

PUENTE ATIRANTADO SOBRE EL RÍO CUARTO SISTEMA DE MONTAJE DE PILAS METÁLICAS

Carlos Gerbaudo
Ing. Civil

ingroup@ingroup-op.com.ar
INGROUP Oficina de Proyectos

Sergio Vanina
Ing. Civil

s.vanina@ale-heavylift.com
ALE HEAVYLIFT

Cristian Abella
Ing. Civil

ingroup@ingroup-op.com.ar
INGROUP Oficina de Proyectos

Mauro Lospinoso
Ing. Civil

m.lospinoso@ale-heavylift.com
ALE HEAVYLIFT

Resumen

El proceso constructivo del Puente Atirantado sobre el Río Cuarto contempla el verticalizado de la componente metálica de las pilas principales mediante un procedimiento de rebatimiento de las piezas sobre un par de bisagras solidarias al tramo inferior de hormigón de la pila, con un sistema especial de montaje compuesto por gatos hidráulicos comandados electrónicamente, un pórtico auxiliar de volteo, cables de acero y estructuras auxiliares.

En el presente trabajo se exponen los lineamientos y criterios de diseño del sistema de montaje, una descripción del sistema y de sus componentes principales, el método de control de procedimientos implementado en obra y un análisis comparativo entre los resultados previstos en el análisis estructural y los valores medidos en obra.

Abstract

The method of construction of cable stayed bridge over the Rio Cuarto looked into the process the metal component of the main pylon verticalized to its final position through a procedure to twist round of the piece over a pair on hinges of solidarity to the lower section of concrete pylon, of parts previously assembled horizontally on the deck, with a special mounting system consists of electronically controlled hydraulic jacks, an auxiliary frame rotation, steel cables and auxiliary structures.

This paper presents the design guidelines and criteria of the assembly system, a description of the system and its main components, the control method implemented in work procedures and a comparative analysis between expected results in the structural analysis and values measured on site.

Introducción

El método constructivo utilizado en el puente atirantado sobre el Río Cuarto para el verticalizado de la componente superior metálica de las pilas principales, ubicada inicialmente en posición horizontal sobre el tablero, consistió en el rebatimiento de la pila mediante un sistema especial de montaje.

La componente metálica de las pilas principales del puente fue construida en taller, y consiste en dos fustes inclinados de sección cajón armada, reforzada con perfiles y chapas de acero, con un tramo superior formado por dos cajones metálicos verticales donde se anclan los obenques, vinculados con dos vigas de arriostramiento también metálicas.

El extremo superior de la pila posee los tubos de encofrado metálicos con los perfiles de soporte y placas de acero de apoyo de los obenques, lo que permitió la prefabricación completa en el taller de esta pieza de geometría compleja.

La componente metálica de cada pila principal se dividió en cuatro partes, los dos fustes inclinados y las dos columnas verticales del tramo superior, cada una de estas últimas piezas con dos semivigas de arriostramiento soldadas en taller, resultando cada una de estas partes de dimensiones y peso adecuado que permitió el transporte a la obra y posterior montaje en posición horizontal sobre el tablero del puente, utilizando un equipo convencional de grúas, con un mínimo de uniones abulonadas in situ.

De esta manera se realizó el ensamblaje de la pila metálica completamente sobre el tablero del puente, en posición horizontal, adicionándole todos los elementos y estructuras auxiliares necesarios para el proceso de rebatimiento de la pila y para el montaje de los obenques, tales como orejetas de tiro, pasarelas, andamios, escaleras y guinches para el izaje de piezas.

Finalmente el verticalizado de la componente metálica de las pilas principales se realizó mediante un procedimiento de rebatimiento de la pieza sobre un par de bisagras solidarias al tramo inferior de hormigón de la pila, con un sistema especial de montaje compuesto por gatos hidráulicos, un pórtico auxiliar de volteo, cables de acero de alta resistencia, y piezas y estructuras auxiliares para la fijación de los dispositivos de tiro a la propia estructura del puente.

