

***DEFENSAS RIBEREÑAS DE LOS RÍOS
HUAURA Y CAÑETE***

NOTA TÉCNICA

***NOTAS DE CÁLCULO INTERNOS
PARA EL DISEÑO DE MUROS
ANCLADOS EN FASE CONSTRUCTIVA***

Febrero 2024

Hoja de control de calidad

Documento	NOTA TÉCNICA – NOTAS DE CÁLCULO INTERNOS PARA EL DISEÑO DE MUROS ANCLADOS EN FASE CONSTRUCTIVA	
Proyecto	Proyectos 3 – Paquete 4	
Código	ANEXO-NOTA_TECNICA	
Autores:	Firma:	ECM/ADT
	Fecha:	12/02/2024
Verificado	Firma:	CSV
	Fecha:	13/02/2024
Destinatario	OHLA-ANIN	
Notas		

NOTAS DE CÁLCULO INTERNOS PARA EL DISEÑO DE MUROS ANCLADOS EN FASE CONSTRUCTIVA

1. INTRODUCCIÓN

El presente documento es una recopilación de cálculos internos realizados por TYPESA como parte del control a los calidad a los diseños durante el proceso de presentación del Expediente Técnico Paquete 4 de Huaura, esta revisión se realizó sobre una sección representativa de muros anclados utilizando una metodología más avanzada que la utilizada en el proceso de diseño, los mismos que se muestran en los documentos "ANEXO DE DISEÑO ESTRUCTURAL/GEOTÉCNICO" de código 400200-OHL001-501-XX-CA-GE-004001-R03, "MEMORIA DESCRIPTIVA - DISEÑO ESTRUCTURAL/GEOTÉCNICO" de código 400200-OHL001-501-XX-DM-GE-004001-R03 y "ANEXO DE DISEÑO DE OBRA CIVIL" de código 400200-OHL001-501-XX-CA-ST-004001-R05.

2. ANÁLISIS Y MODELAMIENTO DEL PROCESO CONSTRUCTIVO

Como parte del diseño de los muros anclados, se analizaron las secciones más desfavorables para cada tipo de procedimiento constructivo, considerando como desfavorables las secciones que tienen mayores alturas de contención y están ancladas en los estratos con los parámetros de resistencia más bajos de las unidades geotécnicas establecidas en el documento 400200-OHL001-501-XX-BD-GE-004001-R03.

A continuación, se muestran las obras diseñadas en el paquete 4 de Huaura que tienen como solución muros anclados:

Tabla 1 Obras diseñadas (Muros Anclados) - Paquete 4
(Elaboración propia, 2023)

Estructura	Inicio	Fin	Longitud (m)	Tipo de estructura	Máxima altura (m)
	(km)	(km)			
MU-PR-53A-D	0+100	0+685	585.00	MURO ANCLADO	6.70

Estructura	Inicio	Fin	Longitud (m)	Tipo de estructura	Máxima altura (m)
	(km)	(km)			
MU-PR-53B-D	0+000	0+315	314.71	MURO ANCLADO	7.00
MU-PR-54A-I	0+071	0+101	29.80	MURO ANCLADO	7.00
MU-PR-54B-I	0+013	0+080	67.00	MURO ANCLADO	8.75
	0+155	0+310	155.00	MURO ANCLADO	6.82
DI-PR-61BIS-D	0+000	0+111	111.00	MURO ANCLADO	5.44

Con el objeto de identificar los esfuerzos en la pantalla, se realizó un análisis de esfuerzos y deformaciones por el método de elementos finitos mediante un modelamiento en 2D. Esto permite simular la excavación, procesos de construcción e instalación de los anclajes.

A fin de realizar una verificación adicional usando una metodología más avanzada que la presentada en las memorias del diseño, el análisis empleó el modelo constitutivo Hardening Soil o de suelo con endurecimiento isotrópico el cual es un modelo avanzado capaz de simular el comportamiento de varios tipos de suelo tanto cohesivos como granulares. Considerado a este modelo como una aproximación de segundo orden y que constituye una variante elastoplástica del modelo hiperbólico que incorpora los parámetros resistentes.

