diseñada con mayor peso para que pueda descender por efectos de la gravedad.
- Uso de plancha metálica para borde cortante.

CAPITULO 6 : PROPUESTA DE MEJORA DEL PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO PARA CAISSON DE CONCRETO

6.1. CONDICIONES DE OPTIMIZACIÓN

6.1.1. Procedimiento constructivo

El proceso constructivo de los *caisson* de concreto empleado en el Puente Pampa blanca se ejecutó según el procedimiento *Well foundation*; sin embargo, este procedimiento incurre en mayores esfuerzos como, por ejemplo, construir un brocal que facilite el hincado, colocar encofrado exterior e interior, mayor tiempo de desencofrado, y por último, en necesitar de una plataforma de trabajo para la construcción de los anillos.

Tomando en cuenta lo anteriormente descrito, se plantea mejorar el procedimiento constructivo de los *caisson* de concreto, a través de un procedimiento inverso, donde primero se excavará para luego construir cada uno de los anillos, a este procedimiento se le denominará Bajo la superficie. Es decir, se deberá excavar desde la cota cero hasta una profundidad entre 1.0 y 1.5 m, luego se habilitará y colocará el acero de refuerzo, anclando en tierra aproximadamente la mitad de su longitud de empalme para que pueda unirse con el anillo sucesivo. Consecutivamente, se colocará la obra falsa con apuntalamiento interno para asegurar su estabilidad ante la presión del concreto. Es preciso indicar, que a partir del segundo anillo las paredes del núcleo del *caisson* de concreto deben tener una inclinación, evaluada estructuralmente, para que el concreto pueda ser vertido y vibrado. Además, se propone desencofrar pasadas las 24 horas del vaciado, ya que los elementos verticales no requieren mucho tiempo de encofrado. Se determina también que los anillos pertenecientes al núcleo de concreto deberán tener una inclinación mínima de 5° y el último anillo una inclinación menor a la del ángulo de fricción del suelo, siempre respetando la evaluación estructural. En la Figura 6.1 se

observa el esquema final de los *caisson* de concreto ejecutados mediante el procedimiento propuesto Bajo la Superficie.

Figura 6.1: Sección transversal del *caisson* de concreto ejecutado por el procedimiento Bajo la Superficie.

Fuente: propia.

Por efectos de procedimiento se deberán considerar tres recursos importantes. Primero, para vaciar de manera óptima y segura, se colocará el concreto utilizando un balde cónico de descarga, el cual se debe acoplar a un Winche eléctrico. Segundo, entre anillos se adherirán juntas *water stop* para garantizar la estanqueidad, resistencia a la contracción, dilatación y fuertes presiones de agua. Tercero, para prevenir posibles deslizamientos horizontales, la condición de excavación será en seco; es por ello que se deben utilizar bombas sumergibles como pieza importante de la propuesta de mejora, Bajo la Superficie, ya que éstas por ser recubiertas con un tubo filtrante resisten más horas encendidas que las motobombas.

6.1.2. Materiales

Con respecto a los materiales a optimizar, se ha tomado en consideración sustituir al encofrado de madera por el encofrado metálico, incluyendo el apuntalamiento interno; ya que del análisis de las partidas a ejecutar en los *caisson* del puente Pampa blanca, se evidenció que el encofrado de madera tenía bajo rendimiento, es decir, que se requería de mayor esfuerzo en su habilitación y colocación.

6.2. OPINIÓN DE ESPECIALISTAS EN EL DISEÑO Y/O CONSTRUCCIÓN DE PUENTES SOBRE EL PROCEDIMIENTO BAJO LA SUPERFICIE

La segunda etapa de las entrevistas realizadas, descritas en el capítulo V, se basa en la opinión y recomendación de especialistas en diseño y/o construcción de puentes del procedimiento constructivo Bajo la superficie. Así, se precisa que el 100% de los expertos infiere en realizar un análisis estructural para determinar el ángulo de inclinación de las paredes de núcleo de *caisson*, ya que cada tipo de suelo tiene sus propiedades y por ende cada proyecto es único.

Por su parte, los ingenieros Duran Freddy, Bragagnini Ivan y Lama José determinaron que el método en mención es óptimo y práctico, siempre y cuando la profundidad del *caisson* de concreto no sea mayor a una profundidad aproximada de 15 metros. Asimismo, el ingeniero Mayhuire Eduardo mencionó que el procedimiento Bajo agua denotaba ser versátil y trabajable, ya que no se tiene que controlar el hincado de *caisson* y/o el exceso de fricción lateral; pero también, hizo hincapié en el control de las aguas subterráneas para evitar desplazamientos horizontales. Por su parte, el ingeniero Esteban Ortiz pronunció que la propuesta de mejora, Bajo la superficie, tiene ventajas económicas y estructurales; tales como, la reducción de su espesor, mayor resistencia friccionante debido a su forma dentada y la eliminación de la cámara de trabajo, ya que no es imprescindible la resistencia a la fricción por punta.

Si bien la propuesta de mejora optimiza el uso de encofrado, igual se debe considerar un porcentaje de encofrado perdido dentro del costo directo, así éste no sea utilizado. En ese sentido, el ingeniero Giuliano Otárola recomendó que para que el procedimiento constructivo Bajo la superficie no se encarezca, se debe tener como restricción que la ejecución sea en ríos no permanentes.

6.3. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO BAJO LA SUPERFICIE

Las ventajas del procedimiento Bajo la Superficie, se determinan mediante las entrevistas a los especialistas y el análisis del mismo; éstas se describen a continuación:

- Encofrado a una sola cara.
- Se elimina la excavación para hincado de *caisson* disminuyendo los retrasos por desplome.
- Procedimiento constructivo sectorizable.
- *Caisson* de concreto con menor espesor respecto del diseño estructural para un procedimiento *Well foundation*.
- No se requiere del borde cortante en el *caisson*.
- No es necesaria la compactación de una plataforma de trabajo.
- No se requiere de encofrado curvo en seco para Brocal.
- Las paredes del núcleo de *caisson* tiene mayor resistencia friccionante debido a su forma dentada.
- No se requiere relleno y compactación después de la excavación (depende del modelo de *caisson*).

A continuación, se describen las desventajas:

- Se debe incluir un porcentaje de encofrado perdido, de preferencia a partir del segundo anillo o según las propiedades del suelo.
- Profundidad máxima de construcción aproximadamente 15m.
- No óptimo en arenas.
- Se debe adicionar, dentro del procedimiento constructivo, recursos tecnológicos como las juntas *wáter stop*.
- La construcción de *caisson* debe ser únicamente en ríos no permanentes.

CAPITULO 7 : RESULTADOS Y REVISIÓN DE LA PROPUESTA DE MEJORA

7.1. RESULTADOS DEL PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO BAJO LA SUPERFICIE

Para determinar cuantitativamente la mejora del procedimiento constructivo Bajo la superficie respecto del procedimiento tradicional *Well foundation*, se analizó el costo total generado por la suma de los costos parciales de todas las partidas necesarias para la ejecución de los *caisson* de concreto del puente Pampa Blanca y Río Tambo, según cada geometría.

Es preciso resaltar que para realizar el análisis y comparación entre los presupuestos de los puentes Pampa Blanca y Río Tambo se actualizó el análisis de precios unitarios (APUS), de cada una de las partidas relacionadas con la construcción de los *caisson*, al año 2013 y, posteriormente, se calculó de reajuste económico (K) para actualizar el costo total a agosto del 2017.

7.1.1. Puente Pampa Blanca

Para determinar la variación económica porcentual entre el procedimiento *Well foundation* y la propuesta de mejora Bajo la superficie, se actualizó el análisis de precios unitarios del puente Pampa Blanca, al año 2013, ver el **Anexo N°08** y se generaron las tablas 7.1 y 7.2 que contienen el nombre de la partida, unidad de medida, metrado, precio unitario, costo parcial y directo, al año 2013, del procedimiento constructivo *Well foundation* y Bajo la superficie, respectivamente.

Por su parte, el costo directo, al año 2013, de los *caisson* del puente Pampa blanca asciende a S/ 2, 628,851.73 (Dos millones seiscientos veintiocho mil ochocientos cincuenta y uno con 73/100 soles); sin embargo, desciende a S/ 2, 561,977.15 (Dos millones quinientos sesenta y un mil novecientos setenta y siete con 15/100 soles) debido al reajuste económico a agosto del 2017, siendo el factor de reajuste (K) igual a 0.9746.

Tabla 7.1: Costo directo de los *caissons* de concreto del puente Pampa Blanca mediante el procedimiento constructivo *Well foundation*

COSTO DIRECTO - WELL FOUNDATION				
Partida	Unidad	Metrado	P.U. (S/)	Parcial
01. Excavación en seco	m3	1,559.09	3.91	6,090.44
02. Excavación bajo agua	m3	870.01	17.15	14,920.67
03. Plataforma de trabajo	m2	157.59	15.85	2,497.72
04. Acero fy=4200kg/cm2	kg	60,737.39	4.84	293,968.97
05. Borde cortante del caisson	m	131.20	777.90	102,060.48
06. Encofrado no visto en seco	m2	1,633.87	81.47	133,112.04
07. Encofrado curvo en seco	m2	56.55	125.83	7,115.69
08. Encofrado cara vista en seco	m2	282.50	94.69	26,749.93
09. Concreto f'c=210kg/cm2 en seco	m3	669.33	366.67	245,423.23
10. Concreto f'c=210kg/cm2 b/agua (tapa de caisson)	m3	260.18	394.33	102,596.78
11. Concreto f'c=210kg/cm2 bajo agua (tapón de caisson)	m3	605.31	394.33	238,691.89
12. Concreto ciclópeo bajo agua +30% piedra grande	m3	613.46	365.37	224,139.88
13. Excavación para hincado de Caisson	m3	2,473.28	478.97	1,184,626.92
14. Relleno compactado de estructuras	m3	680.37	68.87	46,857.08
TOTAL				2,628,851.73

k=	0.97456	Presupuesto 2013	2,628,851.73
		Presupuesto 2017	2,561,977.15

Fuente: Propia

Tabla 7.2: Costo directo de los *caissons* de concreto del puente Pampa Blanca mediante el procedimiento Bajo la superficie.

COSTO DIRECTO - PROPUESTA DE MEJORA PC Y MAT				
Partida	Unidad	Metrado	P. U. (S/)	Parcial
01. Excavación en seco	m3	1,559.09	3.91	6,096.04
02. Excavación bajo agua	m3	870.01	17.15	14,920.67
04. Acero fy=4200kg/cm2	kg	60,737.39	4.84	293,968.97
06. Encofrado no visto B/AGUA	m2	1,021.68	86.97	88,855.87
09. Concreto f'c=210kg/cm2 B/AGUA	m3	577.44	414.79	239,516.34
10. Concreto f'c=210kg/cm2 b/agua (tapa)	m3	260.18	410.65	106,842.92
11. Concreto f'c=210kg/cm2 bajo agua (tapón)	m3	323.73	410.65	132,938.08
12. Concreto ciclópeo bajo agua +30% piedra grande	m3	613.46	365.37	224,139.88
13. Excavación para hincado de Caisson	m3	1,674.57	588.04	984,714.14
15. Encofrado Perdido	m2	784.19	86.97	68,200.99
16. Junta Water Stop	m	824.60	16.72	13,784.18
TOTAL				2,173,978.08

k= 0.9696 Presupuesto 2013 2,173,978.08
Presupuesto 2017 2,107,888.81

Fuente: Propia

Asimismo, en la tabla 7.2 se visualiza que para el procedimiento Bajo la superficie se eliminan partidas que eran necesarias en el procedimiento *Well foundation*; tales como, plataforma de trabajo, borde cortante del *caisson*, encofrado curvo en seco, encofrado cara vista en seco y relleno compactado de estructuras. Se intercambia la partida de excavación para hincado de *caisson* por sólo excavación, ya que ésta será de manera descendente. También, se adhieren las partidas de encofrado perdido y juntas *wáter stop* como medida preventiva al deslizamiento horizontal e infiltración de agua; y, además, se agrega como equipo un balde cónico de descarga en la partida de Concreto y se sustituye una motobomba por una electrobomba sumergible dentro de la partida Excavación. Los **Anexos N° 10 y 11** contienen la cotización del balde cónico de descarga y la electrobomba sumergible, respectivamente. En consecuencia, a lo expuesto, el costo directo al año 2013 asciende a S/ 2, 173,978.08 (Dos millones ciento setenta y tres mil novecientos setenta y ocho con 08/100 soles) pero multiplicado por el coeficiente de reajuste K= 0.9696, el costo directo a agosto del 2017 desciende a S/ 2, 107,888.81 (Dos millones ciento siete mil ochocientos ochenta y ocho con 81/100 soles).

Luego de evaluar el costo directo del puente Pampa Blanca, a agosto del 2017, se calculó la variación económica (porcentual) entre los costos directos del procedimiento *Well foundation* y Bajo la superficie. También se evaluó la variación porcentual del tiempo de

ejecución de cada partida y según el procedimiento seguido, dicha información se visualiza en la tabla 7.3.

Tabla 7.3: Resumen de la variación porcentual, económica y de tiempo, del procedimiento Bajo la superficie respecto del procedimiento *Well foundation*

PARTIDAS	WELL FOUNDATION		PROPUESTA DE MEJORA		%DE MEJORA	
	COSTO (\$/)	TIEMPO (días)	COSTO (\$/)	TIEMPO (días)	COSTO	TIEMPO
Plataforma de Trabajo	2,497.72	5	-	0	100%	100%
Borde Cortante	102,060.48	14	-	0	100%	100%
Encofrado no visto en seco	133,112.04	60	88,855.87	42	33%	30%
Encofrado curvo en seco	7,115.69	8	-	0	100%	100%
Encofrado cara vista en seco	26,749.93	28	-	0	100%	100%
Encofrado Total	166,977.65	96	88,855.87	42	47%	56%
Excavación para hincado	1,184,626.92	38	984,714.14	26	17%	32%
Concreto f'c=210kg/cm2 en seco	245,423.23	57	239,516.34	52	2%	9%
Concreto f'c=210kg/cm2 bajo agua (tapón)	341,288.67	21	239,781.00	12	30%	43%
Relleno compactado de estructuras	46,857.08	13	-		100%	100%
Encofrado perdido	-	-	68,200.99	32	-	-
Junta Water Stop	-	-	13,784.18	42	-	-

Fuente: Propia.

De la tabla anterior, se puede apreciar que la variación porcentual o de mejora del procedimiento *Well foundation*, con mejor resultado, está representado por la nulidad de la partida; sin embargo, para el procedimiento Bajo la superficie se adicionan dos partidas, encofrado perdido (5 anillos de 1.12 m y 1 anillo de 1.54 m) y juntas *Water stop* que son necesarias para la ejecución de los *caisson* de concreto. Otra variación porcentual significativa es la del encofrado total con 47% en costo y 56% en tiempo, luego está el concreto bajo agua con 30% en costo y 43% en tiempo y la excavación para hincado con 17% en costo y 32% en tiempo. Asimismo, el concreto en seco tiene una baja variación porcentual debido a que su metrado no es tan incidente en la ejecución de *caisson* de concreto.