El peso total de la componente metálica de la pila principal con todos los aditamentos y estructuras auxiliares resultó de 200 t.

Una vez finalizada la maniobra y ubicada la pila en su posición definitiva se procedió a su fijación de la unión entre la componente metálica y el fuste de hormigón de la pila por medio de barras de acero especial de alta resistencia fijadas con un compuesto químico, y posteriormente se rellenó con grout cementicio el espacio comprendido entre la placa de apoyo y la superficie de hormigón.

En la Figura 1 se observa una vista general de la maniobra de rebatimiento de la pila metálica N° 5 del puente.



Figura 1a. Vista general del rebatimiento de la Pila N° 5



Figura 2b. Secuencia completa del rebatimiento de la Pila N° 5

Descripción general del sistema de rebatimiento

Para la ejecución del rebatimiento de las pilas principales se utilizó un sistema compuesto por una estructura metálica auxiliar denominada pórtico de volteo, dos unidades de izado hidráulicas de 200 t de capacidad unitaria para el verticalizado, una unidad hidráulica de 70 t de capacidad para la retenida, y un conjunto de cables de tiro y piezas auxiliares para la fijación de los dispositivos de tiro a la propia estructura del puente.

Todos los componentes del sistema especial de montaje fueron provistos por la empresa ALE, y son elementos modulares de dimensiones apropiadas que permiten su transporte en contenedores y posterior montaje en obra con equipos convencionales.

El pórtico de volteo y las unidades de izado de 200 t como la de 70 t se encontraban rotuladas al tablero, lo que permitió variar su ángulo en función de cada etapa del verticalizado de la pila.

El equipamiento del sistema de montaje utilizado para la maniobra de rebatimiento fue el siguiente:

- 2 Unidades hidráulicas de izado de 200 t.
- 1 Unidad hidráulica de izado de 70 t.
- 1 Grupo de generación hidráulica.
- 3 Electroválvulas de control para el sistema de izado.
- 1 Bobina de cable de acero especial de pretensado.
- 1 Computadora para sincronización del izado.
- 1 Pórtico metálico de volteo auto estable de capacidad suficiente.
- Rótulas de vinculación del pórtico al tablero del puente.
- Rótulas de vinculación de los marcos de las unidades al tablero del puente.

Además el propio diseño de las pilas y tablero del puente previó los elementos complementarios para el rebatimiento de las pilas, tales como las bisagras de giro solidarias a la parte inferior de las pilas, las orejetas de tiro ubicadas en la parte superior de las pilas, y los refuerzos en el tablero y componente de hormigón de las pilas para resistir las acciones introducidas durante la maniobra de rebatimiento.

Descripción de los componentes de montaje

A continuación se realiza una descripción general de los principales componentes del sistema de montaje.

Pórtico de volteo

El pórtico de volteo esta compuesto por dos columnas metálicas de sección circular hueca, una viga travesaño superior, puntales y diagonales de arriostramiento transversal. Posee una altura de 24 m y una separación entre patas de 6 m. Se vinculo mediante rótulas al tablero del puente para permitir su rotación durante la maniobra de rebatimiento. Este pórtico de volteo fue utilizado para redirigir a través de los cables, la fuerza proporcionada por las unidades hidráulicas, de forma de lograr en todo momento una acción de levantamiento que permitió el verticalizado de la pila.

El pórtico de volteo se ensambla sobre el tablero del puente por medio de uniones abulonadas y con la ayuda de grúas de capacidad de carga media. En la Figura 2 se aprecia la geometría del pórtico de volteo y una vista general de su posición en obra al inicio de la maniobra de rebatimiento.