A continuación, se muestran los parámetros de las unidades geotécnicas utilizadas en el análisis:

Tabla 2 Parámetros del modelo Hardening Soil
(Elaboración propia, 2023)

Símbolo	Descripción	Relleno	Sector Sayán						Unidades
			UG-4	UG-1	UG-2	UG-3	UG-5	Enrocado	
γ_{unsat}	Peso específico no saturado	21	18.5	20.5	21.5	23.0	22.0	25.7	kN/m ³
γ_{sat}	Peso específico saturado	22.4	20.4	22.1	22.8	23.6	22.0	25.7	kN/m ³
C'	Cohesión efectiva	5	5.8	2.4	4.3	5.2	12.0	0.0	kPa
ϕ'	Ángulo de fricción efectivo	38	34.0	38.0	40.0	40.0	38.0	40.0	°
ψ	Ángulo de dilatación $\psi (^{\circ}) = \phi' - 30^{\circ}$	8	4.0	8.0	10.0	10.0	8.0	10.0	°
E_{50}	Rigidez al 50% del esfuerzo de rotura	37500	17860	28800	67400	155800	178100	100000	kPa
E_{ed}	Rigidez tangente para carga primaria edométrica.	30000	14288	23040	53920	124640	142480	80000	kPa

Símbolo	Descripción	Relleno	Sector Sayán						Unidades
			UG-4	UG-1	UG-2	UG-3	UG-5	Enrocado	
E_{ur}	Rigidez en descarga – recarga	112500	53580	86400	202200	467400	534300	300000	kPa
M	Dependencia de la rigidez al estado de esfuerzos $m = 0.5$ (Suelos granulares) $m = 0.9$ (Suelos finos)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	--
ν'_{ur}	Relación de Poisson en descarga-recarga (0.25 a 0.30)	0.28	0.30	0.28	0.26	0.26	0.28	0.26	--
σ'_{ref}	Esfuerzo de referencia (100)	100	100	100	100	100	100	100	kPa
K_0	Coefficiente de presión lateral de tierras Suelos Granulares: $K_0 = 1 - \sin \phi'$ Suelos Finos: $K_0 = (1 - \sin \phi')$	0.3843	0.4408	0.3843	0.3572	0.3572	0.3843	0.3572	--
R_f	Relación de falla (0.9)	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	--

El diseño de muros anclados consideró una Inyección Repetitiva Selectiva (IRS) y una capacidad de adherencia última en el contacto suelo – cemento de 0.44 MPa y 0.46 MPa para las unidades UG-1 y UG-2 respectivamente. Además, se consideró un espaciamiento horizontal de 3.00 m y una inclinación de los anclajes con respecto a la horizontal de 15°. El diseño considera el efecto del nivel freático.

Los resultados del diseño de los muros anclados y los detalles se presentan en el ANEXO DE DISEÑO ESTRUCTURAL/GEOTÉCNICO, 400200-OHL001-501-XX-CA-GE-004001-R04, sección 1.3. MUROS ANCLADOS. A continuación, se muestran los resultados del diseño de muros anclados:

Tabla 3 Resultados de diseño – Muros anclados
(Elaboración propia, 2023)

Estructura	Prog. De Análisis	Anillo	Altura Final Const. (m)	Altura Etapa Const. (m)	N° Toron	Grado (MPa)	Diámetro Mínimo de Perf. (mm)	Carga de Trabajo		Longitud (m)	
								Calculada (kN)	Máxima (kN)	Libre	Bulbo
MU-PR-54A-I	0+090	1°	3.00	5.00	5 Φ 0.6"	1860	178	400.00	603.26	7.00	5.00

Estructura	Prog. De Análisis	Anillo	Altura Final Const. (m)	Altura Etapa Const. (m)	N° Toron	Grado (MPa)	Diámetro Mínimo de Perf. (mm)	Carga de Trabajo		Longitud (m)	
								Calculada (kN)	Máxima (kN)	Libre	Bulbo
MU-PR-54B-I	0+070	1°	3.00	5.00	3 Ø0.6"	1860	150	300.00	361.95	7.00	6.00
		2°	6.00	8.00	5 Ø0.6"	1860	178	500.00	603.26	5.00	6.00
	0+160	1°	3.00	5.00	4 Ø0.6"	1860	150	400.00	482.61	7.00	7.00
		2°	6.00	8.00	5 Ø0.6"	1860	178	600.00	603.26	6.00	7.00
MU-PR-53A-D	0+640	1°	3.00	5.00	3 Ø0.6"	1860	150	275.00	361.95	7.00	6.00
		2°	6.00	7.00	5 Ø0.6"	1860	178	450.00	603.26	5.00	6.00
	0+000	1°	3.00	5.00	3 Ø0.6"	1860	150	275.00	361.95	7.00	6.00
		2°	6.00	7.00	5 Ø0.6"	1860	178	450.00	603.26	5.00	6.00
MU-PR-61BIS-D	0+110.99	1°	3.00	5.50	4 Ø0.6"	1860	150	350.00	536.30	7.00	5.00

Así mismo, las estructuras MU-PR-53A-D, MU-PR-53B-D, MU-PR-54A-I, MU-PR-54B-I y DI-PR-61bis-D fueron analizados con un coeficiente sísmico de 0.202 g –taludes permanentes- y 0.12 g –taludes temporales-