Entonces, la variación porcentual final de la propuesta de mejora Bajo la superficie, respecto del procedimiento constructivo *Well foundation*, para la construcción de los *caisson* del puente Pampa Blanca, asciende a 17.72%, ver tabla 7.4.

Tabla 7.4: Variación económica final del procedimiento Bajo la superficie, respecto del procedimiento *Well foundation* en la construcción de los *caisson* del puente Pampa Blanca.

	COSTO (S/)	TIEMPO (meses)
WELL FOUNDATION (S/)	2,561,977.15	3.5
PROPUESTA DE MEJORA (S/)	2,107,888.81	3
%VAR	17.72%	14.29%

Fuente: Propia.

7.1.2. Puente Río Tambo

La variación económica porcentual, en la construcción de los *caisson* de concreto del puente Río Tambo, se determinó de manera similar al del puente Pampa Blanca; los análisis de precios unitarios actualizados se visualizan en el *Anexo N°09*. Sin embargo, la variación porcentual final es menor al de dicho puente (Pampa blanca 17.72% y Río Tambo 17.38%) y eso, se debe a la verticalidad externa de los *caisson* del puente Río Tambo.

Todas las partidas involucradas en la ejecución de los *caisson* de concreto se visualizan en la tabla 7.5 donde el procedimiento *Well foundation* indica que el costo total al año 2013 asciende a S/ 4, 902,525.66 (Cuatro millones novecientos dos mil quinientos veinte cinco con 66/100 Soles), el cual se incrementa a S/ 5, 229,443.36 (Cinco millones doscientos veintinueve mil cuatrocientos cuarenta y tres con 36/100 Soles) debido al reajuste económico a agosto del 2017, siendo “K” igual a 1.0667.

Tabla 7.5: Costo directo de los *caisson* de concreto del puente Río Tambo mediante el procedimiento constructivo *Well foundation*.

COSTO DIRECTO RÍO TAMBO - WELL FOUNDATION				
Partida	Unidad	Metrado	P.U. (S/)	Parcial
1. Excavación en seco	m3	1,352.880	14.350	19,413.83
2. Excavación bajo agua	m3	3,156.710	23.330	73,646.04
3. Excavación para hincado de caisson	m3	6,087.000	157.670	959,737.29
4. Encofrado y desencofrado en seco	m2	1,402.250	54.020	75,749.55
5. Encofrado y desencofrado bajo agua	m2	3,271.930	95.170	311,389.58
6. Acero $f_y=4200\text{kg/cm}^2$	kg	68,938.230	4.560	314,358.33
7. Concreto clase D $f'_c=210\text{kg/cm}^2$ (en seco)	m3	738.980	455.900	336,900.98
8. Concreto D $f'_c=210\text{ kg/cm}^2$ (b/a)	m3	1,724.280	480.870	829,154.52
9. Concreto clase E $f'_c=175\text{kg/cm}^2$	m3	4,383.090	421.900	1,849,225.67
10. Borde cortante de caisson	kg	18,388.640	7.230	132,949.87
TOTAL				4,902,525.66

K= 1.06668353	Presupuesto 2013	4,902,525.6580
	Presupuesto 2017	5,229,443.3590

Fuente: Propia.

Por otro lado, con el procedimiento Bajo la superficie se eliminan las partidas de Encofrado y desencofrado en seco y Borde cortante de *caisson*, pero también se incrementa el metrado de algunas partidas; como, por ejemplo, el acero y el concreto clase D en seco. Además, se adhieren las partidas de encofrado perdido y juntas *water stop*, netamente por procedimiento, lo que produce un incremento en el costo de construcción de los *caisson*. La tabla 7.6 resume el costo parcial de cada una de las partidas del puente Río Tambo y determina que el costo directo, siguiendo el procedimiento Bajo la superficie, a agosto del 2017 asciende a S/ 4, 320,641.71 (Cuatro millones trescientos veinte mil seiscientos cuarenta y uno con 71/100 soles), ya que el factor de reajuste “K” es igual a 1.0631.

En líneas generales, la partida con mayor índice de mejora fue el concreto clase E donde el costo se optimizaría un 24% y el tiempo de ejecución un 32%, según lo dispuesto para el procedimiento *Well foundation*. Por su parte, el concreto clase D optimaría un 3% de su costo, pero aumentaría un 7% de su tiempo planificado para el procedimiento convencional, de la misma manera otras partidas involucradas en la construcción de los *caisson* del puente Río tambo optimizaron o aumentaron su costo y tiempo, la tabla 7.7 contiene el detalle cuantitativo.

Tabla 7.6: Costo directo de los *caissons* de concreto del puente Río Tambo mediante el procedimiento Bajo la superficie

COSTO DIRECTO RÍO TAMBO - BAJO LA SUPERFICIE				
Partida	Unidad	Metrado	P.U. (S/)	Parcial
1. Excavación en seco	m3	1,352.88	14.35	19,413.83
2. Excavación bajo agua	m3	3,156.71	29.13	91,954.96
3. Excavación para hincado de caisson	m3	5,961.00	126.11	751,741.71
5. Encofrado y desencofrado bajo agua	m2	2,815.16	95.17	267,918.78
6. Acero $f_y=4200\text{kg/cm}^2$	kg	69,954.13	4.56	318,990.83
7. Concreto clase D $f'_c=210\text{kg/cm}^2$ (en seco)	m3	757.34	455.48	344,953.22
8. Concreto clase D $f'_c=210\text{ kg/cm}^2$ (b/a)	m3	1,767.13	487.06	860,698.34
9. Concreto clase E $f_c=175\text{kg/cm}^2$	m3	3,476.38	429.79	1,494,113.36
11. Encofrado perdido	m2	1,560.80	54.96	85,781.57
12. Junta Water Stop	m	1,063.48	15.37	16,345.69
TOTAL				4,251,912.29

Presupuesto 2013 4,251,912.29
Presupuesto 2017 4,320,641.71
 K= 1.016164356

Fuente: Propia

Tabla 7.7: Resumen de la variación porcentual, económica y de tiempo, del procedimiento Bajo la superficie respecto del procedimiento *Well foundation*.

DESCRIPCIÓN	WELL FOUNDATION		PROPUESTA DE MEJORA		%DE MEJORA	
	COSTO (S/)	TIEMPO (días)	COSTO (S/)	TIEMPO (días)	COSTO	TIEMPO
1. Excavación en seco	20,708.41	5	19,413.83	5	6%	0%
2. Excavación bajo agua	78,557.02	67	91,954.96	65	-17%	3%
3. Excavación para hincado de caisson	1,023,735.96	118	751,741.71	126	27%	-7%
4. Encofrado y desencofrado en seco	80,800.79	66	-	0	100%	100%
5. Encofrado y desencofrado bajo agua	332,154.13	115	267,918.78	90	19%	22%
6. Acero $f_y=4200\text{kg/cm}^2$	335,320.85	109	318,990.83	110	5%	-1%
7. Concreto clase D $f'_c=210\text{kg/cm}^2$ (en seco)	359,366.73	11	344,953.22	15	4%	-36%
8. Concreto D $f'_c=210\text{ kg/cm}^2$ (b/a)	884,445.47	111	860,698.34	119	3%	-7%
9. Concreto clase E $f_c=175\text{kg/cm}^2$	1,972,538.56	25	1,494,113.36	17	24%	32%
10. Borde cortante de caisson	141,815.43	26	-	0	100%	100%
11. Encofrado perdido	-	0	85,781.57	4	-	-
12. Junta Water Stop	-	0	16,345.69	2	-	-

Fuente: Propia.

Finalmente, se calcula que la optimización porcentual total, entre los procedimientos *Well foundation* y Bajo la superficie, de la construcción de los *caisson* de concreto del puente Río tambo es de 17.38% el costo y 8.33% el tiempo de ejecución, ver tabla 7.8.

Tabla 7.8: Variación económica total del procedimiento Bajo la superficie, respecto del procedimiento *Well foundation*, en la construcción de *caisson* del Puente Río Tambo.

	COSTO (S/)	TIEMPO (meses)
WELL FOUNDATION (S/)	5,229,443.36	6
PROPUESTA DE MEJORA (S/)	4,320,641.71	5.5
%VAR	17.38%	8.33%

Fuente: Propia.

7.2. RESULTADOS DEL USO DE RECURSOS TECNOLÓGICOS EN EL PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO BAJO LA SUPERFICIE

Si bien existe una optimización en el procedimiento constructivo Bajo la superficie, respecto del procedimiento *Well foundation*, ésta puede ser mejorada si se sustituye el uso de encofrado de madera por el de encofrado metálico. Para determinar el porcentaje de optimización se utilizó el presupuesto de los puentes Pampa Blanca y Río Tambo.

7.2.1. Puente Pampa Blanca

De lo expresado, se determina que para la construcción de los *caisson* de concreto del puente Pampa Blanca se evalúa la variación de costos del uso de dos (02) juegos de encofrado metálico de 1.15m y un juego de 1.55 m, por *caisson*. En el *Anexo N°12* se visualiza el precio del alquiler mensual del encofrado metálico, que sirve para ajustar el costo directo de la ejecución del procedimiento constructivo Bajo la superficie utilizando el ya mencionado recurso tecnológico, la tabla 7.9 muestra el detalle.

Tabla 7.9: Costo directo de los *caissons* de concreto del puente Pampa blanca considerando encofrado metálico

COSTO DIRECTO - PROPUESTA DE MEJORA PC Y MAT				
Partida	Unidad	Metrado	P. U. (S/)	Parcial
01. Excavación en seco	m3	1,559.09	3.91	6,096.04
02. Excavación bajo agua	m3	870.01	17.15	14,920.67
04. Acero $f_y=4200\text{kg/cm}^2$	kg	60,737.39	4.84	293,968.97
06. Encofrado no visto B/AGUA	m2	1,021.68	48.11	49,153.40
09. Concreto $f'_c=210\text{kg/cm}^2$ B/AGUA	m3	577.44	414.79	239,516.34
10. Concreto $f'_c=210\text{kg/cm}^2$ b/agua (tapa de caisson)	m3	260.18	410.65	106,842.92
11. Concreto $f'_c=210\text{kg/cm}^2$ bajo agua (tapón de caisson)	m3	323.73	410.65	132,938.08
12. Concreto ciclópeo bajo agua +30% piedra grande	m3	613.46	365.37	224,139.88
13. Excavación para hincado de Caisson	m3	1,674.57	588.04	984,714.14
15. Encofrado Perdido	m2	784.19	86.97	68,200.99
16. Junta Water Stop	m	824.60	16.72	13,784.18
TOTAL				2,134,275.62

k=	0.9695998	Presupuesto 2013	2,134,275.62
		Presupuesto 2017	2,069,393.31

Fuente: Propia.

De la tabla anterior, se puede constatar que el costo parcial de la partida Encofrado no visto b/agua disminuye S/ 38, 495.50 (treinta y ocho mil cuatrocientos noventa y cinco con 50/00 soles) al sustituir la madera por el metal. Asimismo, el costo directo de la ejecución con el procedimiento Bajo la superficie multiplicado por el factor de reajuste $k= 0.9695$ asciende a S/ 2, 069, 393.31 (dos millones sesenta y nueve mil trescientos noventa y tres con 31/00 soles). En consecuencia, el porcentaje de mejora de costo para la partida de Encofrado no visto bajo agua se actualiza a 63%.

Entonces, debido a los cambios de recurso y posterior mejoría en la optimización del costo y tiempo de ejecución, la tabla 7.10 determina que el valor porcentual de la mejora del procedimiento constructivo Bajo la superficie, respecto del procedimiento *Well foundation*, corresponde a 19.23%.

Tabla 7.10: Variación de costo del puente Pampa Blanca, entre la propuesta de mejora y el procedimiento *Well foundation*

	Costo (\$/)
WELL FOUNDATION	2,561,977.15
PROPUESTA DE MEJORA	2,069,393.31
%VAR	19.23%

Fuente: Propia.

7.2.2. Puente Río Tambo

En la búsqueda de la optimización del procedimiento Bajo la superficie se realizó el cambio del encofrado de madera por un encofrado metálico, como parte de la inclusión de recursos tecnológicos. El impacto de este cambio repercute únicamente en el precio unitario de la partida Encofrado y desencofrado bajo agua.

De lo expresado, se determina que para la construcción de los *caissons* de concreto del puente Río Tambo se considera la variación de costos del uso de un juego de encofrado metálico de 1.02m, tres juegos de 1.22m y tres juegos de 1.42m por cada *caisson*. En el *Anexo N°12* se visualiza el precio del alquiler mensual del encofrado metálico y la tabla 7.11 muestra el detalle del costo directo.

Tabla 7.11: Costo directo del procedimiento constructivo Bajo la superficie reemplazando el encofrado de madera por encofrado metálico

COSTO DIRECTO RÍO TAMBO - BAJO LA SUPERFICIE				
Partida	Unidad	Metrado	P.U. (\$/)	Parcial
1. Excavación en seco	m3	1,352.88	14.35	19,413.83
2. Excavación bajo agua	m3	3,156.71	29.13	91,954.96
3. Excavación para hincado de caisson	m3	5,961.00	126.11	751,741.71
5. Encofrado y desencofrado bajo agua	m2	2,815.16	77.40	217,893.38
6. Acero fy=4200kg/cm2	kg	69,954.13	4.56	318,990.83
7. Concreto clase D f'c=210kg/cm2 (en seco)	m3	757.34	455.48	344,953.22
8. Concreto clase D f'c=210 kg/cm2 (b/a)	m3	1,767.13	487.06	860,698.34
9. Concreto clase E fc=175kg/cm2	m3	3,476.38	429.79	1,494,113.36
11. Encofrado perdido	m2	1,560.80	54.96	85,781.57
12. Junta Water Stop	m	1,063.48	15.37	16,345.69
TOTAL				4,201,886.89

	Presupuesto 2013	4,201,886.89
K= 1.016164	Presupuesto 2017	4,269,807.69

Fuente: Propia.

De la tabla anterior, se puede constatar que el costo parcial de la partida Encofrado y desencofrado bajo agua disminuye S/ 50, 025.10 (cincuenta mil veinticinco con 10/00 soles) al sustituir la madera por el metal. Asimismo, el costo directo de la ejecución con el procedimiento Bajo la superficie multiplicado por el factor de reajuste $k= 1.0161$ asciende a S/ 4, 269 807.69 (cuatro millones doscientos sesenta y nueve mil ochocientos siete con 69/00 soles). En consecuencia, los porcentajes de mejora de costo y tiempo se actualizan a 33% y 35%, respectivamente.

Entonces, debido a los cambios de recurso y consiguiente mejoría en la optimización del costo y tiempo de ejecución, la tabla 7.12 evidencia una variación porcentual positiva de 18.35% del procedimiento constructivo Bajo la superficie, respecto del procedimiento *Well foundation*.

Tabla 7.12: Variación de costo del puente Río Tambo, entre la propuesta de mejora y el procedimiento *Well foundation*

	Costo (S/)
WELL FOUNDATION	5,229,443.36
PROPUESTA DE MEJORA	4,269,807.69
%VAR	18.35%

Fuente: Propia.