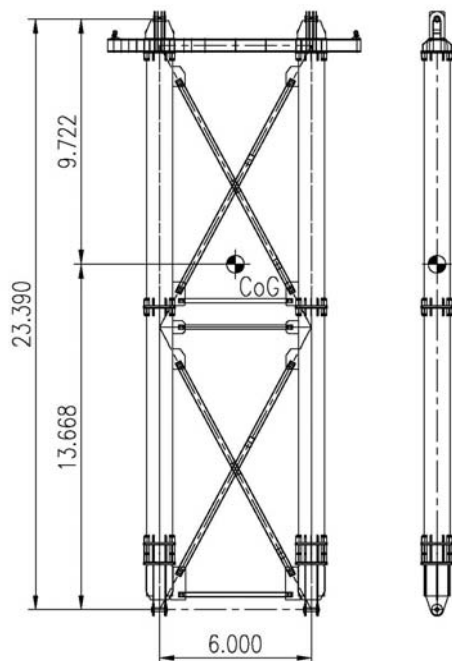


Figura 3. Pórtico de volteo

Sistemas de tiro y retenida

Los elementos que forman el sistema de tiro y retenida consisten en las propias unidades hidráulicas de tiro con sus respectivos marcos de posicionamiento y fijación de las unidades hidráulicas al tablero del puente, con la inclusión de pequeños gatos de doble efecto para la correcta alineación de los gatos y sus respectivos cables a medida que progresa la maniobra.

Todos los componentes del sistema de tiro y retenida fueron ensamblados y posicionaron sobre el tablero del puente mediante el uso a de autoelevadores y grúas pequeñas.

El sistema de tiro se compone de dos unidades SLS2000 de 200 toneladas de capacidad montadas sobre dos marcos metálicos de sostenimiento articulados en su base, con dos gatos de doble efecto para controlar la alineación. Los marcos de sostenimiento se fijaron al tablero en correspondencia con una de sus vigas transversales, utilizando barras de anclaje pretensadas y conectores de corte. Durante la maniobra los marcos reaccionan contra el tablero con fuerzas de magnitud y dirección variable. En la Figura 3 se presenta un esquema del sistema de tiro y una vista del componente montado en obra.

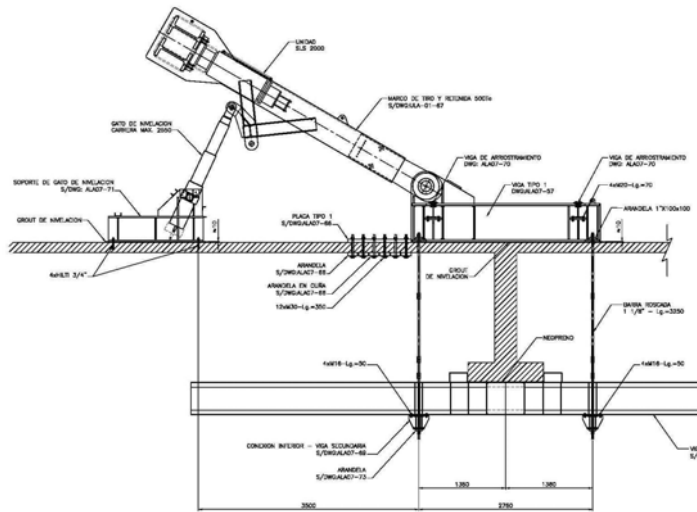


Figura 3. Sistema de tiro

El sistema de retenida es similar al de tiro pero de dimensiones y capacidad más reducida, y se compone de una unidad hidráulica SLS700 de 70 toneladas de capacidad montada en un marco metálico de sostenimiento para el posicionamiento y fijación de la unidad hidráulica al tablero del puente, con el agregado de un pequeño gato de doble efecto para la correcta alineación de la unidad de retenida con sus correspondientes cables. En la Figura 4 se presenta un esquema del sistema de retenida y una vista del componente montado en obra.