El diseño considera el efecto del nivel freático según la estructura, tal y como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 3 Nivel Freático – Muros anclados
(Elaboración propia, 2023)

MARGEN	ESTRUCTURA	PROGRESIVA DE ANÁLISIS	NIVEL FREÁTICO (m.s.n.m.)
IZQUIERDA	MU-PR-54A-I	0+090	636.070
IZQUIERDA	MU-PR-54B-I	0+070	644.405
		0+160	645.595
DERECHA	MU-PR-53A-D	0+640	641.951
DERECHA	MU-PR-53B-D	0+000	642.297
DERECHA	MU-PR-61BIS-D	0+110.99	-

Las secciones analizadas para cada tipo de procedimiento constructivo se encuentran en las progresivas Km 0+660 del muro MU-PR-53A-I y Km 0+160 del muro MU-PR-54B-I, especificado en los planos con código N° 400200-OHL001-501-XX-DR-V-004976.

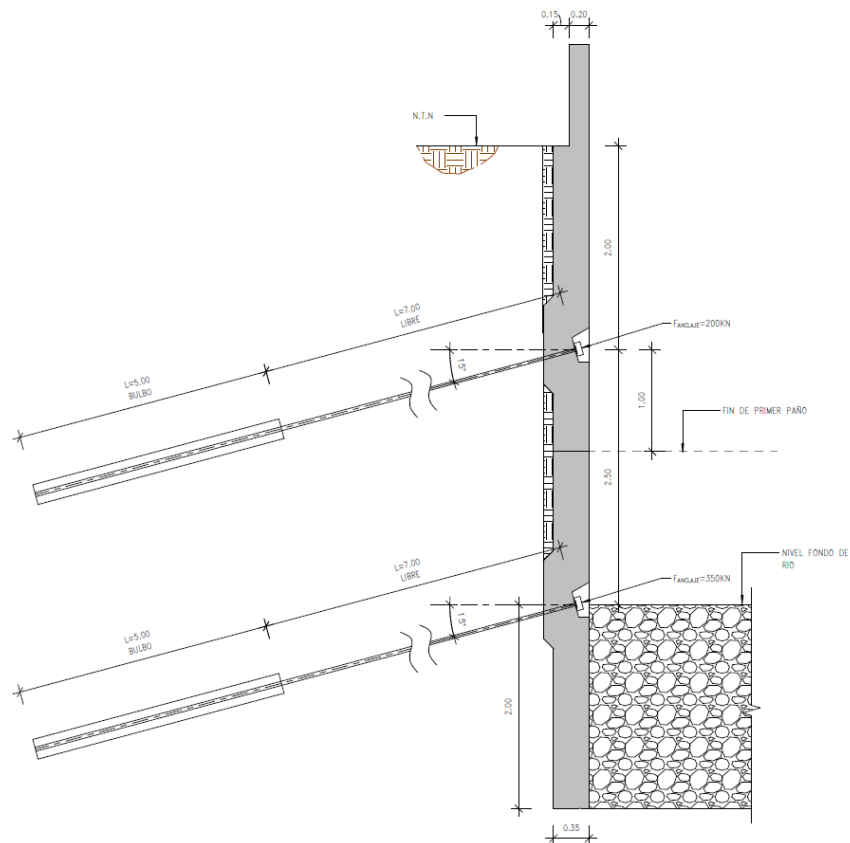
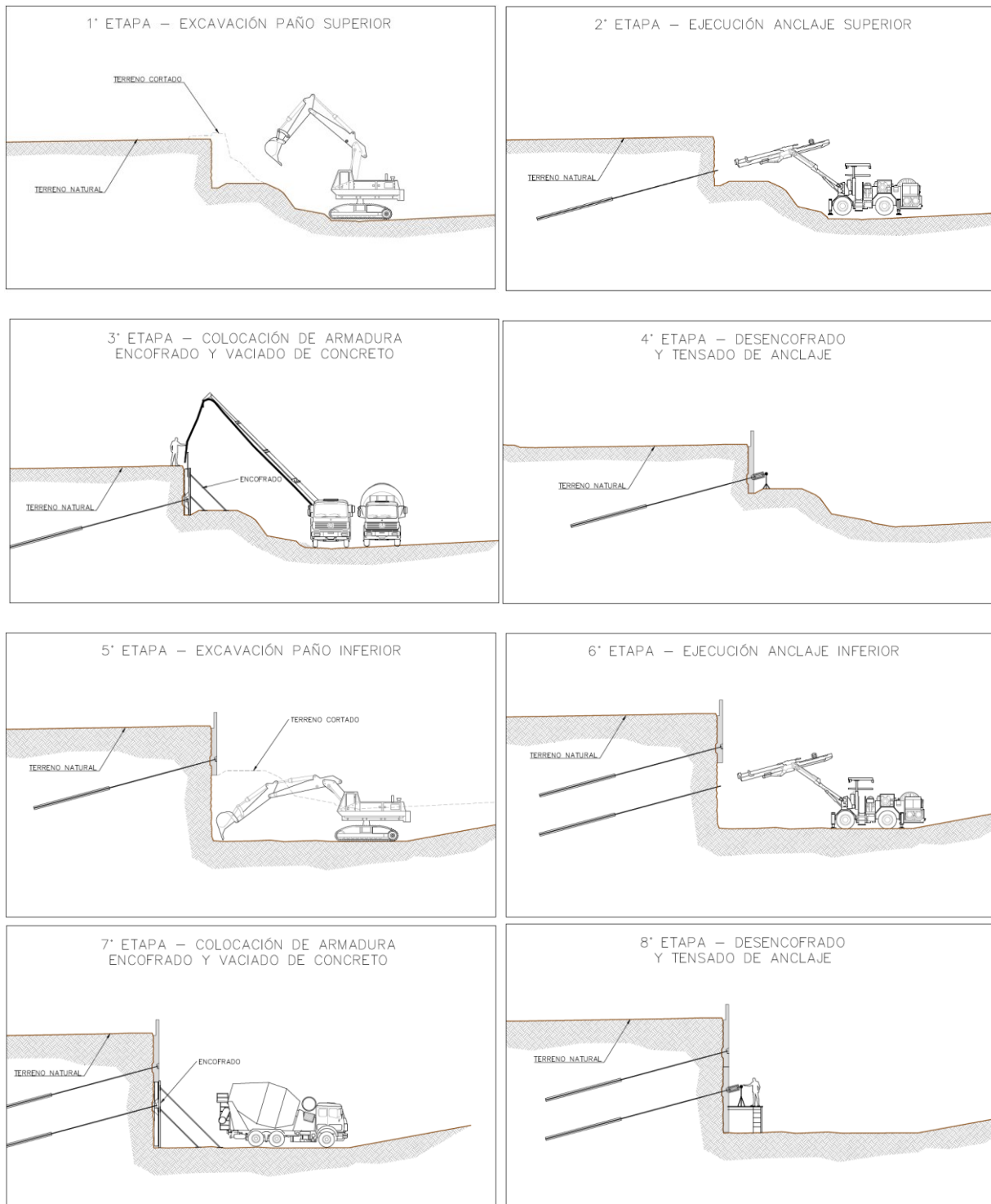