7.3. APLICACIÓN DE HERRAMIENTAS DE PRODUCTIVIDAD

En base al procedimiento propuesto Bajo la superficie, se aplicarán herramientas que mejoren la productividad del método tales como tren de actividades, sectorización y circuito fiel para el puente Pampa Blanca.

7.3.1. Tren de Actividades

Para la construcción de los anillos del *caisson* el tren de actividades con secuencia lógica empieza a partir de la excavación manual y armado de refuerzo, luego, prosigue con el encofrado y vaciado de concreto, para finalmente desencofrar. El tren descrito se repite para todos los sectores siguientes.

En la Figura 7.1 se observa el esquema de tren de actividades de acuerdo a la sectorización descrita en el acápite siguiente “Sectorización”, donde se identifica que dos sectores (S#A y S#B) conforman un anillo y que los sectores SB1 y SB2 son *buffers* de tiempo debido a la variabilidad que existe en toda obra. Además, del tren de actividades se identifica que cuando en el Sector A del primer anillo se está desencofrando, en el Sector A del segundo anillo se está iniciando el tren de trabajo con la excavación y colocación de armadura. Si bien estas dos actividades se realizan en el mismo sector, estas pueden ser desarrolladas a lo largo del día como un solo paquete de actividades.

Figura 7.1: Tren de actividades para la construcción de *caisson* de concreto del puente Pampa blanca.

	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7	Día 8	Día 9
Anillos de caisson									
Excavación	S1A	S1B	S2A	S2B	S3A	S3B	S4A	S4B	S5A
Armado de refuerzo									
Encofrado de anillo		S1A	S1B	S2A	S2B	S3A	S3B	S4A	S4B
Colocación de concreto									
Desencofrado			S1A	S1B	S2A	S2B	S3A	S3B	S4A

	Día 10	Día 11	Día 12	Día 13	Día 14	Día 15	Día 16	Día 17	Día 18
Anillos de caisson									
Excavación	S5B	S6A	S6B	S7A	S7B	SB1	SB2		
Armado de refuerzo									
Encofrado de anillo	S5A	S5B	S6A	S6B	S7A	S7B	SB1	SB2	
Colocación de concreto									
Desencofrado	S4B	S5A	S5B	S6A	S6B	S7A	S7B	SB1	SB2

Fuente: Propia

7.3.2. Sectorización

La sectorización propuesta se proyecta en dos sectores por anillo tanto para el pilar central como para los estribos, como se observa en la Figura 7.2 y Figura 7.3. El sector “A” tiene menores metros que el sector “B”, debido a que la división central forma parte del Sector “B”. Esta consideración fue tomada para que la construcción del anillo sea viable y no tenga complicaciones, pues si ese muro divisorio formaba parte del Sector “A” se estarían realizando trabajos en paralelo en un área común de dos sectores consecutivos, lo que podría provocar algún accidente.

Figura 7.2: Sectorización de la excavación de *caisson* del pilar central del puente Pampa Blanca.

Fuente: Propia.

En la Tabla 7.13 se muestran los metrados correspondientes a cada sector y actividad. El único anillo que presenta desproporción con respecto a los demás anillos es el anillo N°7 debido a que su altura de 1.40 m es diferente a la de los demás anillos de 1.10 m, sin embargo, esta particularidad no tiene un impacto importante en el desarrollo del procedimiento.

Figura 7.3: Sectorización del *caisson* de concreto del estribo derecho del puente Pampa blanca.

Fuente: Propia.

Tabla 7.13: Metrados por sectores en Estribos y Pilar Central de la cimentación del puente Pampa blanca

	Profundidad	Metrado por Sector				
		Excavación	Acero	Encofrado	Concreto	Desencofrado
	m	m3	kg	m2	m3	m2
Estribos						
Anillo N°01 (S1A)	1.10	37.77	2520.05	17.60	12.69	17.60
Anillo N°01 (S1B)	1.10	40.54	3070.60	27.50	15.46	27.50
Anillo N°02 (S2A)	1.10	37.77	2520.05	17.60	12.69	17.60
Anillo N°02 (S2B)	1.10	40.54	3070.60	27.50	15.46	27.50
Anillo N°03 (S3A)	1.10	37.77	2520.05	17.60	12.69	17.60
Anillo N°03 (S3B)	1.10	40.54	3070.60	27.50	15.46	27.50
Anillo N°04 (S4A)	1.10	37.77	2520.05	17.60	12.69	17.60
Anillo N°04 (S4B)	1.10	40.54	3070.60	27.50	15.46	27.50
Anillo N°05 (S5A)	1.10	37.77	2520.05	17.60	12.69	17.60
Anillo N°05 (S5B)	1.10	40.54	3070.60	27.50	15.46	27.50
Anillo N°06 (S6A)	1.10	37.77	2520.05	17.60	12.69	17.60
Anillo N°06 (S6B)	1.10	40.54	3070.60	27.50	15.46	27.50
Anillo N°07 (S7A)	1.40	48.07	3207.34	22.40	16.15	22.40
Anillo N°07 (S7B)	1.40	51.60	3908.03	35.00	19.68	35.00
Pilar Central						
Anillo N°01 (S1A)	1.10	35.31	1222.61	17.05	10.23	17.05
Anillo N°01 (S1B)	1.10	37.95	1538.13	26.29	12.87	26.29
Anillo N°02 (S2A)	1.10	35.31	1222.61	17.05	10.23	17.05
Anillo N°02 (S2B)	1.10	37.95	1538.13	26.29	12.87	26.29
Anillo N°03 (S3A)	1.10	35.31	1222.61	17.05	10.23	17.05
Anillo N°03 (S3B)	1.10	37.95	1538.13	26.29	12.87	26.29
Anillo N°04 (S4A)	1.10	35.31	1222.61	17.05	10.23	17.05
Anillo N°04 (S4B)	1.10	37.95	1538.13	26.29	12.87	26.29
Anillo N°05 (S5A)	1.10	35.31	1222.61	17.05	10.23	17.05
Anillo N°05 (S5B)	1.10	37.95	1538.13	26.29	12.87	26.29
Anillo N°06 (S6A)	1.10	35.31	1222.61	17.05	10.23	17.05
Anillo N°06 (S6B)	1.10	37.95	1538.13	26.29	12.87	26.29
Anillo N°07 (S7A)	1.40	44.94	1556.05	21.7	13.02	21.7
Anillo N°07 (S7B)	1.40	48.30	1957.62	33.46	16.38	33.46

Fuente: Propia

A partir de la sectorización planteada se pudo realizar una comparación con respecto a un tren de trabajo convencional sin sectorización. De la Figura 7.4 se observa que el desarrollo convencional tomaría 6 días adicionales con respecto al tren de trabajo por sectores propuesto.

Figura 7.4: Comparación de tiempos del tren de trabajo sectorizado propuesto para la ejecución de la cimentación del Puente Pampa Blanca y un tren de trabajo sin sectorización.

Fuente: Propia

7.3.3. Circuito Fiel

La herramienta de circuito fiel fue realizada para la actividad de excavación, como parte de las recomendaciones brindadas por los especialistas al caracterizar a esta actividad como crítica. Se planteó asignar a seis trabajadores para la ejecución del metrado diario correspondiente a cada sector. En la Tabla 7.14 se muestra el esquema de circuito fiel, donde el rendimiento presupuestado, 1.60 hh/m³, se toma del análisis de la finalización de ejecución del Puente Pampa Blanca. Y como resultado de la aplicación de esta herramienta se calcula un ahorro en costo de mil cuatrocientos treinta y siete soles con ochenta y cinco céntimos (S/ 1 437.85).

Tabla 7.14: Circuito Fiel para la excavación los anillos del Pilar Central del puente Pampa blanca

EXCAVACIÓN DE ANILLOS				RESULTADO			
N° Personas	6			Dif. Rend.	0.1586		
Horas Diarias	8.0			Dif.hh	84		
S/. /hh	S/.	17.02		S/.	1,437.85		

	ANILLO 1		ANILLO 2		ANILLO 3		ANILLO 4	
Día	1	2	3	4	5	6	7	8
HH	48	48	48	48	48	48	48	48
HHacum	48	96	144	192	240	288	336	384
Met día	35.31	37.95	35.31	37.95	35.31	37.95	35.31	37.95
Met acum	35.31	73.26	108.57	146.52	181.83	219.78	255.09	293.04
Rend día	1.3594	1.2648	1.3594	1.2648	1.3594	1.2648	1.3594	1.2648
Rend acum	1.3594	1.3104	1.3263	1.3104	1.3199	1.3104	1.3172	1.3104
Rend pres	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60

	ANILLO 5		ANILLO 6		ANILLO 7		VARIABILIDAD	
Día	9	10	11	12	13	14	15	16
HH	48	48	48	48	48	48	48	48
HHacum	432	480	528	576	624	672	720	768
Met día	35.31	37.95	35.31	37.95	44.94	48.3	0	0
Met acum	328.35	366.30	401.61	439.56	484.50	532.80	532.80	532.80
Rend día	1.3594	1.2648	1.3594	1.2648	1.0681	0.9938	0	0
Rend acum	1.3157	1.3104	1.3147	1.3104	1.2879	1.2613	1.3514	1.4414
Rend pres	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60

Fuente: Propia

7.4. MANUAL PRELIMINAR DEL PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO PARA CAISSONS DE CONCRETO

Del análisis del método de excavación con presencia de agua, *caisson* de concreto, se genera un manual preliminar el cual se desarrolla en el *Anexo N° 13*.

CONCLUSIONES

- Se determina que la actividad crítica en la ejecución de *caissons* mediante el procedimiento constructivo *Well foundation* es la excavación para hincado, teniendo un 47% de incidencia respecto de la opinión de especialistas en dicha práctica. Otras actividades influyentes en el flujo de procesos son: el encofrado u obra falsa (21%) y el control del nivel freático (21%), según los especialistas.
- Las complicaciones que se generan durante la ejecución de *caissons* mediante el procedimiento constructivo *Well foundation* son: Desplome, exceso de flujos de agua, presencia de bolonería durante la excavación y el exceso de rozamiento o fricción lateral. De ello, se sustrae que el Desplome es la principal complicación ya que su probabilidad de ocurrencia es constante durante toda la actividad crítica (excavación).
- Las partidas representativas en el costo de la construcción de *caissons* se definen por la incidencia de su costo directo, horas hombre y rendimiento. En ese sentido, en el puente Pampa Blanca el costo directo de las partidas significativas resulta en un 40.72% de Concreto y 21.55% de Excavación para hincado. Además, del total de horas hombre ejecutadas, 22 383 hh, el 43.53% corresponde a la partida Concreto, 17.66% a Excavación para hincado y 14.18% a Encofrado y desencofrado. Entonces, la mejora en el procedimiento constructivo *Well foundation* debe enfocarse en la Excavación para hincado, concreto, encofrado y desencofrado.
- El procedimiento constructivo Bajo la superficie elimina partidas que se ejecutan en el procedimiento *Well foundation*; tales como, la plataforma de trabajo, borde cortante, encofrado curvo en seco y relleno compactado teniendo una optimización en el costo directo de 8.57% en el puente Pampa Blanca y 4.30% en el puente Río Tambo.
- Se concluye que la variación en costo de la propuesta de mejora, denominada Bajo la superficie, comparado con el procedimiento constructivo *Well foundation* en la ejecución de los *caissons* del puente Pampa Blanca asciende a un 17.72%, mientras que para los *caissons* del puente Río Tambo se calcula un 17.38% haciendo un promedio final de 17.55% de mejora.

- El porcentaje de optimización económica determinada por los ingenieros especialistas contempla que existe una mejora cuando la variación del costo directo mediante el procedimiento constructivo Bajo la superficie disminuye entre 16 – 20%. Entonces, se valida la mejora en la variación económica de los puentes Pampa Blanca y Rio Tambo siendo esta de 17.5%
- El tiempo de ejecución de los *caisson* de concreto se optimiza en un, 14.29% para el puente Pampa Blanca y 8.33% para el puente Rio Tambo, esto considerando la propuesta de mejora Bajo la superficie. Por ello, se determina que la mejora en el tiempo de ejecución dependerá de la geometría del *caisson* y el rendimiento considerado para cada partida de control.
- Se determina que la geometría de los *caissons* influye directamente en la optimización del costo directo de los *caisson* de concreto.
- El uso de formaletas metálicas como reemplazo al encofrado de madera, mejora 1.51% la variación de costo del puente Pampa Blanca y 0.97% la variación de costo del puente Rio Tambo lo que significa que las variaciones porcentuales del costo directo de los puentes Pampa Blanca y Rio Tambo asciende a 19.23% y 18.35% respectivamente.
- La principal ventaja y desventaja del procedimiento constructivo *Well foundation* es el vaciado en seco y desplome durante el hincado de *caisson*, respectivamente; mientras que la principal ventaja y desventaja de la propuesta de mejora, Bajo la superficie, es la eliminación del desplome durante la excavación y la mano de especializada en la excavación con ángulo de inclinación en las paredes de *caisson*.
- Las herramientas de productividad, tales como, tren de actividades, sectorización y circuito fiel, disminuye el tiempo de ejecución hasta tres cuartos (0.75) de día por anillo ejecutado y un total de seis (06) días por cada *caisson* del puente Pampa Blanca, solo si se consideran dos sectores, un *caisson* de siete (07) anillos y el procedimiento constructivo Bajo la superficie.

- El uso del procedimiento constructivo Bajo la superficie se limita para los suelos sueltos, de baja cohesión y de alta permeabilidad; así como también, a *caissons* de concreto con profundidades mayores a los 15 m, según la opinión de los especialistas entrevistados, construcciones que se ejecuten cuando el río no se encuentra en su máximo estiaje y, a longitudes o diámetros de *caissons* que no permitan el ingreso, a su interior, a más de una persona.

Finalmente, se crea un manual preliminar con los detalles constructivos del procedimiento *Well foundation* y de la propuesta de mejora, el procedimiento constructivo Bajo la superficie.

RECOMENDACIONES

- Realizar una evaluación estructural del comportamiento de todas las fuerzas involucradas en el área donde se desarrolla el procedimiento propuesto Bajo la Superficie, tomando en cuenta una condición húmeda del suelo, de esta forma se podrá obtener el mayor ángulo de inclinación para la excavación, el cual para ser óptimo no podrá ser mayor que el ángulo de fricción del suelo. Por consiguiente, se podrá establecer el ángulo de inclinación conveniente para la excavación del último anillo del *caisson*.
- Determinar un nuevo espesor del anillo de concreto del *caisson*, después de haber realizado la evaluación estructural para el procedimiento Bajo la Superficie ya que éstos se establecen para un procedimiento que debe ser hundido por efecto de su propio peso.
- Evaluar los detalles estructurales de la propuesta de mejora tales como, la configuración geométrica (sección transversal) y el espesor del *caisson* de concreto, para poder realizar un análisis comparativo más completo entre el procedimiento convencional *Well foundation* y el procedimiento propuesto Bajo la Superficie.
- Desarrollar un estudio de la adaptación del procedimiento propuesto Bajo la Superficie, al igual que el realizado en la presente investigación, en una mayor cantidad de puentes con cimentación tipo *caisson* de concreto que cumpla con las condiciones de aplicación, para poder evaluar su impacto tanto en costo, como en tiempo. De esta forma, se podrá obtener una media porcentual que cuantifique representativamente el beneficio del procedimiento Bajo Superficie para *caissons*.
- Implementar el modelo en una obra real, posterior a la evaluación estructural, para poder tomar datos reales de rendimiento y tiempo de ejecución de las partidas del procedimiento Bajo la Superficie, de esta forma se podrá obtener una base de datos más precisa que permita ajustar la mejora del procedimiento para *caissons* en términos de horas hombre requeridas y por ende una disminución en el costo de construcción.