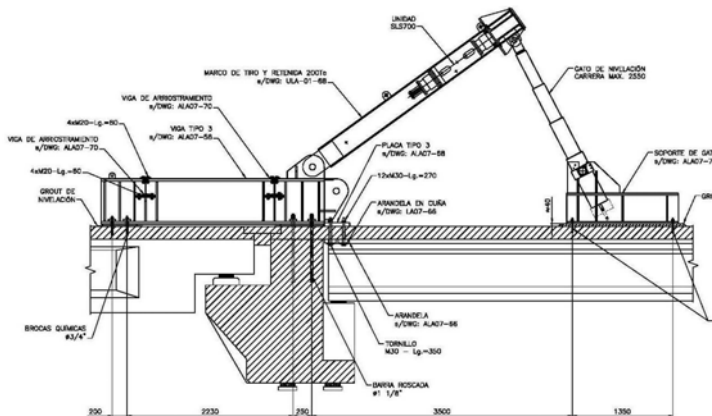


Figura 4. Sistema de retenida

Bisagra de giro

La bisagra de giro vinculaba la parte inferior de los fustes metálicos de la pila principal con la parte superior del componente de hormigón armado de dicha pila, y el objeto de esta pieza especial era permitir el rebatimiento o giro de la pila, garantizando un correcto alineamiento de la sección de hormigón con la metálica para su posterior unión definitiva en obra mediante barras de anclaje.

La parte principal de bisagra que contenía el buje de giro se posiciono sobre una ménsula dejada ex profeso en la parte superior de la componente de hormigón de la pila, mientras que el resto de la bisagra se encontraba solidaria en la parte inferior del fuste de la componente metálica.

Esta pieza metálica se diseño con una estructura compuesta por chapas y perfiles de acero, y fue calculada teniendo en cuenta todos los condicionantes geométricos y sollicitaciones máximas actuantes.

En efecto, la bisagra se diseño para soportar las fuerzas resultantes de la maniobra de rebatimiento, de dirección y magnitud variable, resultando dos condiciones criticas en cuanto a las fuerzas actuantes sobre la rótula, la primera correspondiente a la condición de despegue de la pila ubicada en posición horizontal, generándose en ese momento la máxima fuerza horizontal sobre la bisagra, y la segunda condición critica corresponde a la pila ubicada con una inclinación de 63° respecto a la horizontal, donde se produce la máxima combinación de fuerza horizontal y vertical actuante en el buje de la bisagra.

En la Figura 5 se observan vistas generales de la bisagra de giro.



Figura 5. Bisagra de giro

Cables de conexión

La conexión de los distintos componentes del sistema de rebatimiento se realizo por medio de cables formados por cordones de acero pretensado de alta resistencia de 15.7 mm de diámetro. Cada cordón posee una carga minima de rotura de 28 toneladas

y una carga admisible de 10 t, y el dimensionado de cada cable de conexión se realizó a partir de la capacidad máxima de carga de las correspondientes unidades hidráulicas.

Descripción del proceso de rebatimiento

Una vez ubicados en posición y verificados todos los componentes del sistema de montaje, se inicia el proceso de rebatimiento. En primer lugar, se puso en carga las unidades de tiro, realizando dos escalones de cargas previos a la carga de despegue y se inspeccionaron todos los elementos del sistema de montaje y componentes estructurales del puente que participan del sistema resistente. En la misma verificación se controlaron deformaciones relativas de los marcos de posicionamiento del sistema de tiro respecto al tablero y deformaciones en la bisagra de tiro respecto a la componente de hormigón de pila principal, constatándose que el sistema respondía en función de lo proyectado.

A posteriori, se elevo la carga de las unidades de tiro hasta lograr el despegue de la pila metálica, y se realizo una nueva inspección visual de los distintos componentes del sistema. Finalizada este último chequeo, se procedió con la maniobra de rebatimiento hasta que la pila alcanzo un ángulo de aproximadamente 60° respecto de la horizontal, en ese momento se puso en carga la unidad de retenida y se procedió hasta finalizar la maniobra accionando en simultaneo los sistemas de tiro y retenida.

En la Figura 6 se muestra esquemáticamente las secuencias principales del proceso de rebatimiento.