Figura 1 Sección tipo de muro pantalla MU-PR-53A-I, MU-PR-53B-I, MU-PR-54A-I y MU-PR-54B-I

2.1. Proceso constructivo

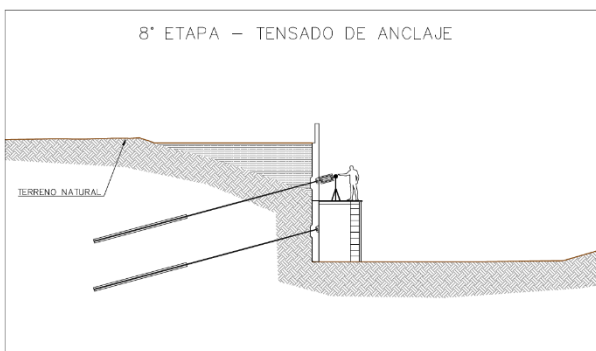
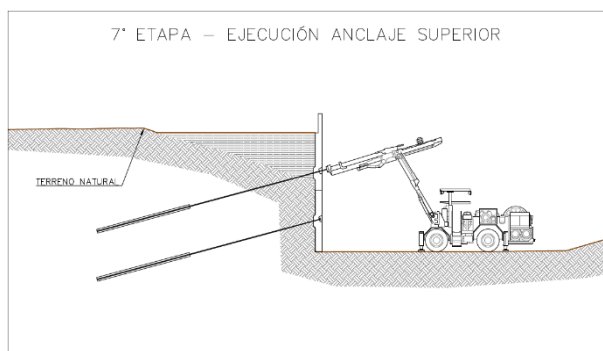
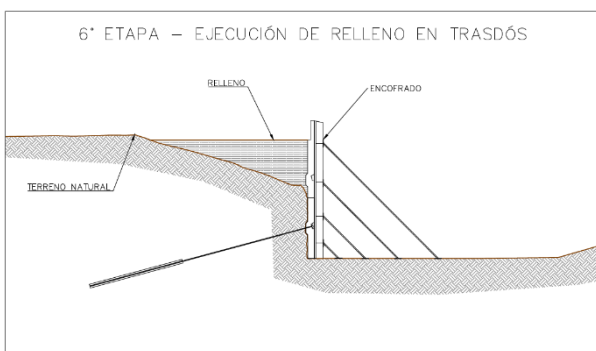
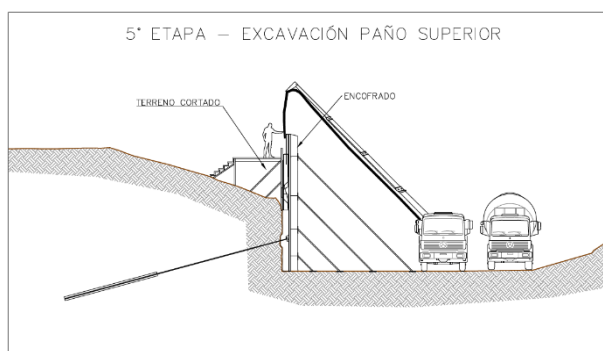
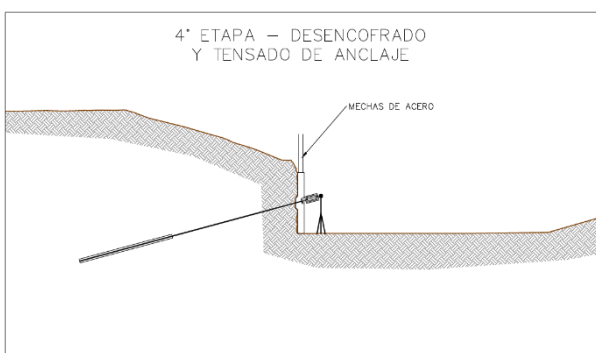
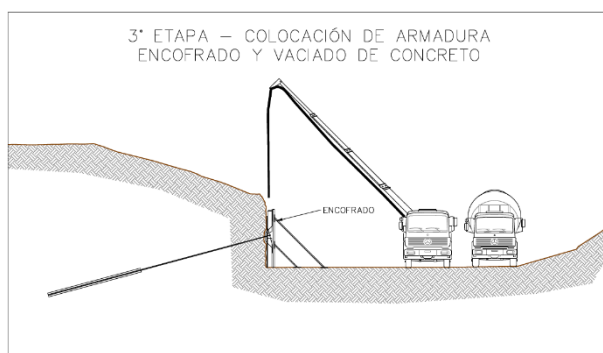
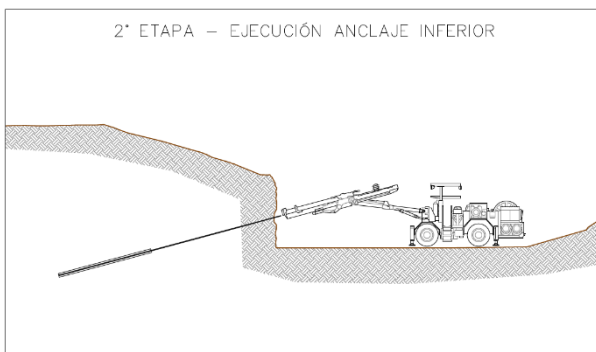
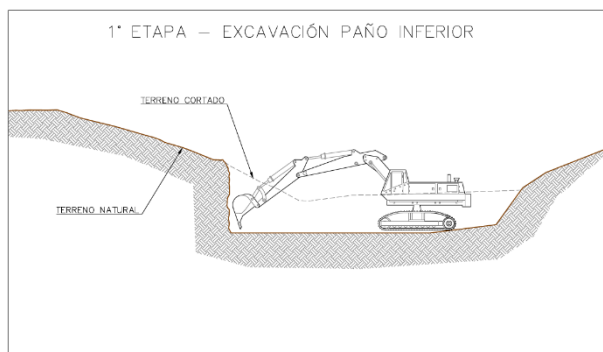
Proceso constructivo convencional (de arriba hacia abajo)

En los siguientes esquemas se presenta las etapas constructivas convencionales del muro, el cual se implementa para los muros MU-PR-54A-I y MU-PR-54B-I.



Proceso constructivo inverso (de abajo hacia arriba)

En los siguientes esquemas se presenta las etapas constructivas del muro en orden inverso, el cual se implementa para los muros MU-PR-53A-D (Prog. 0+652 a 0+670) y MU-PR-53B-D (Prog. 0+200 a 0+260).