- Aplicar la herramienta de productividad “Circuito Fiel” para todas las actividades establecidas en el tren de actividades del procedimiento propuesto Bajo la superficie para poder evaluar la optimización de la mano de obra.
- Considerar la aplicación del procedimiento constructivo Bajo la superficie en condiciones diferentes a las estudiadas, suelo cohesivo y permeabilidad media, para evaluar la implementación de nuevos recursos tecnológicos y poder evaluar su nivel de conveniencia a nivel económico y técnico.
- La capacidad y elección de los equipos de bombeo deberá ser estimada en base a la altura de elevación, caudal medio y contenido de arenas del flujo de agua a bombear, y para ello se deberá llevar a cabo un estudio hidrogeológico completo que garantice la precisión del requerimiento.
- La implementación en obra del procedimiento Bajo la Superficie y el análisis estructural y de suelos de una determinada población de puentes debe ser incorporado en el manual preliminar, específicamente en el “Procedimiento constructivo Bajo la Superficie” (ítem 6.0), se debe plasmar, por ejemplo, el rango de inclinación mínima y máxima de los anillos según el tipo de suelo y la capacidad del sistema de bombeo según la profundidad en la que se encuentre la construcción de un anillo de *caisson*.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] Las terribles cifras del niño costero a lo largo del país y en Arequipa (20 de marzo del 2017). El Búho-Política y Cultura desde Arequipa Perú. Recuperado de: <http://elbuhu.pe/2017/03/20/las-terribles-cifras-del-nino-costero/>
- [2] Ramírez F. (2000) La técnica de cimentación de puentes hasta el siglo XVIII. Actas del III Congreso Nacional de Historia de la Construcción, España. Recuperado de: http://www.sedhc.es/biblioteca/actas/CNHC3_101.pdf
- [3] Pipinato, A. (2016). Innovative Bridge Design Handbook. Construction, Rehabilitation and Maintenance. Pág. 681-699. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800058-8.00026-8>.
- [4] Ministerio de Transportes, Comunicaciones, Vivienda y Construcción. (2000). Expediente Técnico: Construcción del Puente Pampa Blanca. (Vols. 1-2). Lima. Perú: Provias Descentralizado.
- [5] HOB (2014). Estudio Definitivo de la Carretera Camaná - Dv. Quilca – Matarani - Ilo, Tramo I: Camaná - Dv. Quilca – Matarani - El Arenal y El Arenal - Punta de Bombón, Sub Tramo 1: Matarani - El Arenal y Sub Tramo 2: El Arenal - Punta de Bombón. Lima. Perú: Provias Nacional.
- [6] Fernández, A. y Pita, M. (2016). Cimentaciones del Puente de la Constitución de 1812 sobre la Bahía de Cádiz. Hormigón y Acero, 67(278-279), 33-36. doi: <http://doi.org/10.1016/j.hya.2015.12.003>
- [7] Furaya, N., Yamaoka, R. y Paulson, B. (1994) Construction of Akashi – Kaikyo Bridge West Anchorage. En: Journal of Construction Engineering and Management, 120(2), 337 – 356. Doi: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(1994\)120:2\(337\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(1994)120:2(337))
- [8] Organización Panamericana de la Salud (OPS) (2005) Especificaciones técnicas para la construcción de captaciones especiales. Perú. Recuperado de: http://www.bvsde.paho.org/bvsacg/guialcalde/2sas/d23/025_Construccion_captaciones_especiales/Construcci%C3%B3n_captaciones_especiales.pdf
- [9] Mayhuire, E. Comunicación personal, 16 de setiembre de 2017
- [10] Ortiz, E. Comunicación personal, 01 de setiembre de 2017.

- [11] Duran, F. Comunicación personal, 16 de setiembre de 2017.
- [12] Marreros, D. (2001). Procedimientos de hincado de los cilindros de cimentación en el puente Yuracyacu – Alto Mayo (Tesis de grado). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú. Recuperado de http://cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/uni/4343/1/marreros_zd.pdf
- [13] Peck R., Hanson W. y Thornburn T. (1998). Ingeniería de Cimentaciones. (2da ed.) México: Limusa.
- [14] Bloemendal, M., Olsthoorn, T. and Van de Ven, F. (2015). Combining climatic and geo-hydrological preconditions as a method to determine world potential for aquifer thermal energy storage, 621-633. En: ELSEVIER – Science of the Total Environment. Vol. 538, No.10.
- [15] Sanchez, J. (2014). Conceptos Fundamentales de Hidrogeología. Universidad de Salamanca, España. Recuperado: http://hidrologia.usal.es/temas/Conceptos_Hidrogeol.pdf
- [16] Fernández, L. (2004). Tierra sobre el agua: Visión Histórica Universal de los Puentes. Tomo I. (2da ed.) Madrid: Colegio de ingenieros de caminos, canales y puertos.
- [17] Bragagnini, I. (2017). Caissones - Cajón, Campana, pozos, brocales [Material de clase]. Construcciones especiales, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC), Lima.
- [18] Chowdhury, I. et al. (2017). Dynamic soil structure interaction of bridge piers supported on well foundation. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 97, 251-265. doi: <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.03.005>
- [19] Pita E., Grau I. y Perez A. (2008) Manual para el diseño y ejecución de cajones flotantes de hormigón armado para obras portuarias. Recuperado: http://oa.upm.es/3930/1/INVE_MEM_2008_57854.pdf
- [20] Osorno, T., Devlin, J., Firdous R. (2017). An In-Well Point Velocity Probe for the rapid determination of groundwater velocity at the centimeter-scale. Journal of Hydrology, 557 ,539-546. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.12.033>
- [21] Productos y servicios hidráulicos (2017) Manual de Pozos Profundos de Agua, México DF, México. Recuperado:

http://www.academia.edu/7266239/MANUAL_POZOS_PROFUNDOS_DE_AGUA_Manual_de_Pozos_Profundos_de_Agua

- [22] Pestana, A., Alves, T. and Barbosa, A. (2014) Application of Lean Construction Concepts to Manage the Submittal Process in AEC Projects, 1-9. En: American Society of Civil Engineers (ASCE). Vol. 30, No.04.
- [23] Ramirez, H. (2017) Tren de actividades y sectorización [Material de clase]. Productividad en obra, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC), Lima.
- [24] Orihuela, P., Canchaya, L. y Rodríguez, E. (2015). Gestión visual del sistema Last Planner mediante el modelamiento BIM. São Carlos. Brasil. Recuperado de http://www.infohab.org.br/sibraelagrec2015/artigos/SIBRAGREC-ELAGREC_2015_submission_124.pdf
- [25] Tejada, A. (2014). Aplicación de la filosofía Lean Construction en la planificación, programación, ejecución y control de proyectos. Recuperado de http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/123456789/5778/GUZMAN_ABNER_LEAN_CONSTRUCTION_PROYECTOS.pdf?sequence=1
- [26] Contraloría general de la república de Chile. (2012). Guía práctica para la construcción de muestras. Recuperado de http://www.oas.org/juridico/PDFs/mesicic4_chl_const.pdf
- [27] Perú. Decreto supremo N° 031-77-VC, de 18 de agosto de 1977, por el que se introduce el régimen de fórmulas polinómicas. Texto único ordenado, 01 de marzo de 1979.
- [28] Figueredo, M. (2005). Cimentación Ed. Residencias El Parque [Artículo de la Universidad Nacional de Colombia]. Recuperado de <http://bdigital.unal.edu.co/13617/1/1178-7176-1-PB.pdf>
- [29] Espinosa, A. (agosto 2003). 2do Encuentro de Ingenieros de Suelos y Estructuras. Recuperado de <http://www.bdigital.unal.edu.co/13617/1/1178-7176-1-PB.pdf>
- [30] Rivera, L. y Escobar, C. (2012) Estribos especiales para puentes de luces pequeñas y cauces profundos. Recuperado de <http://tycho.escuelaing.edu.co/contenido/encuentros->

suelosyestructuras/documentos/5_encuentro/jueves_7_mayo/12-Estribos-especiales-Luciano-Rivera.pdf

- [31] Ministerio de Transportes, Comunicaciones, Vivienda y Construcción. (2001). Expediente Técnico: Rehabilitación del puente Santa Rosa (El Fiscal). Lima. Perú: Provias Descentralizado.
- [32] Ministerio de Transportes, Comunicaciones, Vivienda y Construcción. (2002). Informe de Preliquidación Técnica. Proyecto: Construcción Puente Pampa Blanca y Accesos. Lima. Perú: Provias Descentralizado.
- [33] Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) (2016) Manual de Puentes. Recuperado de: http://transparencia.mtc.gob.pe/idm_docs/P_recientes/8044.pdf
- [34] Fernández, A. y Pita, M. (2016). Cimentaciones del Puente de la Constitución de 1812 sobre la Bahía de Cádiz. Hormigón y Acero, 33-36. En: ELSEVIER – Asociación Científico-técnico del Hormigón Estructural (ACHE). Vol. 67, Issues 278-279. doi: <http://doi.org/10.1016/j.hya.2015.12.003>
- [35] Otárola, G. Comunicación personal, 15 de octubre de 2017.
- [36] Fuentes, C. Comunicación personal, 23 de setiembre de 2017.
- [37] Lama, J. Comunicación correo electrónico, 18 de setiembre de 2017.
- [38] Sánchez, V. Comunicación personal, 30 de setiembre de 2017.
- [39] Instituto nacional de defensa civil - Dirección de políticas, planes y evaluación (2017). Emergencia y daños ocurridos a nivel nacional durante el primer semestre 2017, Boletín estadístico virtual de la gestión reactiva, N° 07 (4), 12 – 112. En: <https://www.indeci.gob.pe/objetos/secciones/MTc=/MjI0/lista/OTk0/201708091706381.pdf>
- [40] Fuentes, C. Comunicación correo electrónico, 17 de mayo de 2018.
- [41] Casagrande y Fadum
- [42] Rebollo L. tipos de comportamiento hidrogeológico

ANEXOS

ANEXO N° 01

Pilar central del Puente Pampa Blanca. Fuente: MTC (2000).

ANEXO N°02

SECCION A-A (eje de camino)

FIGURA V

Estribo izquierdo del Puente Pampa Blanca. Fuente: MTC (2000).

ANEXO N° 03

Estribo derecho del Puente Pampa Blanca. Fuente: MTC (2000).

ANEXO N°04

Partida : 02.01.00 TRAZO Y REPLANTEO

Rendimiento : 1,000.000 M2/Día

Costo unitario directo(S/.) por (M2)

2.27

Código Descripción insumo	Und	Cuadrilla	Cantidad	Precio	Parcial	Sub total
Materiales						
030301 ACERO CORRUGADO Fy=4,200 (Gr.60)	KG		0.0027	1.33	0.00	
430234 MADERA TORNILLO	P2		0.0050	3.47	0.02	
550201 PINTURA ESMALTE SINTETICO STANDARD	GLN		0.0020	43.90	0.09	0.11
Mano de obra						
470101 CAPATAZ	HH	0.10	0.0008	7.35	0.01	
470103 OFICIAL	HH	1.00	0.0080	5.14	0.04	
470104 PEON	HH	4.00	0.0320	4.03	0.13	
471501 TOPOGRAFO	HH	1.00	0.0080	7.92	0.06	0.24
Equipo						
370101 HERRAMIENTA MANUAL	%MO		3.0000	0.24	0.01	
493703 TEODOLITO	HM	1.00	0.0080	15.00	0.12	
493704 NIVEL	HM	1.00	0.0080	8.50	0.07	0.20
Partidas insumo						
995011 C.S. F'C=140 KG/CM2 (EN SECO)	M3		0.0080	214.94	1.72	1.72

Partida : 03.02.00 EXCAVACION BAJO AGUA

Rendimiento : 588.000 M3/Día

Costo unitario directo(S/.) por (M3)

3.64

Código Descripción insumo	Und	Cuadrilla	Cantidad	Precio	Parcial	Sub total
Mano de obra						
470101 CAPATAZ	HH	0.20	0.0027	7.35	0.02	
470104 PEON	HH	4.00	0.0544	4.03	0.22	0.24
Equipo						
370101 HERRAMIENTA MANUAL	%MO		3.0000	0.24	0.01	
376401 BONIF. EQUIPO EN AGUA	%EQ		20.0000	1.91	0.38	
376402 BONIF. PEON EN AGUA	%MO		15.0000	0.24	0.04	
496203 RETROEXCAV. S/ORUGA 80-110HP, 0.50-1.3 Yd3	HM	1.00	0.0136	139.57	1.90	2.33
Partidas insumo						
914019 TRABAJOS EN AGUA	M3		1.0000	1.07	1.07	1.07

Partida : 04.01.00 ENCOFRADO NO VISTO (SECO)

Rendimiento : 15.000 M2/Día

Costo unitario directo(S/.) por (M2)

42.96

Código Descripción insumo	Und	Cuadrilla	Cantidad	Precio	Parcial	Sub total
Materiales						
020200 ALAMBRE NEGRO	KG		0.2000	2.20	0.44	
020500 CLAVOS	KG		0.2000	2.20	0.44	
430234 MADERA TORNILLO	P2		6.4000	3.47	22.21	
440194 TRIPLAY LUPUNA 4'x 8'x 19 mm	PZA		0.0700	97.87	6.85	
530903 PETROLEO D-2	GLN		0.2500	7.57	1.89	21.93
Mano de obra						
470101 CAPATAZ	HH	0.20	0.1067	7.35	0.78	
470102 OPERARIO	HH	1.00	0.5333	5.61	2.99	
470103 OFICIAL	HH	1.00	0.5333	5.14	2.74	
470104 PEON	HH	2.00	1.0667	4.03	4.30	10.81
Equipo						
370101 HERRAMIENTA MANUAL	%MO		3.0000	10.81	0.32	0.32

Partida : 04.05.00 ENCOFRADO CURVO EN SECO

Rendimiento : 10.000 M2/Día

Costo unitario directo(S/.) por (M2)