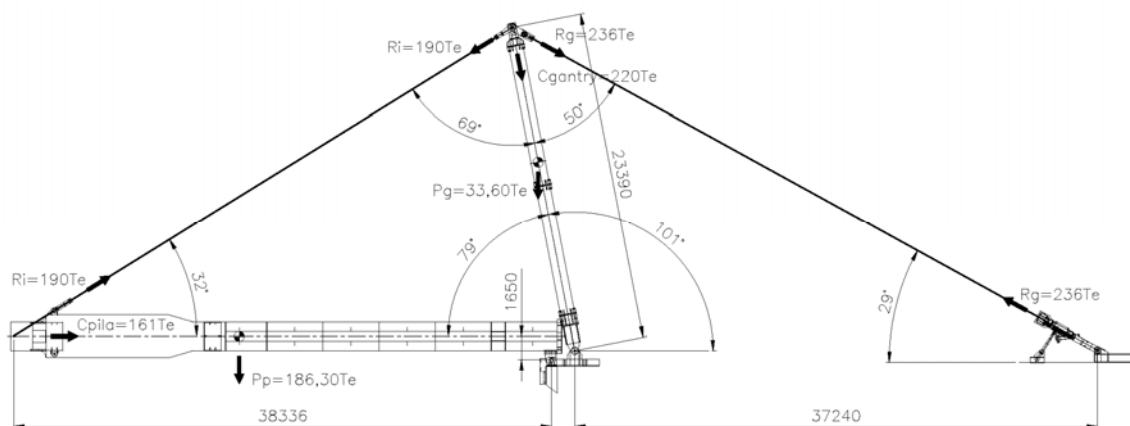


Figura 6a. Inicio de de maniobra de rebatimiento en el momento del despegue

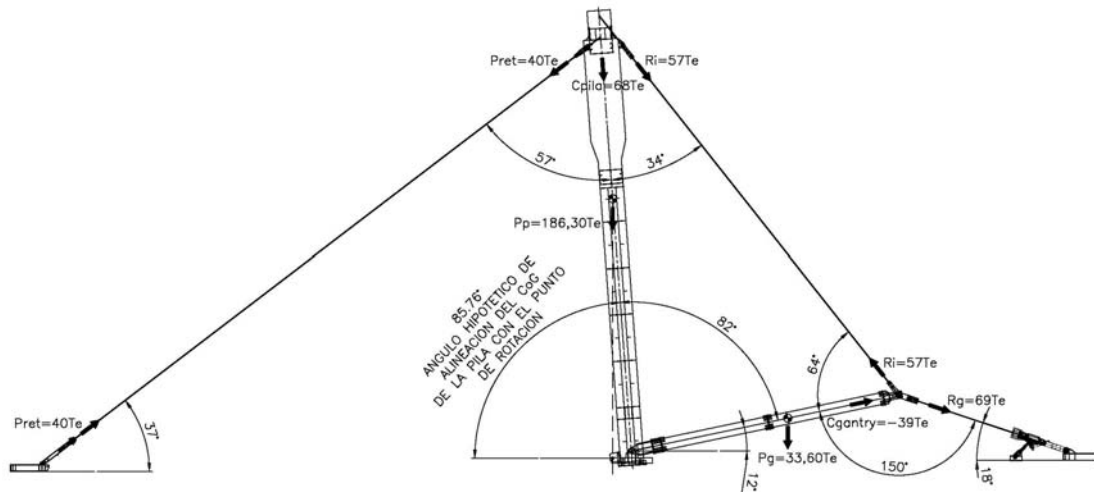


Figura 6b. Alineación de centro de gravedad con el eje de rotación

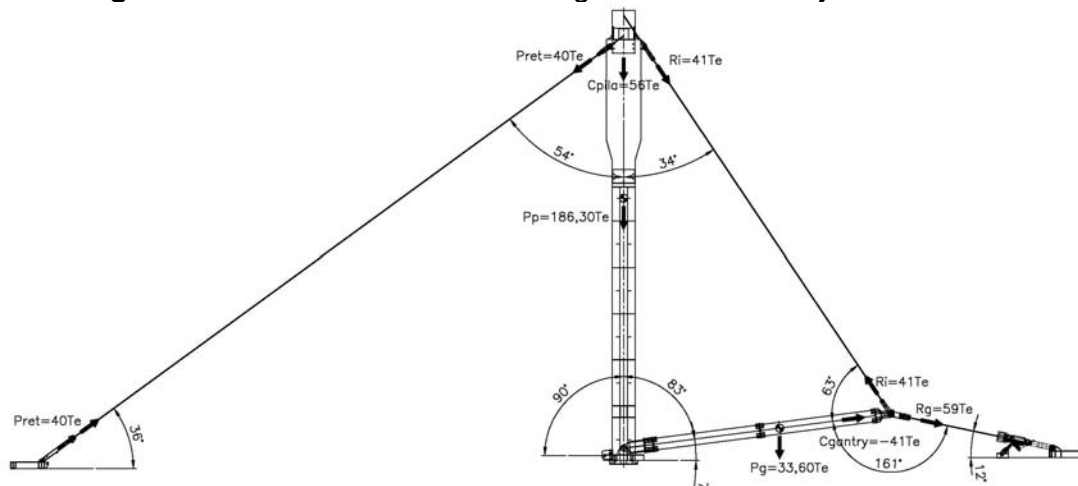


Figura 6c. Posición final de la pila al finalizar el proceso de rebatimiento

Verificaciones estructurales del puente

El método de montaje utilizado para el rebatimiento de las pilas metálicas genera sobre la propia estructura del puente solicitaciones que deben ser verificadas en la etapa constructiva, y además, debieron diseñarse todas las conexiones de las piezas especiales del sistema de montaje con la estructura del puente.

Por un lado se debió verificar la componente de hormigón de las pilas principales, cuyos fustes fueron sometidos a una fuerza horizontal durante el despegue de la pila metálica.

Por otro lado fue necesario transmitir las reacciones en el marco del sistema de tiro al tablero del puente, mediante dos sistemas independientes, el primero para transferir las fuerzas horizontales a la losa de tablero mediante un conector de corte por fricción y el segundo para transmitir las verticales a la viga transversal del tablero mediante barras de acero pasantes ancladas a un travesaño inferior metálico. Estas barras se pretensaron

para mejorar la rigidez del sistema y evitar movimientos no deseados en el marco durante la maniobra.

Para el caso del sistema de retenida se utilizó un concepto similar para transferir las cargas al tablero.