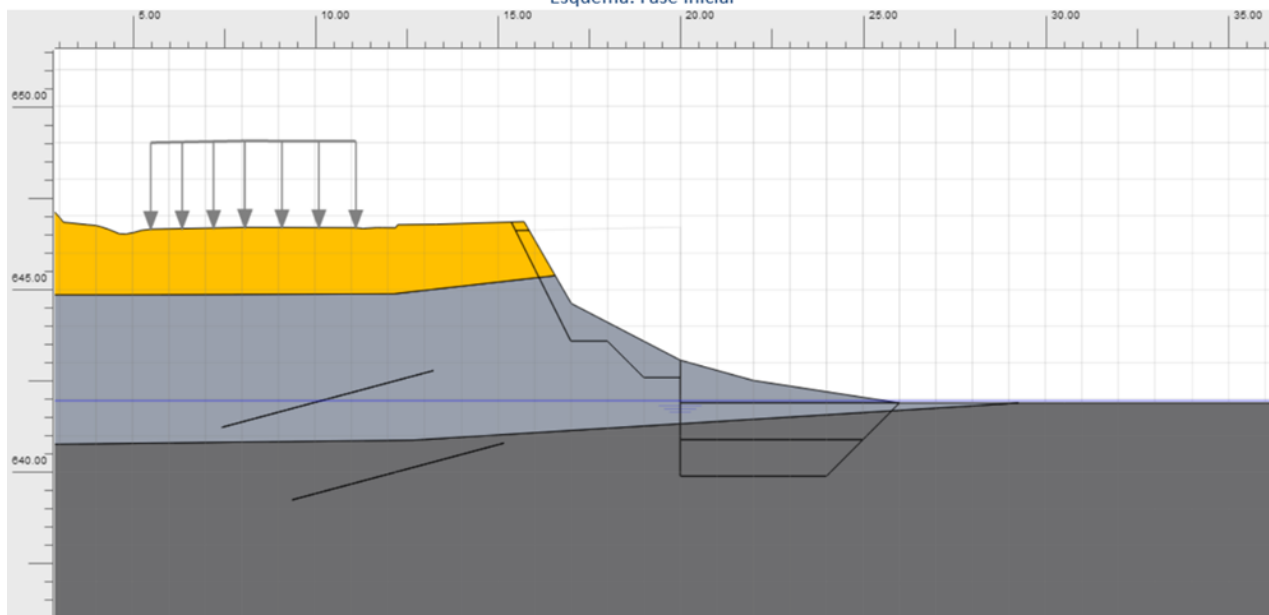


2.2. Modelamiento numérico del muro pantalla para verificación de Diseño con métodos más sofisticados

Se presenta el esquema del análisis realizado (procedimiento constructivo inverso) en la progresiva Km 0+660 del Muro MU-PR-53A-I.

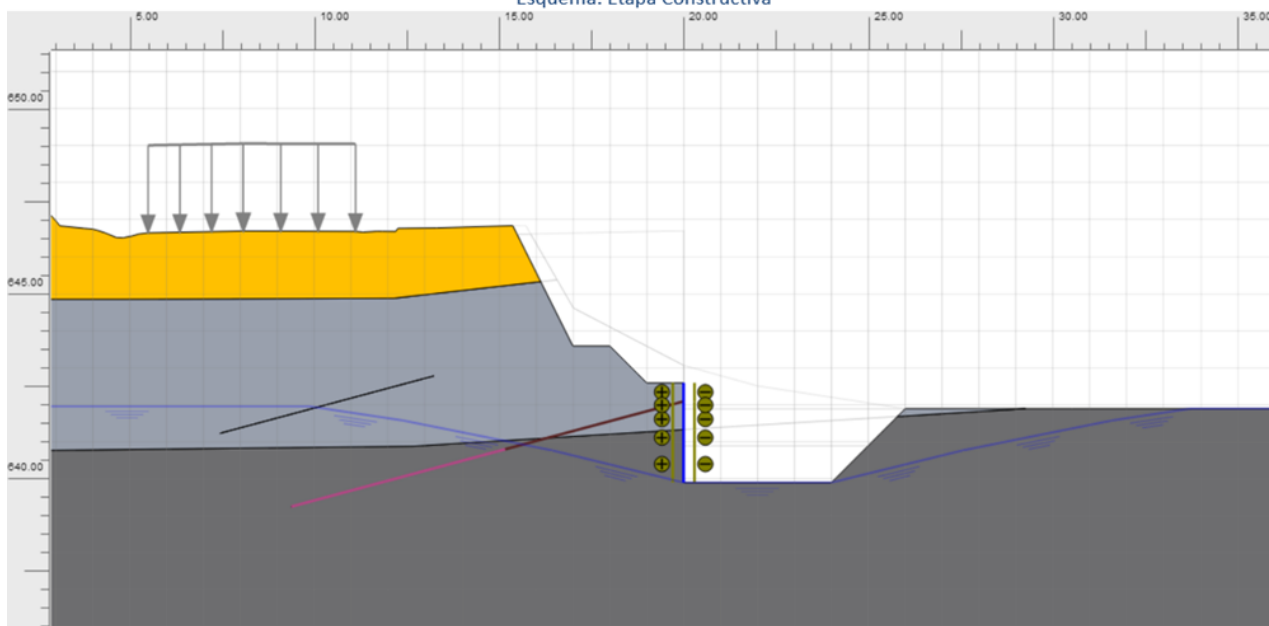
Muro: MU-PR-53A-I (Sección Analizada: Km 0+660)