71.45

Codigo Descripción insumo	Und	Cuadrilla	Cantidad	Precio	Parcial	Sub total
Materiales						
020200 ALAMBRE NEGRO	KG		0.2000	2.20	0.44	
020500 CLAVOS	KG		0.2000	2.20	0.44	
021211 PERNOS	KG		0.4000	2.20	0.88	
304916 DESMOLDADOR PARA ENCOFRADOS	GLN		0.0455	94.19	4.29	
430234 MADERA TORNILLO	P2		8.8000	3.47	30.54	
440194 TRIPLAY LUPUNA 4'x 8'x 19 mm	PZA		0.1200	97.87	11.74	48.33
Mano de obra						
470101 CAPATAZ	HH	0.20	0.1600	7.35	1.18	
470102 OPERARIO	HH	1.00	0.8000	5.61	4.49	
470103 OFICIAL	HH	1.00	0.8000	5.14	4.11	
470104 PEON	HH	2.00	1.6000	4.03	6.45	16.23
Equipo						
370101 HERRAMIENTA MANUAL	MO		3.0000	16.23	0.49	
374952 CIZALLA MANUAL	HM	1.00	0.8000	8.00	6.40	6.89

Partida : 07.05.00 BORDE CORTANTE DEL CAISSON

Rendimiento : 30.000 ML/Día

Costo unitario directo(S/.) por (ML)

482.47

Codigo Descripción insumo	Und	Cuadrilla	Cantidad	Precio	Parcial	Sub total
Materiales						
022201 SOLDADURA	KG		0.2500	8.70	2.18	
030301 ACERO CORRUGADO Fy=4,200 (Gr.60)	KG		2.9700	1.33	3.95	
560114 PLANCHA NEGRA LAC 12.5x1220x2400mm	PZA		0.8074	585.72	472.91	479.04
Mano de obra						
470102 OPERARIO	HH	0.50	0.1333	5.61	0.75	
470104 PEON	HH	2.00	0.5333	4.03	2.15	2.90
Equipo						
370101 HERRAMIENTA MANUAL	MO		3.0000	2.90	0.09	
481004 EQUIPO DE SOLDADURA	HM	1.00	0.2667	1.64	0.44	0.53

Partida : 04.02.00 ENCOFRADO NO VISTO (AGUA)

Rendimiento : 15.000 M2/Día

Costo unitario directo(S/.) por (M2)

53.02

Codigo Descripción insumo	Und	Cuadrilla	Cantidad	Precio	Parcial	Sub total
Materiales						
020200 ALAMBRE NEGRO	KG		0.2000	2.20	0.44	
020500 CLAVOS	KG		0.2000	2.20	0.44	
430234 MADERA TORNILLO	P2		6.4000	3.47	22.21	
440194 TRIPLAY LUPUNA 4'x 8'x 19 mm	PZA		0.0700	97.87	6.85	
530903 PETROLEO D-2	GLN		0.2500	7.57	1.89	31.83
Mano de obra						
470101 CAPATAZ	HH	0.20	0.1067	7.35	0.78	
470102 OPERARIO	HH	1.00	0.5333	5.61	2.99	
470103 OFICIAL	HH	1.00	0.5333	5.14	2.74	
470104 PEON	HH	2.00	1.0667	4.03	4.30	10.81
Equipo						
370101 HERRAMIENTA MANUAL	MO		3.0000	10.81	0.32	
376401 BONIF. EQUIPO EN AGUA	EQ		15.0000	0.32	0.05	
376402 BONIF. PEON EN AGUA	MO		20.0000	10.81	2.16	2.53
Partidas insumo						
910230 TRABAJOS EN AGUA	M2		1.0000	7.85	7.85	7.85

Partida	:	05.03.00	CONCRETO F'C=210 KG/CM2 B/AGUA (TAPON DE CAISSON)			
Rendimiento	:	16.000 M3/Día	Costo unitario directo(S/.) por (M3)		289.65	
Codigo	Descripción insumo	Und	Cuadrilla	Cantidad	Precio	Parcial
	Materiales					Sub total
210100	CEMENTO PORTLAND TIPO I	BLS		8.0000	23.42	187.36
340303	COMBUSTIBLE Y LUBRICANTES	%EQ		70.0000	6.24	4.37
	Mano de obra					191.73
470101	CAPATAZ	HH	1.00	0.5000	7.35	3.68
470102	OPERARIO	HH	3.00	1.5000	5.61	8.42
470103	OFICIAL	HH	3.00	1.5000	5.14	7.71
470104	PEON	HH	6.00	3.0000	4.03	12.09
	Equipo					31.90
370101	HERRAMIENTA MANUAL	%MO		3.9500	31.90	1.26
376401	BONIF. EQUIPO EN AGUA	%EQ		20.0000	7.50	1.50
376402	BONIF. PEON EN AGUA	%MO		15.0000	31.90	4.79
480105	MEZC. DE CONCRETO T.TAMBOR 18HP 11 p3	HM	1.00	0.5000	8.95	4.48
497303	VIBRADOR DE CONCRETO 4HP, 2.40 Plg	HM	1.00	0.5000	3.52	1.76
	Partidas insumo					13.79
910150	TRABAJOS EN AGUA	M3		1.0000	2.98	2.98
914010	AGUA	M3		0.1500	6.92	1.04
920350	ARENA (D.C. 0-5 KM)	M3		0.5000	19.01	9.51
920550	PIEDRA CHANCADA 1/2" A 3/4" (D.C. 0-5 KM)	M3		0.8000	48.37	38.70
						52.23
Partida	:	05.04.00	C.C. F'C=140 KG/CM2+30%P.G.(BAJO AGUA)			
Rendimiento	:	18.000 M3/Día	Costo unitario directo(S/.) por (M3)		181.58	
Codigo	Descripción insumo	Und	Cuadrilla	Cantidad	Precio	Parcial
	Materiales					Sub total
210100	CEMENTO PORTLAND TIPO I	BLS		4.2000	23.42	98.36
340303	COMBUSTIBLE Y LUBRICANTES	%EQ		70.0000	5.54	3.88
	Mano de obra					102.24
470101	CAPATAZ	HH	1.00	0.4444	7.35	3.27
470102	OPERARIO	HH	3.00	1.3333	5.61	7.48
470103	OFICIAL	HH	3.00	1.3333	5.14	6.85
470104	PEON	HH	6.00	2.6667	4.03	10.75
	Equipo					28.35
370101	HERRAMIENTA MANUAL	%MO		3.0000	28.35	0.85
376401	BONIF. EQUIPO EN AGUA	%EQ		20.0000	6.39	1.28
376402	BONIF. PEON EN AGUA	%MO		15.0000	28.35	4.25
480105	MEZC. DE CONCRETO T.TAMBOR 18HP 11 p3	HM	1.00	0.4444	8.95	3.98
497303	VIBRADOR DE CONCRETO 4HP, 2.40 Plg	HM	1.00	0.4444	3.52	1.56
	Partidas insumo					11.92
910150	TRABAJOS EN AGUA	M3		1.0000	2.98	2.98
914010	AGUA	M3		0.1330	6.92	0.92
920150	GRAVA 2" (D.C. 0-5 KM)	M3		0.4830	34.87	16.84
920350	ARENA (D.C. 0-5 KM)	M3		0.3290	19.01	6.25
921550	PIEDRA GRANDE (D.C. 0-5 KM)	M3		0.3000	40.26	12.08
						39.07

Partida	: 05.01.00	CONCRETO F'C=210 KG/CM2 (EN SECO)				
Rendimiento	: 16.000 M3/Día		Costo unitario directo(S/.) por (M3)		283.07	
Codigo Descripción insumo	Und Cuadrilla	Cantidad	Precio	Parcial	Sub total	
Materiales						
210100 CEMENTO PORTLAND TIPO I	BLS	8.0000	23.42	187.36		
340303 COMBUSTIBLE Y LUBRICANTES	%EQ	70.0000	8.00	5.60		192.96
Mano de obra						
470101 CAPATAZ	HH	1.00	0.5000	7.35	3.68	
470102 OPERARIO	HH	3.00	1.5000	5.61	8.42	
470103 OFICIAL	HH	3.00	1.5000	5.14	7.71	
470104 PEON	HH	6.00	3.0000	4.03	12.09	31.90
Equipo						
370101 HERRAMIENTA MANUAL	%MO	3.0000	31.90	0.96		
480105 MEZC. DE CONCRETO T.TAMBOR 18HP 11 p3	HM	1.00	0.5000	8.95	4.48	
497303 VIBRADOR DE CONCRETO 4HP, 2.40 Plg	HM	2.00	1.0000	3.52	3.52	8.96
Partidas insumo						
914010 AGUA	M3	0.1500	6.92	1.04		
920350 ARENA (D.C. 0-5 KM)	M3	0.5000	19.01	9.51		
920550 PIEDRA CHANCADA 1/2" A 3/4" (D.C. 0-5 KM)	M3	0.8000	48.37	38.70		49.25

Partida	: 07.05.00	BORDE CORTANTE DEL CAISSON				
Rendimiento	: 30.000 ML/Día		Costo unitario directo(S/.) por (ML)		482.47	
Codigo Descripción insumo	Und Cuadrilla	Cantidad	Precio	Parcial	Sub total	
Materiales						
022201 SOLDADURA	KG	0.2500	8.70	2.18		
030301 ACERO CORRUGADO Fy=4,200 (Gr.60)	KG	2.9700	1.33	3.95		
560114 PLANCHA NEGRA LAC 12.5x1220x2400mm	PZA	0.8074	585.72	472.91		479.04
Mano de obra						
470102 OPERARIO	HH	0.50	0.1333	5.61	0.75	
470104 PEON	HH	2.00	0.5333	4.03	2.15	2.90
Equipo						
370101 HERRAMIENTA MANUAL	%MO	3.0000	2.90	0.09		
481004 EQUIPO DE SOLDADURA	HM	1.00	0.2667	1.64	0.44	0.53

Partida	: 04.08.02	ACERO FY=4200 KG/CM2				
Rendimiento	: 250.000 KG/Día		Costo unitario directo(S/.) por (KG)		2.01	
Codigo Descripción insumo	Und Cuadrilla	Cantidad	Precio	Parcial	Sub total	
Materiales						
020200 ALAMBRE NEGRO	KG	0.0500	2.20	0.11		
030301 ACERO CORRUGADO Fy=4,200 (Gr.60)	KG	1.0000	1.33	1.33		1.44
Mano de obra						
470101 CAPATAZ	HH	0.10	0.0032	7.35	0.02	
470102 OPERARIO	HH	1.00	0.0320	5.61	0.18	
470103 OFICIAL	HH	1.00	0.0320	5.14	0.16	
470104 PEON	HH	1.00	0.0320	4.03	0.13	0.49
Equipo						
370101 HERRAMIENTA MANUAL	%MO	3.0000	0.49	0.01		
376303 BANCO DE TRABAJO	%MO	15.0000	0.49	0.07		0.08

Fuente: Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) (2000).

ANEXO N° 05

ENTREVISTA A ESPECIALISTAS EN LA CONSTRUCCIÓN DE PUENTES EN LA COSTA SUR DEL PERÚ

Nombre: _____

1. ¿Cuántos años de experiencia tiene en la construcción de puentes?
2. ¿Ha ejecutado cimentación del tipo *caisson* de concreto? ¿Qué proyecto(s)?
3. ¿Qué complicaciones se presentaron en la excavación de la cimentación?
4. ¿Cuáles fueron las medidas correctivas?
5. ¿Cómo clasificaría el proceso constructivo de los *caisson* de concreto?
☐ Optimo
☐ Necesita mejorar
☐ No es el adecuado
6. ¿Considera que debería optimizarse el actual procedimiento constructivo de los *caisson* de concreto?
☐ Si
☐ No
7. Si tuviera que optimizar el proceso constructivo ¿Cuál o cuáles serían los procesos en los que se enfocaría?
☐ Plataforma en lecho de río
☐ Obra falsa: encofrado
☐ Excavación para hincado de caisson
☐ Colocación de acero
☐ Vaciado de concreto
☐ Otros

.....

8. ¿Cuál es el procedimiento detallado para la construcción de la plataforma y encofrado?
9. ¿Cuál es el procedimiento constructivo detallado del brocal o corona del *caisson*?
10. En base a su experiencia ¿Qué actividades considera críticas?
11. ¿Qué opina sobre la utilización de encofrado metálico para la construcción de *caisson* de concreto?
12. ¿Qué apreciación tiene del siguiente procedimiento?

13. Recomendación respecto a la optimización del procedimiento constructivo de *caisson* de concreto
14. ¿A partir de qué escala porcentual puede decir que el costo directo de un puente se ha optimizado o mejorado?
- ☐ 5 – 10%
- ☐ 11 – 15%
- ☐ 16 – 20%
- ☐ 21 – 25%

Formato de entrevista a especialistas. Fuente: Propia.

ANEXO N° 06

Cronograma planificado para la fundación del puente Pampa Blanca. Fuente: Propia.

ANEXO N° 07

Cronograma de ejecución real de la cimentación del Puente Pampa Blanca. Fuente: MTC (2000).

ANEXO N°08

1. Excavación en seco						
	cuadrilla	cant	S/	Parcial	Subtotal	
M.O						
Capataz	HH	0.2	0.0027	23.63	0.06	
Peón	HH	4	0.0544	14.47	0.79	0.85
Equipo						
herramienta manual	%MO		0.03	0.85	0.03	
retroexcavadora. s/oru.	HM	1	0.0136	222.53	3.026408	3.056408
TOTAL						3.91

2. Excavación bajo agua						
	cuadrilla	cantidad	S/	Parcial	Subtotal	
M.O						
Capataz	HH	0.2	0.0027	23.63	0.06	
Peón	HH	4	0.0544	14.47	0.79	0.85
Equipo						
herramienta manual	%MO		0.03	0.85	0.03	
bon. Equip en agua	%EQ		0.2	0.85	0.17	
bon. Peón en agua	%MO		0.15	0.85	0.13	
retroexcavadora. s/oru.	HM	1	0.0136	222.53	3.03	3.36
Insumos						
trabajo en agua	m3		1	12.94	12.94	12.94
TOTAL						17.15

3. Plataforma						
	cuadrilla	cantidad	S/	Parcial	Subtotal	
M.O						
Capataz	HH	0.2	0.0023	23.63	0.05	
Peón	HH	1	0.0114	14.47	0.16	0.21
Equipo						
rodillo	HM	1	0.0114	154.62	1.762668	
motoniveladora	HM	1	0.0114	213.3	2.43162	4.194288
Insumos						
agua	m3		0.04	39.98	1.5992	
material de relleno	m3		0.3	32.82	9.846	11.4452
TOTAL						15.85

4. Acero fy=4200kg/cm2						
	cuadrilla	cantidad	S/	Parcial	Subtotal	
M.O						
Capataz	HH	0.1	0.0032	20.83	0.07	
Operario	HH	1	0.032	19.57	0.63	
Oficial	HH	1	0.032	16.08	0.51	
Peón	HH	1	0.032	14.47	0.46	1.67
Equipo						
herramienta manual	%MO		0.03	1.67	0.05	
banco de trabajo	%MO		0.15	1.67	0.25	0.3
Materiales						
alambre negro	kg		0.05	3.01	0.15	
acero corrugado	kg		1	2.72	2.72	2.87
TOTAL						4.84