Por último fue necesario verificar las cargas transmitidas a la estructura del puente por el pórtico de volteo, que transmite una fuerza en cada pata a través de su base de apoyo de dirección y magnitud variable durante la maniobra de rebatimiento. Estas fuerzas fueron resistidas mediante dos sistemas independientes, uno encargado de transferir la carga horizontal a la losa del tablero, y otro para transmitir las cargas verticales hacia la viga travesaño inferior de la pila por medio de cuatro columnas auxiliares de hormigón armado.

Controles realizados durante la maniobra

Durante la maniobra de rebatimiento se realizaron diversos controles para garantizar la seguridad en obra, y además, con el objeto de poder detectar a tiempo cualquier tipo de anomalía o falla en algún componente del sistema. Los controles realizados durante la maniobra se detallan a continuación.

- Carga de trabajo de las unidades de tiro respecto de la carga teórica.
- Carga de trabajo de la unidad de retenida respecto de la carga teórica.
- Longitud de cable recogido por las unidades de tiro.
- Angulo de inclinación de la pila con respecto al tablero (topografía).
- Medición de deformaciones de la pila principal (Extremos superior y base).
- Control de desplazamientos horizontales en marcos de tiro.
- Inspección visual de todos los componentes del sistema.

Las mediciones de las fuerzas en las unidades de tiro y retenida se efectuaron desde la computadora de accionamiento de las unidades. La computadora informa en tiempo real la carga en toneladas y KN a la que cada unidad está trabajando, a su vez informa los mm de carrera de cada gato.