Esquema: Fase Inicial



Muro: MU-PR-53A-I (Sección Analizada: Km 0+660)

Esquema: Etapa Constructiva



Muro: MU-PR-53A-I (Sección Analizada: Km 0+660)

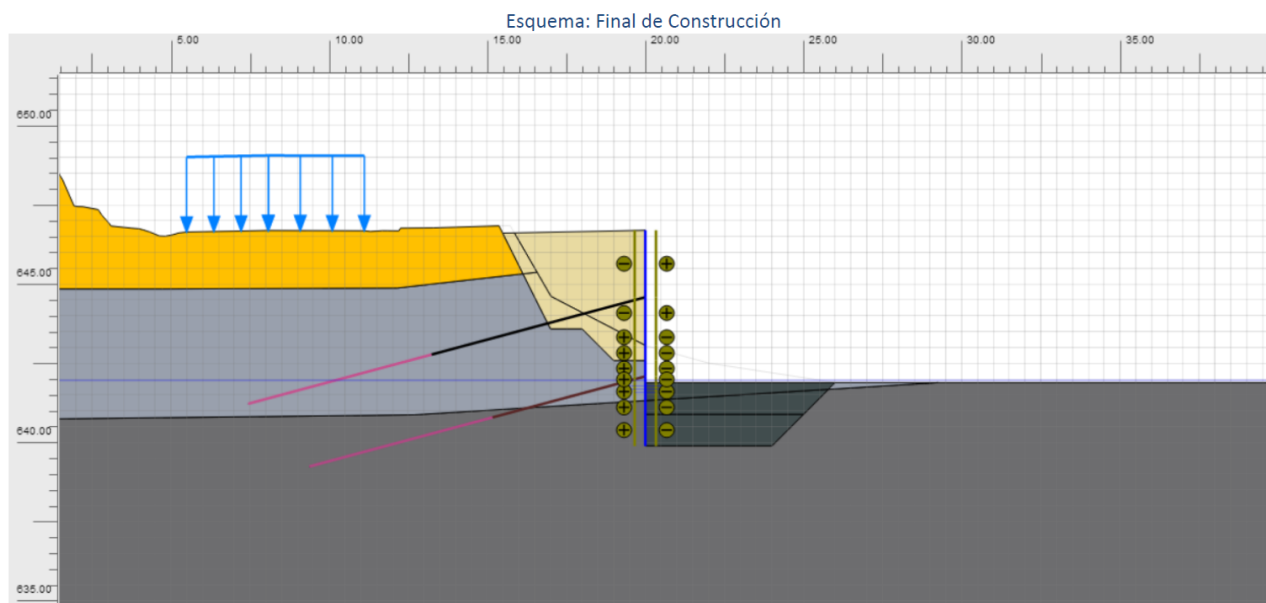
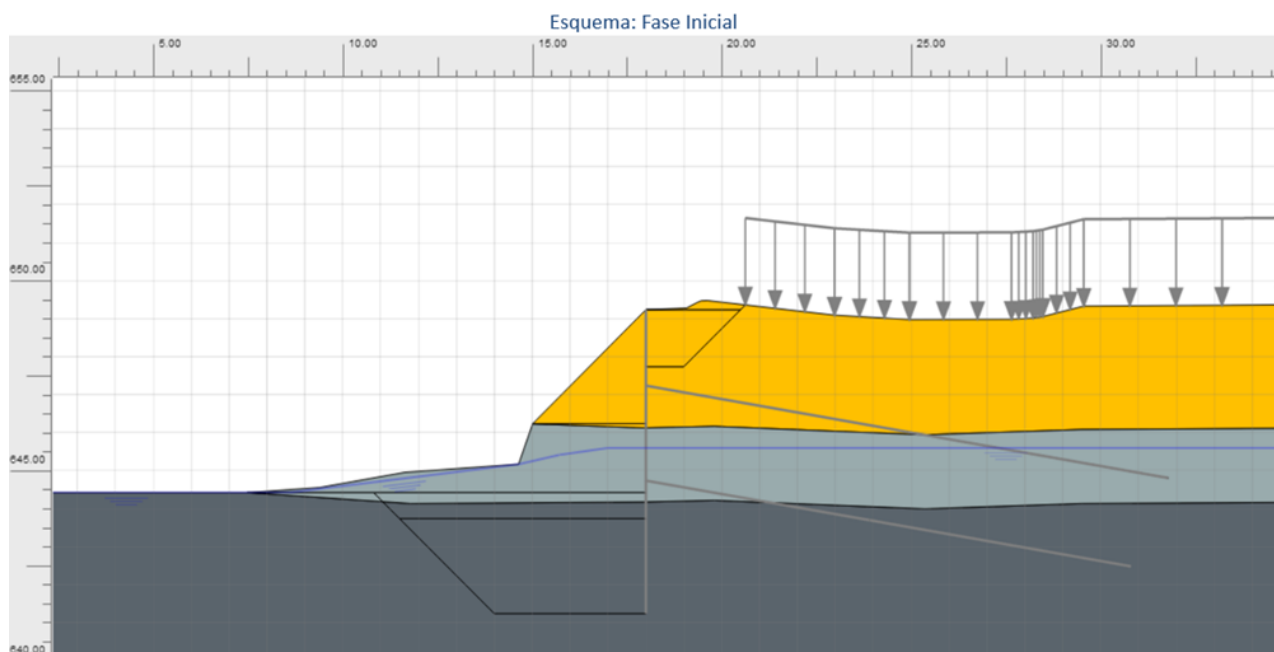