5. Borde cortante del caisson						
		cuadrilla	cantidad	S/	Parcial	Subtotal
M.O						
Operario	HH	1	0.032	19.57	0.63	
Peón	HH	1	0.032	14.47	0.46	1.09
Equipo						
herramienta manual	%MO		0.03	1.09	0.03	
equipo de soldadura	HM	1	0.2667	10.25	2.73	2.76
Materiales						
soldadura	kg		0.25	5.88	1.47	
acero corrugado	kg		2.97	2.72	8.08	
plancha negra	pza		0.8074	946.87	764.5	774.05
					TOTAL	777.90

6. Encofrado no visto B/AGUA						
		cuadrilla	cantidad	S/	Parcial	Subtotal
M.O						
Capataz	HH	0.2	0.1067	20.83	2.22	
Operario	HH	1	0.5333	19.57	10.44	
Oficial	HH	1	0.5333	16.08	8.58	
Peón	HH	2	1.0667	14.47	15.44	36.68
Equipo						
herramienta manual	%MO		0.03	36.68	1.10	
Bonif. Peón en agua	%MO		0.15	36.68	5.5	6.60
Materiales						
alambe negro	kg		0.2	3.01	0.6	
clavos	kg		0.2	3.87	0.77	
madera tornillo	p2		6.4	5.24	33.54	
Triplay lupuna	pza		0.07	91.7	6.42	
petróleo	gln		0.25	9.45	2.36	43.69
					TOTAL	86.97

7. Encofrado curvo en seco						
		cuadrilla	cantidad	S/	Parcial	Subtotal
M.O						
Capataz	HH	0.2	0.16	20.83	3.33	
Operario	HH	1	0.8	19.57	15.66	
Oficial	HH	1	0.8	16.08	12.86	
Peón	HH	2	1.6	14.47	23.15	55.00
Equipo						
herramienta manual	%MO		0.03	55.00	1.65	
cizalla manual	HM	1	0.8	10.50	8.4	10.05
Materiales						
alambe negro	kg		0.2	3.01	0.6	
clavos	kg		0.2	3.87	0.77	
pernos	kg		0.4	2.38	0.95	
desmoldador	gln		0.0455	29.59	1.35	
madera tornillo	p2		8.8	5.24	46.11	
triplay lupuna	pza		0.12	91.7	11	60.78
					TOTAL	125.83

8. Encofrado cara vista en seco						
		cuadrilla	cantidad	S/	Parcial	Subtotal
M.O						
Capataz	HH		0.2	0.1333	20.83	2.78
Operario	HH		1	0.6667	19.57	13.05
Oficial	HH		1	0.6667	16.08	10.72
Peón	HH		2	1.3333	14.47	19.29
						45.84
Equipo						
herramienta manual	%MO		0.03		45.84	1.38
						1.38
Materiales						
alambe negro	kg		0.2	3.01	0.6	
clavos	kg		0.2	3.87	0.77	
pernos	kg		0.25	2.38	0.6	
desmoldador	gln		0.0455	29.59	1.35	
madera tornillo	p2		7.2	5.24	37.73	
triplay lupuna	pza		0.07	91.7	6.42	47.47
					TOTAL	94.69

9. Concreto f'c=210 kg/cm2 (B/AGUA)						
		cuadrilla	cantidad	S/	Parcial	Subtotal
M.O						
Capataz	HH		1	0.5	20.83	10.42
Operario	HH		3	1.5	19.57	29.36
Oficial	HH		3	1.5	16.08	24.12
Peón	HH		6	3	14.47	43.41
						107.31
Equipo						
herramienta manual	%MO		0.03		107.31	3.22
Bonif. Equip agua	%EQ		0.2		13.74	2.75
Bonif. Peón en agua	%MO		0.15		107.31	16.1
Winche	HM	1	0.5	15.78	7.89	
mez. De concreto	HM	1	0.5	9.73	4.87	
Vibrador de concreto	HM	2	1	5.65	5.65	40.48
Materiales						
Cemento portland	bls		8	22.99	183.92	
Balde cónico de descarga	und		1	2.91	2.91	
Combustible y lubrican	%EQ		0.7	18.41	12.89	199.72
partidas insumo						
Trabajos en agua	m3		1	12.94	12.94	
agua	m3		0.15	39.98	6	
arena	m3		0.5	17.67	8.84	
piedra chancada	m3		0.8	49.37	39.5	67.28
					TOTAL	414.79

10. Concreto f'c=210kg/cm3 (tapa de caisson)						
		cuadrilla	cantidad	S/	Parcial	Subtotal
M.O						
Capataz	HH		1	0.5	20.83	10.42
Operario	HH		3	1.5	19.57	29.36
Oficial	HH		3	1.5	16.08	24.12
Peón	HH		6	3	14.47	43.41
						107.31
Equipo						
herramienta manual	%MO		0.0395		107.31	4.24
Bonif. Equip agua	%EQ		0.2		11.94	2.39
Bonif. Peón en agua	%MO		0.15		107.31	16.1
Winche	HM	1	0.5	15.78	7.89	
mez. De concreto	HM	1	0.5	9.73	4.87	
Vibrador de concreto	HM	1	0.5	5.65	2.83	38.32

Materiales						
Balde cónico de descarga	und	1	2.91	2.91		
Cemento portland	bls	8	22.99	183.92		
Combustible y lubrican	%EQ	0.7	15.59	10.91		197.74
partidas insumo						
Trabajos en agua	m3	1	12.94	12.94		
agua	m3	0.15	39.98	6		
arena	m3	0.5	17.67	8.84		
piedra chancada	m3	0.8	49.37	39.5		67.28
				TOTAL	410.65	

11. Concreto f'c=210kg/cm3 bajo agua (tapón de caisson)						
M.O	cuadrilla	cantidad	S/	Parcial	Subtotal	
Capataz	HH	1	0.5	20.83	10.42	
Operario	HH	3	1.5	19.57	29.36	
Oficial	HH	3	1.5	16.08	24.12	
Peón	HH	6	3	14.47	43.41	107.31
Equipo						
herramienta manual	%MO	0.0395	107.31	4.24		
Bonif. Equip agua	%EQ	0.2	11.94	2.39		
Bonif. Peón en agua	%MO	0.15	107.31	16.1		
Winche	HM	1	0.5	15.78	7.89	
mez. De concreto	HM	1	0.5	9.73	4.87	
Vibrador de concreto	HM	1	0.5	5.65	2.83	38.32
Materiales						
Balde cónico de descarga	und	1	2.91	2.91		
Cemento portland	bls	8	22.99	183.92		
Combustible y lubrican	%EQ	0.7	15.59	10.91		197.74
partidas insumo						
Trabajos en agua	m3	1	12.94	12.94		
agua	m3	0.15	39.98	6		
arena	m3	0.5	17.67	8.84		
piedra chancada	m3	0.8	49.37	39.5		67.28
				TOTAL	410.65	

12. Concreto ciclopeo bajo agua f'c=140kg/cm2						
		cuadrilla	cantidad	S/	Parcial	Subtotal
M.O						
Capataz	HH		1	0.4444	20.83	9.26
Operario	HH		3	1.3333	19.57	26.09
Oficial	HH		3	1.3333	16.08	21.44
Peón	HH		6	2.6667	14.47	38.59
Equipo						
herramienta manual	%MO		0.0395	95.38	3.77	
Bonif. Equip agua	%EQ		0.2	10.60	2.12	
Bonif. Peón en agua	%MO		0.15	95.38	14.31	
mez. De concreto	HM	1	0.4444	9.73	4.32	
Vibrador de concreto	HM	1	0.4444	5.65	2.51	27.03
Materiales						
Cemento portland	bls		8	22.99	183.92	
combustible y lubrican	%EQ		0.7	6.83	4.78	188.7
partidas insumo						
Trabajos en agua	m3		1	12.94	12.94	
agua	m3		0.133	39.98	5.32	
grava 2"	m3		0.483	36.87	17.81	
arena	m3		0.329	17.67	5.81	
piedra grande	m3		0.3	41.26	12.38	54.26
TOTAL					365.37	

13. Excavación para hincado de caisson						
		cuadrilla	cantidad	S/	Parcial	Subtotal
M.O						
Capataz	HH		1	0.6667	20.83	13.89
Operario	HH		2	1.3333	19.57	26.09
Peón	HH		10	6.6667	14.47	96.47
Equipo						
herramienta manual	%MO		0.03	136.45	4.09	
Combustible	%EQ		0.7	265.64	185.95	
Electrobomba Sumergible	HM	4	2.6667	90.19	240.51	
Winche c/2 baldes	HM	2	1.3333	15.78	21.04	451.59
TOTAL					588.04	

14. Relleno compactado de estructuras						
		cuadrilla	cantidad	S/	Parcial	Subtotal
M.O						
Capataz	HH		1	0.1778	20.83	3.70
Operario	HH		1	0.1778	19.57	3.48
Peón	HH		15	2.6667	14.47	38.59
Equipo						
herramienta manual	%MO		0.03	45.77	1.37	
Motobomba de 4"	HM	1	0.1778	66.13	11.76	
compactador vibrador	HM	2	0.3556	28.05	9.97	23.1
TOTAL					68.87	

15. Encofrado Perdido						
		cuadrilla	cantidad	S/	Parcial	Subtotal
M.O						
Capataz	HH		0.2	0.1067	20.83	2.22
Operario	HH		1	0.5333	19.57	10.44
Oficial	HH		1	0.5333	16.08	8.58
Peón	HH		2	1.0667	14.47	15.44
						36.68
Equipo						
herramienta manual	%MO		0.03	36.68	1.10	
Bonif. Peón en agua	%MO		0.15	36.68	5.5	6.60
Materiales						
alambe negro	kg		0.2	3.01	0.6	
clavos	kg		0.2	3.87	0.77	
madera tornillo	p2		6.4	5.24	33.54	
Triplay lupuna	pza		0.07	91.7	6.42	
petróleo	gln		0.25	9.45	2.36	43.69
TOTAL						86.97

16. Junta Water Stop						
		cuadrilla	cantidad	S/	Parcial	Subtotal
M.O						
Capataz	HH		0.1	0.008	21.79	0.17
Operario	HH		1	0.08	16.76	1.34
Peón	HH		1	0.08	12.82	1.03
						2.54
Equipo						
herramienta manual	%MO		0.03	2.54	0.08	
Bonif. Peón en agua	%MO		0.15	2.54	0.38	0.46
Materiales						
Water Stop 6"	m		1	13.72	13.72	13.72
TOTAL						16.72

Adaptación del análisis de precios unitarios del puente Pampa Blanca. Fuente: Propia.

ANEXO N°09

1. Excavación en seco				TOTAL 14.35		
		cuadrilla	cant	P.U	Parcial	Subtotal
M.O						
Operario	hh	1.00		0.03	16.76	0.45
Peón	hh	4.00		0.11	12.82	1.35
Capataz	hh	0.10		0.00	21.79	0.06
Equipo						
Martillo neumático	hm	0.50		0.01	4.08	0.05
herramienta manual	%MO			0.05	1.85	0.09
excavadora. s/oru.	hm	1.00		0.03	222.53	5.85
compresora neumatica 87hp	hm	0.25		0.01	80.23	0.53
Materiales						
Barreno 5' x 39mm	und			0.02	373	5.97

2. Excavación bajo agua				TOTAL 29.13		
		cuadrilla	cantidad	P.U	Parcial	Subtotal
M.O						
Oficial	hh	1.00		0.04	14.23	0.54
Peón	hh	4.00		0.15	12.82	1.93
Capataz A	hh	0.10		0.00	21.79	0.08
Equipo						
herramienta manual	%MO			0.05	2.55	0.13
Martillo neumatico	hm	0.50		0.02	4.08	0.08
Compresora neumatica	hm	0.25		0.01	80.23	0.75
excavadora. s/oru.	hm	1.00		0.04	222.53	8.37
Elect bomba sumergi 27HP 8"	hm	3.00		0.06	178.46	10.77
Materiales						
Barreno 5'x39mm	und			0.016	373	5.97
Bonif. Trab. b/a	%MO			0.2	2.55	0.51

3. Excavación				TOTAL 126.11		
		cuadrilla	cantidad	P.U	Parcial	Subtotal
M.O						
Capataz	hh	0.10		0.40	16.76	6.70
Peón	hh	1.00		4.00	12.82	51.28
Equipo						
herramienta manual	%MO			0.05	57.98	2.90
Winche de elevador elec	hm	0.50		2.00	15.78	31.56
Bonif. Trab. b/a	%MO			0.10	57.98	5.80
Grupo electrogeno 116HP	hm	0.05		0.20	139.33	27.87

4. Encofrado y desencofrado B/AGUA					TOTAL 95.17	
		cuadrilla	cantidad	P.U	Parcial	Subtotal
M.O						
Capataz A	hh		0.10	0.06	21.79	1.24
Operario	hh		1.00	0.57	16.76	9.58
Oficial	hh		1.00	0.57	14.23	8.13
Peón	hh		2.00	1.14	12.82	14.65
						33.60
Equipo						
herramienta manual	%MO			0.05	33.60	1.68
Motobomba 34HP 8"	hm		1	0.5714	66.13	37.79
Bonf. Trab. b/agua	%MO			0.10	33.60	3.36
						42.83
Materiales						
alambe negro #8	kg			0.20	3.01	0.60
clavos	kg			0.20	3.87	0.77
Desmoldante para madera	gal			0.06	29.59	1.78
Madera tornillo	p2			1.75	5.24	9.17
Triplay de 18mm	pl			0.07	91.7	6.42
						18.74
5. Acero fy=4200kg/cm2					TOTAL 4.56	
		cuadrilla	cantidad	P.U	Parcial	Subtotal
M.O						
Capataz A	hh		0.10	0.00	21.79	0.07
Operario	hh		1.00	0.03	16.76	0.54
Oficial	hh		1.00	0.03	14.23	0.46
Peón	hh		1.00	0.03	12.82	0.41
						1.48
Equipo						
herramienta manual	%MO			0.05	1.48	0.07
						0.07
Materiales						
alambre negro #16	kg			0.05	3.01	0.15
acero corrugado fy=4200kg/cm ²	kg			1.05	2.72	2.86
						3.01
6. Concreto clase D f'c=210 kg/cm2 (en seco)					TOTAL 455.48	
		cuadrilla	cantidad	P.U	Parcial	Subtotal
M.O						
Capataz A	hh		0.50	0.22	21.79	4.84
Operario	hh		3.00	1.33	16.76	22.35
Oficial	hh		3.00	1.33	14.23	18.97
Peón	hh		6.00	2.67	12.82	34.19
						80.35
Equipo						
herramienta manual	%MO			0.05	80.35	4.02
Mez. De concreto	hm		1.00	0.44	9.73	4.32
Vibrador de concreto 4HP	hm		2.00	0.89	5.65	5.02
						13.36
Materiales						
Cemento portland t. V	bls			9.00	22.99	206.91
Curador de concreto	gal			0.15	13.98	2.04
Aditivo retardante	kg			0.53	5.05	2.68
Gasolina	gal			0.38	10.36	3.94
Lubricante, grasa y filtros	%EQ			0.05	9.34	0.47
						216.04
Subpartidas						
Agua para la obra	m3			0.20	39.98	8.00
Transporte de agregados	m3			1.25	86.85	108.56
piedra chancada	m3			0.75	27.1	20.33
Arena zarandeada	m3			0.50	17.67	8.84
						145.73