La computadora de accionamiento de las unidades de tiro y retenida fue programada de modo tal que se detenga automáticamente la maniobra ante cualquier incremento de más de un 5% en las variables previstas.

Las deformaciones de la pila principal y los desplazamientos horizontales de los marcos de tiro se midieron con flexímetros, verificando en todo momento que no superaran los máximos movimientos establecidos.

El ángulo de inclinación de la pila se midió con instrumental de topografía de precisión de forma de controlar los valores teóricos con los medidos en obra.

La inspección visual se realizó en forma continua a lo largo de todo el proceso y consistió en la revisión de los elementos estructurales en búsqueda de anomalías o daños.

En la Tabla 1 se presentan las lecturas de las cargas de las unidades de tiro y retenida y los valores teóricos determinados mediante el cálculo estructural, y en la Figura 9 se pueden observar las referencias de las variables hincadas en la Tabla 1.

Tabla 1. Valores de carga medidos durante la maniobra de rebatimiento

θ Grados	PROCESO	LRg m	Rg		Pret Te
			Teórica Te	Real Te	
0	1° ESCALÓN	-	40	41	0
0	2° ESCALÓN	-	80	79	0
0	100% CARGA	0	118	115	0
10		3,26	103	105	0
20		6,85	88	91	0
30		10,70	74	76	0
40		14,61	60	59	0
50		19,05	46	47	0
60		23,32	32	32	0
60	CONECTAR RETENIDA	23,32	56	54	30
70		27,40	50	49	40
80		30,92	37	37	40
85,76	ALINEACIÓN CoG	32,45	35	33	40
90		33,23	30	29	40

Referencias:

LRg = Longitud de cable recogido por las unidades de 200Te

Rg = Carga por cada unidad de 200Te.

Pret = Carga en la unidad de 70Te.

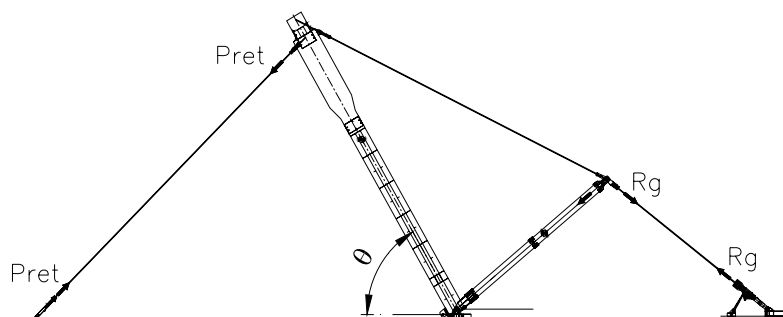


Figura 9. Referencias de variables de la Tabla 1

Conclusiones

A partir del diseño de la maniobra y la verificación de su respuesta en obra se puede concluir que el sistema de rebatimiento presenta importantes ventajas, tanto técnicas como económicas, respecto de otros sistemas como la utilización de grúas de gran porte y capacidad o la construcción de la pila mediante dovelas de menores dimensiones ensambladas en obra en posición definitiva.

El procedimiento de rebatimiento utilizado en la presente obra permitió, por un lado, ejecutar la estructura metálica completa en taller lo que aumenta la calidad de la construcción, y por otro lado realizar un montaje con mayor precisión en la maniobra, disminuyendo los riesgos del trabajo en altura.

Por otro lado, las unidades hidráulicas comandadas electrónicamente garantizan maniobras suaves y controladas, evitando acciones dinámicas adicionales a las estáticas.

Finalmente, mediante este sistema de montaje por rebatimiento mediante bisagras de giro fue posible, en primer lugar asegurar el correcto posicionamiento de la pieza metálica respecto a los orificios dejados ex profeso en el hormigón para realizar la unión mediante barras de anclaje, y en segundo lugar, el alto nivel de precisión y control de los movimientos permitió verticalizar la pila con una tolerancia del orden de 10 mm en 45 m de altura.