7. Concreto clase D f'c=210 kg/cm2 (b/agua)				TOTAL 487.06		
		cuadrilla	cantidad	P.U	Parcial	Subtotal
M.O						
Capataz A	hh	0.50	0.22	21.79	4.84	
Operario	hh	2.00	0.89	16.76	14.90	
Oficial	hh	4.00	1.78	14.23	25.30	
Peón	hh	4.00	1.78	12.82	22.79	67.83
Equipo						
herramienta manual	%MO		0.05	67.83	3.39	
Mez. De concreto	hm	1.00	0.44	9.73	4.32	
Vibrador de concreto 4HP	hm	2.00	0.89	5.65	5.02	
Motobomba 34HP 8"	hm	1	0.4444	66.13	29.39	
Winche	hm	1.00	0.30	15.78	4.73	46.85
Materiales						
Cemento portland t. V	bls		9.00	22.99	206.91	
Curador de concreto	gal		0.21	13.98	2.94	
Aditivo retardante	kg		0.53	5.05	2.68	
Balde cónico de descarga	und		0.50	2.91	1.46	
Gasolina	gal		0.38	10.36	3.94	
Lubricantes, grasa y filtros	%EQ		0.05	38.73	1.94	219.87
Subpartidas						
Bonif. Trabajos b/agua	%MO		0.10	67.83	6.78	
Agua para la obra	m3		0.20	39.98	8	
Transporte de agregados	m3		1.25	86.85	108.56	
Piedra chancada	m3		0.75	27.10	20.33	
Arena zarandeada	m3		0.50	17.67	8.84	152.51
8. Concreto clase E f'c=175kg/cm2				TOTAL 429.79		
		cuadrilla	cantidad	P.U	Parcial	Subtotal
M.O						
Capataz A	hh	0.50	0.22	21.79	4.84	
Operario	hh	3.00	1.33	16.76	22.35	
Oficial	hh	3.00	1.33	14.23	18.97	
Peón	hh	6.00	2.67	12.82	34.19	80.35
Equipo						
herramienta manual	%MO		0.05	80.35	4.02	
Mez. de concreto 18HP	hm	1.00	0.44	9.73	4.32	
Vibrador de concreto 4HP	hm	2.00	0.89	5.65	5.02	
Winche	hm	1.00	0.50	15.78	7.89	21.25
Materiales						
Cemento portland t. V	bls		7.50	22.99	172.43	
Curador de concreto	gal		0.21	13.98	2.94	
Aditivo retardante	kg		0.53	5.05	2.68	
Gasolina	gal		0.38	10.36	3.94	
Lubricantes, grasa y filtros	%EQ		0.05	9.34	0.47	182.46
Subcontratos						
Agua para la obra	m3		0.20	39.98	8	
Transporte de agregados	m3		1.25	86.85	108.56	
Piedra chancada	m3		0.75	27.1	20.33	
Arena zarandeada	m3		0.50	17.67	8.84	145.73

9. Encofrado Perdido					TOTAL 54.96	
		cuadrilla	cantidad	S/	Parcial	Subtotal
M.O						
Capataz	HH		0.10	0.05	20.83	1.11
Operario	HH		1.00	0.53	19.57	10.44
Equipo						
herramienta manual	%MO			0.03	11.55	0.35
Bonif. Peón en agua	%MO			0.15	11.55	1.73
Materiales						
alambe negro	kg			0.20	3.01	0.6
clavos	kg			0.20	3.87	0.77
madera tornillo	p2			6.40	5.24	33.54
Triplay lupuna	pza			0.07	91.7	6.42
						41.33
10. Junta Water Stop (SUBCONTRATO)					TOTAL 15.37	
		cuadrilla	cantidad	S/	Parcial	Subtotal
Materiales						
Water Stop 6"	m			1.00	13.72	13.72
Subcontrato						
SC Instalación de Junta Water	m			1	1.65	1.65
						1.65

Adaptación del análisis de precios unitarios del puente Río Tambo. Fuente: Propia.

ANEXO N°10

BALDE DE DESCARGA CON MANGA

MEP 13
MEP 14

MEP 15
MEP 16

- * Fabricado en acero antidesgaste
- * Descarga de cemento por manga de caucho que permite dirigir el vaciado
- * Ideal para el vaciado en columnas y verticales.

MODELO	MEP 13	MEP 14	MEP 15	MEP 16
CAPACIDAD	500	800	1000	1500
ALTURA (mm)	1400	1550	1750	2200
MANGUERA Ø (mm)	200	200	200	200
CAPACIDAD (Kg)	1100	1760	2020	3300
PESO (Kg)	120	175	215	295

- El costo asumido corresponde a la base de datos de la empresa Wescon Ingeniería y construcción.

Fuente: Empresa de alquiler y venta de manipuladores telescópicos – Mepco.

ANEXO N°11

Pozo Profundo 120 GPM

Descripción: Bomba sumergible trifásica para pozo profundo 6", descarga de 3", 15 HP. 220V.

Modelo: SD6120ME1500G

Característica especial: Motores enfriados por agua para las aplicaciones mas exigentes.

Descripción comercial: Pozo Profundo 120 GPM

Marca: EVANS

Sobre pedido

Manual

Compartir

★★★★★

Precio internet \$ 40,249

Contáctanos

Fuente: Página web empresa Evans.

ANEXO N° 12

ITEM 2: ENCOFRADO DE MUROS A DOS CARAS (SISTEMA MANUAL HEF)

1. EFCO proporcionará el *Sistema de Paneles Manuales Hand-E-Form EFCO* y accesorios que incluyen grapas, pasadores, alineadores tubo, mordazas, puntales de aplome, herramientas útiles para encofrar y desencofrar. Incluye andamio de vaciado tipo pie de amigo para las placas.
2. El sistema considera el uso de tensores con asidero recuperables (en venta) los cuales deberán ser recubiertos con una funda plástica (en venta) previa lubricación con un agente desmoldante para facilitar su recuperación. En el caso de Cisterna se puede considerar el uso de tensores con muesca no recuperables y waterstop de neoprene para evitar filtraciones y fisuras.
3. Para el caso de existir muros a 1 cara el cliente deberá proporcionar puntales y soleras de madera para contrarrestar en conjunto los esfuerzos producidos por el concreto.
4. Se consideran alturas de hasta 3.00m, alturas mayores deberán hacerlos en 2 o más etapas.
5. El cliente deberá proporcionar un sistema de andamiaje para trabajos en altura.
6. Los m² de equipos serán de acuerdo a la programación de vaciados del cliente
7. El cliente puede optar por ensamblar algunos módulos rectos para izarlos con grúa para lo cual deberá proporcionar pernos c/tuerca de 3/8" x 1" para unir los paneles. Se recomiendan tramos rectos de máximo 7m de largo y altura 3.00m. Esta propuesta no incluye elementos de izaje.
8. Peso Aproximado del Sistema: 45 kg/m².

Placas a y Muros a 2 Caras (H <= 3.00m)

• Alquiler por 30 días	: US\$ 5.43+ I.G.V. por m ² .
------------------------	--

Consumibles en venta (NO forman parte del alquiler (ratio aproximado))

Tensores c/manilla en Placas (recuperable)	: US\$ 1.90 + I.G.V. /m ² de muro alquilado
--	--

OFERTA ECONÓMICA

ETAPA DE EDIFICIOS: SOTANOS Y PISOS SUPERIORES

I.- ELEMENTOS VERTICALES

ITEM 1: ENCOFRADO DE COLUMNAS (SISTEMA MANUAL HEF)

1. EFCO proporcionará el *Sistema de Paneles Manuales Hand-E-Form EFCO* y accesorios que incluyen grapas, pasadores, alineadores tubo con su mordazas cada par de columnas, puntales de aplome, andamios de vibrado, herramientas útiles para encofrar y desencofrar.
2. El Sistema descrito será destinado para encofrar columnas de sección recta regular.
3. El sistema considera el uso de tensores recuperables (en venta) al exterior del elemento bordeando sus cuatro lados para brindar arriostre
4. Se consideran alturas de hasta 3.00m.
5. El cliente deberá proporcionar un sistema de andamiaje para trabajos en altura.
6. La cantidad de equipo a suministrar será según requerimiento del cliente.
7. Peso Aproximado del Sistema: 50 kg/m².

Columna H <= 3.00m

• Alquiler por 30 días	: US\$ 8.00 + I.G.V. por m ²
------------------------	---

Fuente: Empresa de encofrados metálicos EFCO S.A.

ANEXO N°13

**MANUAL PRELIMINAR
PARA LA CONSTRUCCIÓN
DE *CAISSONS* DE CONCRETO**

AGRADECIMIENTO

El desarrollo del presente manual fue apoyado, en experiencia, por especialistas en puentes, tanto estructural como constructivo y, además, por nuestro asesor el ingeniero Ivan Bragagnini.

Agradecemos a los especialistas de la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC), el Ing. Freddy Duran por su contribución estructural y a la Ing. Elsa Carrera por su colaboración en la búsqueda de nuevos aportes. Asimismo, brindamos nuestra gratitud a los especialistas de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), los ingenieros Esteban Ortiz, Victor Sanchez, César Fuentes Rivera y César Fuentes (hijo), por sus conocimientos y paciencia en las entrevistas.

También agradecemos a los ingenieros José Lama y Giuliano Otárola por las recomendaciones y alternativas de solución brindadas y, además, reconocemos y gratificamos al Ing. Eduardo Mayhuire por los detalles constructivos del puente Pampa Blanca y por algunas de las recomendaciones que se detallan en este manual.

ÍNDICE DE CONTENIDO

1. OBJETIVO	2
2. APLICACIÓN	2
3. GENERALIDADES.....	2
4. GLOSARIO DE TÉRMINOS	3
5. PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO: <i>WELL FOUNDATION</i>.....	3
5.1 PLATAFORMA DE TRABAJO	3
5.2 CONSTRUCCIÓN DEL BROCAL	3
5.3 CONSTRUCCIÓN DE PAREDES DE NÚCLEO	5
5.4 CONSTRUCCIÓN DEL TAPÓN, NÚCLEO Y TAPA	6
6. PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO BAJO LA SUPERFICIE	10
6.1 PRIMER ANILLO	11
6.2 ARMADO DE ANILLOS INTERMEDIOS	12
6.3 ÚLTIMO ANILLO	13
6.4 NÚCLEO Y TAPÓN DE <i>CAISSON</i>	13
6.5 TAPA DE <i>CAISSON</i>	14
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	18

1. OBJETIVO

Proveer el procedimiento constructivo para la ejecución de *caissons* de concreto para la fundación de puentes en el Perú, mediante el método convencional *Well foundation*. Además, suministrar el procedimiento constructivo de la optimización del método convencional, el cual se denominada Bajo la superficie.

2. APLICACIÓN

El presente escrito es un manual preliminar que será de utilidad para la ejecución de *caissons* de concreto, mediante los métodos *Well foundation* y Bajo la superficie.

3. GENERALIDADES

3.1 Caissons de concreto

Estructura rectangular o circular y de diversos materiales como, por ejemplo, concreto o metal.

3.2 Componentes

Si bien los *caissons* pueden tener diversa geometría y material, sus componentes siempre serán los mismos. A continuación, la figura 1 detalla los componentes de un *caisson* de concreto.

Figura 1: Componentes de un *caisson* de concreto. Fuente: Bragagnini, I.

4. GLOSARIO DE TÉRMINOS

Caisson: Estructura de concreto, construida en seco y utilizada como método de excavación con presencia de agua que forma parte de la fundación de un puente.

Cámara y/o tapón: Área inferior de un *caisson*, necesario para el hincado del mismo. Alberga obreros que excavan desde el interior.

Chuzar: Acción de hincar continuamente el concreto fresco con una varilla de acero con la finalidad de que el aire atrapado desaparezca.

Brocal: Elemento de concreto armado que sirve como base del *caisson* de concreto, el cual contiene al borde cortante.

Borde cortante: Estructura metálica, utilizada para proteger al concreto de posibles roturas producidas por la fricción de punta durante la excavación.

Azuche de acero: Componente metálico del borde cortante, ubicado en el extremo inferior del *caisson* para perforar el terreno evitando que éste sea dañado.

Núcleo: Tramo medio de un *caisson* que es rellenado con concreto ciclópeo o simple.

Tapa: Elemento que sella el *caisson* de concreto y que sirve de zapata al pilar de un puente.

Well foundation: Procedimiento constructivo convencional de *caisson* de concreto que se basa en la construcción en seco, es decir, por encima de la cota del terreno natural para que luego sea hincado manualmente o con maquinaria.

5. PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO: *WELL FOUNDATION*

5.1 Plataforma de trabajo

- Limpiar y nivelar el área donde se ejecutará la construcción.
- Colocar el terreno de préstamo sobre la superficie y compactar. Las plataformas pueden variar de 0.20 a 0.30 m.

5.2 Construcción del brocal

- Primero proceder con el trazo geométrico del *caisson*, sobre la plataforma.

- Colocar el borde cortante, dándole la forma del *caisson* de concreto. Luego, doblar un azuche de acero de aproximadamente 5 cm y anclarlo en la plataforma.
- Verificar las dimensiones interiores y exteriores del borde cortante (altura promedio 0.4 m y 5/8" de espesor), según las especificaciones del proyectista. De preferencia soldar las tiras de borde cortante.
- Colocar el acero de refuerzo del brocal, doblar los ganchos inferiores, dejar empalmes mínimos de 30db y posteriormente, encofrar. El encofrado debe apuntalarse tanto en la parte exterior como interior del *caisson*.

La altura del brocal de un *caisson* debe variar entre 2.5 y 3.5 m y se debe vaciar en dos partes. Primero para evitar una inadecuada vibración del concreto y, segundo, para que no se produzca desfase en el encofrado.

- Vaciar el concreto del primer anillo de brocal, debe tener una resistencia mínima de $f'c=210\text{kg/cm}^2$ o, en su defecto, lo especificado por el plano estructural o las especificaciones técnicas. Vibrar el concreto después de vaciar.
- Desencofrar el primer anillo de brocal y curar la cara interior.
- Excavar dentro de la cámara del *caisson*. La excavación debe iniciar con la extracción del suelo que se encuentra en el medio; luego, de manera coordinada se debe excavar el extremo interior, alrededor de 30cm, para que el elemento se hunda por su propio peso.

Extraer el suelo excavado utilizando Winches o maquinaria pesada con mano de obra especializada.

Figura 2: Encofrado de primer anillo de Brocal. De rojo borde cortante con azuche de 5cm. Fuente: Propia.

- Inspeccionar con una estación total la verticalidad del *caisson*.

RECOMENDACIÓN: Si al evaluar el desplome del *caisson* se tiene problemas, se recomienda excavar del otro lado del desplome, controlando el aplomado con el topógrafo del proyecto.

- Dejar una altura de *caisson* no menor a 0.20m por encima de la cota de la plataforma, como prevención a la caída de objetos y/o escorrentías que afecten el interior de la excavación.
- Ejecutar la segunda parte del brocal.

5.3 Construcción de paredes de núcleo

- Ejecutar en anillos el núcleo o muros del *caisson* y, además, construirlos monolíticamente. La altura aproximada debe estar comprendida entre 1.0 y 1.50m, para evitar desfase del encofrado durante el vaciado de concreto.
- Empalmar el acero de brocal con el del núcleo del *caisson* a una longitud mínima de 30db.
- Habilitar el encofrado del anillo con acero colocado y verificar la verticalidad de la obra falsa.
- Vaciar el primer anillo del núcleo considerando que la resistencia del concreto debe ser la misma a la vaciada en el brocal.
- Colocar las motobombas o electrobombas, en la superficie exterior, y conectarlas a un tubo de impulsión y succión. El tubo de succión debe estar cubierto por un filtro de partículas para no deteriorar las bombas por abrasión.
- Inspeccionar que el sistema de bombeo se encuentre en óptimas condiciones, para ellos se debe evaluar la presión de succión y el tiempo encendido.
- Desencofrar el anillo y curar la cara interior del elemento.
- Excavar la parte central del interior del *caisson* y retirar el material con Winches o maquinaria pesada, luego excavar bajo el contorno del núcleo. La excavación debe variar entre 10 y 20cm de altura ya que el hundimiento del elemento será más rápido debido que tiene mayor peso.

RECOMENDACION: El exceso de rozamiento es común durante la excavación y como consecuencia, se debe paralizar el hincado de *caisson*. Por ello, se recomienda generar un sismo local debidamente controlado para inducir el hincado.

Por otra parte, es común que durante la excavación se encuentre bolonería que dificulte el trabajo, es por eso que se recomienda explosión controlada, cuando la roca tenga grandes dimensiones, y martillos neumáticos, cuando la roca tenga una dimensión mediana. Estos fragmentos de roca pueden no ser retirados en su totalidad ya que también se puede usar como piedra desplazadora del concreto ciclópeo.

- El material extraído del interior del *caisson* se vaciará en el contorno exterior para rellenar los vacíos, producto de la excavación. Sólo si la forma del elemento es dentado en el brocal, de lo contrario se tendrá que eliminar dicho material.
- Dejar entre 20 y 25 cm de núcleo, por encima del nivel de terreno natural, como medida de prevención a las escorrentías de agua y la caída de objetos.
- Ejecutar los anillos posteriores hasta culminar lo indicado en los planos siguiendo el procedimiento ya mencionado.

Figura 3: Excavación para hincado de caisson y material vertido en los bordes exteriores para su posterior compactación. Fuente: Propia.

5.4 Construcción del tapón y tapa

- Seccionar el *caisson* según el número de cámaras o criterio de los ingenieros de campo.

- Inspeccionar el sistema de control de agua evaluando la presión para la succión y abrasión de las bombas.
- Vaciar todo el tapón de *caisson*, con la misma calidad de concreto utilizado en el brocal y núcleo, según el espesor definido por el estructural.
- Habilitar drenes de cada una de las secciones con pendiente hacia un sector en específico para que así por gravedad se capte el agua subterránea en un solo sector.
- Vaciar el concreto de tapón, a excepción del sector con el agua derivada.
- Colocar una batea encima del tapón vaciado y succionar el agua del sector faltante y luego maniobrar rápidamente el vaciado del mismo.
- Rellenar el núcleo del *caisson* con concreto simple o ciclópeo.
- Para concreto ciclópeo, se usará el Winche para colocar la piedra desplazadora sobre el concreto simple, sin lanzarla o tirarla, para no dañar la tapa y/o núcleo de *caisson* ya vaciado. Luego, chuzar el concreto con una varilla de ½” o 5/8”.
- Vaciar la tapa o zapata del *caisson*, con la misma calidad de concreto utilizado en el brocal, núcleo y tapón.

El procedimiento constructivo de plataforma, brocal y paredes de núcleo se visualiza en el flujograma 1 y el procedimiento de tapón, núcleo y tapa se concibe en el Flujograma 2. Además se desarrolla un cuadro de criterios de aceptación preliminar para cada flujograma, ya que puede variar según la supervisión de un proyecto, ver tabla 1 y 2.

Flujograma 1: Procedimiento constructivo de estructura de *caisson*, plataforma, brocal y paredes de núcleo. Fuente: Propia.

Flujograma 2: Procedimiento constructivo de relleno *caisson*, tapón, núcleo y tapa. Fuente: Propia.

Tabla 1: Criterios de aceptación para estructura de *caisson* de concreto – *Well foundation* (Flujograma 1).

Proceso / actividades	Características a inspeccionar	Método de inspección	Documentos de referencia	Unidad de medición	Criterios de aceptación	Responsables	
						Jefe resp	Ing. Resp
Caisson de concreto Well foundation -	Longitud de traslape de acero de refuerzo	Inspección visual con wincha	NTP E-060	Una medición por cada 1 m	Empalme mínimo de refuerzo de 12 db	Capataz	No
	Resistencia a la compresión de concreto de	Prensa de compresión para rotura de	ASTM C31 ASTM C39	Mínimo 3 probetas por cada 120m3	Resistencia de concreto ≥ 210 kg/cm2	No	Ing. calidad
	Verticalidad	Inspección visual con estación total	Especificaciones técnicas para la construcción de captaciones especiales	Dos mediciones por cada anillo excavado	Variación de ± 1 mm desde el eje	Capataz	No
	Succión de agua subterránea	Manómetro	Evaluación para sistemas de bombeo de agua BID	Una medición por cada 7 días	± 2 mmHg respecto de la presión de la bomba, siempre mayor de 0mmHg	No	Ing. calidad

Fuente: Propia.

Tabla 2: Criterios de aceptación para relleno de *caisson* de concreto – *Well foundation* (Flujograma 2).

Proceso / Actividades	Características a inspeccionar	Método de inspección	Documentos de referencia	Unidad de medición	Criterios de aceptación	Responsables	
						Jefe resp	Ing. Resp
Vaciado de concreto: Tapón, relleno (concreto simple) y tapa de caisson	Succión de agua subterránea	Manómetro	Evaluación para sistemas de bombeo de agua BID	Una medición cada 7 días	± 2 mmHg respecto de la presión de la bomba,	No	Ing. calidad
	Resistencia a la compresión de concreto de caisson	Prensa de compresión para rotura de probetas	EG-2000 - Cap. 6 Sección 610 / E-704	1 juego por cada 50 m3, pero no menor de 1	Resistencia de concreto ≥ 210 kg/cm2	No	Ing. calidad

Fuente: Propia.

6. PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO BAJO LA SUPERFICIE

El procedimiento constructivo Bajo la superficie se describe detalladamente en líneas posteriores. Este procedimiento presenta restricción de aplicación en suelos sueltos, de baja cohesión y de alta permeabilidad.

6.1 Primer anillo

- Excavar una profundidad igual a la altura del primer anillo, según lo indicado en el plano estructural, se recomienda un rango de 1 a 1.5m. La excavación podrá ser manual o con dragas de excavación.
- Colocar un sistema de control de agua, puede contener electrobombas o bombas sumergibles.
- Anclar el acero vertical de la malla de refuerzo a tierra. La mitad de su longitud de empalme debe anclarse de forma aleatoria para permitir la unión con el anillo inferior. Se recomienda este procedimiento para evitar fisuraciones posteriores (ver figura 4).

El refuerzo horizontal para una sección rectangular de *caisson* debe considerar, en los encuentros de esquina, los ganchos indicados en el plano estructural siendo como mínimo 12db.

- Encofrar el primer anillo. Como parte del procedimiento Bajo la superficie se considera el uso de encofrado metálico el cual debe estar compuesto por formaletas de 1.00 a 1.50m de alto, correspondiente a la altura del anillo. Además, se debe colocar puntales interiores en dirección perpendicular a los lados del *caisson* para dar soporte al encofrado.
- Colocar junta *Water stop* o algún otro producto que selle el empalme entre anillos.

Figura 4: Posición del refuerzo vertical y horizontal para el procedimiento Bajo la superficie. Fuente: Propia.

- Vaciar el concreto del primer anillo, tener en cuenta que la resistencia mínima será de 210 kg/cm². El vaciado tendrá 0.40 m adicionales sobre la cota del terreno natural que servirá para prevenir la caída de objetos dentro del cuerpo del *caisson*, así como también funcionará como protección ante eventuales escorrentías.
- Desencofrar el primer anillo y curar la cara interior.

6.2 Armado de anillos intermedios

- Inspeccionar el sistema de control de agua, evaluando la presión de succión y abrasión de las bombas.
- La excavación del segundo anillo y todos los anillos siguientes tendrán una inclinación mínima de 5° hacia el interior del *caisson*. Se recomienda utilizar winches eléctricos con baldes para facilitar la extracción del material de excavación.

RECOMENDACION: En caso el suelo tienda a ser inestable se recomienda la utilizar encofrado perdido con anclaje lateral.

Además, la asignación del ángulo de inclinación para excavación dependerá de las indicaciones del especialista estructural.

- Colocar la malla de refuerzo de igual forma a la del primer anillo.
- Encofrar con una inclinación mínima de 5° con respecto a la vertical, en dirección al interior del *caisson*. De esta forma, se asegura el vaciado de concreto de ese anillo con una “ventana” de vaciado mínima de 10 cm.
- Vaciar el concreto de anillo típico empleando un balde cónico de descarga con manguera acoplado al winche eléctrico, ver figura 6.

Figura 6: Vaciado de concreto en el segundo anillo mediante una manguera conectada a un balde cónico de descarga. Fuente: Propia.

- Desencofrar el anillo típico y curar la cara interior.

6.3 Último anillo

- Excavar de igual forma que en los anillos intermedios utilizando un winche eléctrico, con la distinción que la inclinación del talud de excavación será mayor, la especificación de dicho ángulo deberá ceñirse a la evaluación y diseño estructural, correspondiente.
- Proceder con la colocación de acero, encofrado, vaciado de concreto, desencofrado y curado según los lineamientos tomados para los anillos intermedios.

6.4 Núcleo y tapón de *caisson*

- Vaciado del tapón con concreto $f'c$ 210 kg/cm² como resistencia mínima. En el caso de que se presente sub presión, se recomienda realizar un vaciado fraccionado, donde se conduzca toda el agua a una sola fracción de área y permita vaciar en seco las demás fracciones. La zona a la que se está conduciendo el agua deberá bombearse continuamente mediante electrobombas sumergibles. Y respecto al vaciado de la última zona, este deberá ser agresivo para evitar que el agua aflore nuevamente.
- Rellenar el núcleo con concreto simple o ciclópeo.

El diseño de mezcla de concreto ciclópeo deberá ser un 60% de concreto simple y 40% de piedras desplazadoras, se recomienda colocar la piedra manualmente y chuzar el concreto para tener homogeneidad y eliminar aire atrapado.

- El proceso se repetirá hasta llegar al nivel requerido.

6.5 Tapa de *caisson*

- Considerar que el espacio de la tapa debe presentar confinamiento inferior (por el núcleo) y lateral (por paredes del caisson).
- Vaciar el concreto por capas, mediante el empleo de un balde cónico de descarga con manguera, acoplado al winche eléctrico.

El procedimiento constructivo de brocal y paredes de núcleo se visualiza en el flujograma 3 y el procedimiento de tapón, núcleo y tapa se concibe en el Flujograma 4. Además, se desarrolla un cuadro de criterios de aceptación preliminar para cada flujograma, ya que puede variar según la supervisión de un proyecto, ver tabla 3 y 4.

Figura 7: Sección transversal del *caisson* ejecutado mediante el procedimiento Bajo la superficie. Fuente: propia.

Flujograma 4: Procedimiento constructivo de relleno *caisson* mediante Bajo la superficie, tapón, núcleo y tapa. Fuente: Propia.

Tabla 3: Criterios de aceptación para estructura de *caisson* de concreto – *Bajo la superficie* (Flujograma 3).

Proceso / actividades	Características a inspeccionar	Método de inspección	Documentos de referencia	Unidad de medición	Criterios de aceptación	Responsables	
						Jefe resp	Ing. Resp
Caisson de concreto Bajo la superficie -	Succión de agua subterránea	Manómetro	Evaluación para sistemas de bombeo de agua BID	Una medición cada 7 días	± 2mmHg respecto de la presión de la bomba, siempre mayor de 0mmHg	No	Ing. calidad
	Longitud de traslape de acero de refuerzo	Inspección visual con wincha	NTP E-060	Una medición por cada 1 m	Empalme mínimo de refuerzo de 12 db	Capataz	No
	Resistencia a la compresión de concreto de caisson	Prensa de compresión para rotura de probetas	ASTM C31 ASTM C39	Mínimo 3 probetas por cada 120m3	Resistencia de concreto ≥ 210 kg/cm2	No	Ing. calidad
	Inclinación de terreno	Estación total	Especificaciones técnicas del proyecto	Una inspección por cada pared de caisson	Variación de excavación de ± 5mm contados en la base del anillo	Capataz	No

Fuente: propia

Tabla 4: Criterios de aceptación para relleno de *caisson* de concreto – *Bajo la superficie* (Flujograma 4)

Proceso / Actividades	Características a inspeccionar	Método de inspección	Documentos de referencia	Unidad de medición	Criterios de aceptación	Responsables	
						Jefe resp	Ing. Resp
Vaciado de concreto: Tapón, relleno (concreto ciclópeo) y tapa de caisson	Succión de agua subterránea	Manómetro	Evaluación para sistemas de bombeo de agua BID	Una medición cada 7 días	± 2mmHg respecto de la presión de la bomba,	No	Ing. calidad
	Distancia libre entre piedras / Volumen de agregado	Inspección visual	EG-2000 - Cap. 6 Sección 610	Una medición por cada capa	Distancia mínima de 15cm / El volumen de piedra no podrá ser	Capataz	No
	Resistencia a la compresión de concreto de caisson	Prensa de compresión para rotura de probetas	EG-2000 - Cap. 6 Sección 610 / E-704	1 juego por cada 50 m3, pero no menor de 1	Resistencia de concreto ≥ 210 kg/cm2	No	Ing. calidad

Fuente: propia

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Universidad Distrital Francisco José de Caldas. (2016). Especificaciones Técnicas para Construcción de Viviendas. Recuperado: <https://sites.google.com/a/correo.udistrital.edu.co/manualviviendas/2-especificaciones-tecnicas-de-construccion/Cimentacion/e-concreto-ciclopo>
- [2] Bragagnini, I. (2017) Caissones - Cajón, Campana, pozos, brocales [Material de clase]. Construcciones especiales, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC), Lima.
- [3] Organización Panamericana de la Salud (OPS) (2005) Especificaciones técnicas para la construcción de captaciones especiales. Perú. Recuperado de: http://www.bvsde.paho.org/bvsacg/guialcalde/2sas/d23/025_Construccion_captaciones_especiales/Construcci%C3%B3n_captaciones_especiales.pdf
- [4] Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) (2016) Manual de Puentes. Recuperado de: http://transparencia.mtc.gob.pe/idm_docs/P_recientes/8044.pdf