Figura 2 Modelamiento de muro anclado con procedimiento constructivo inverso. Muro MU-PR-53A-I

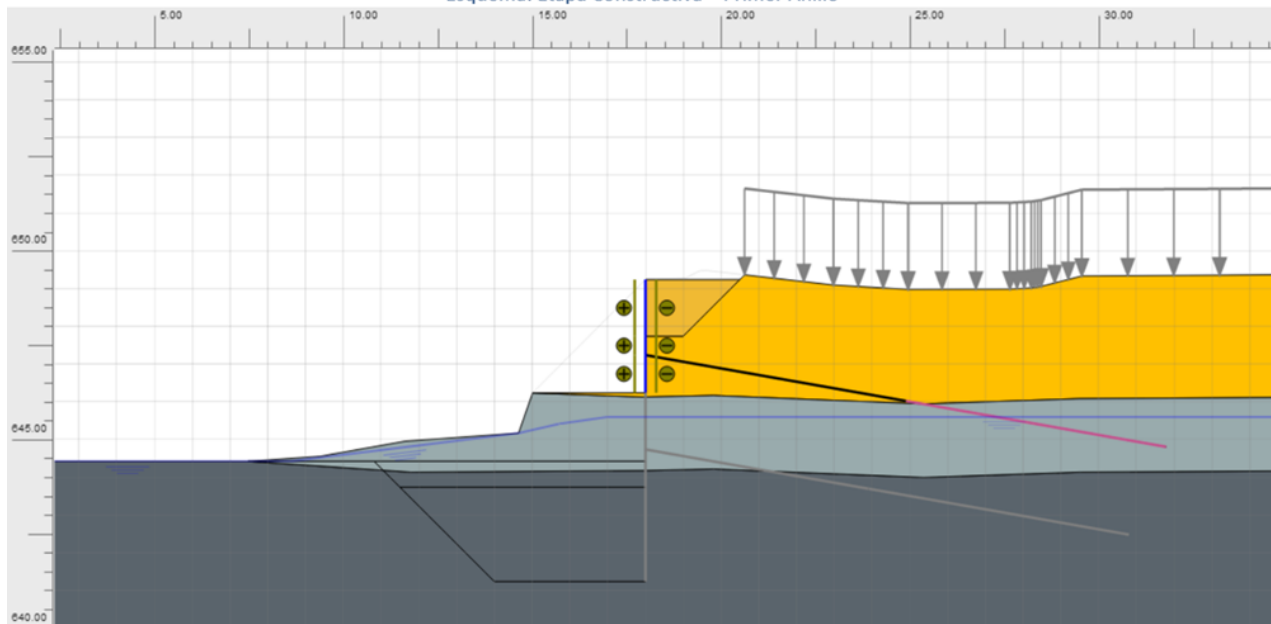
Se presenta el esquema del análisis realizado (procedimiento constructivo convencional) en la progresiva Km 0+160 del Muro MU-PR-54B-I.

Muro: MU-PR-54B-I (Sección Analizada: Km 0+160)



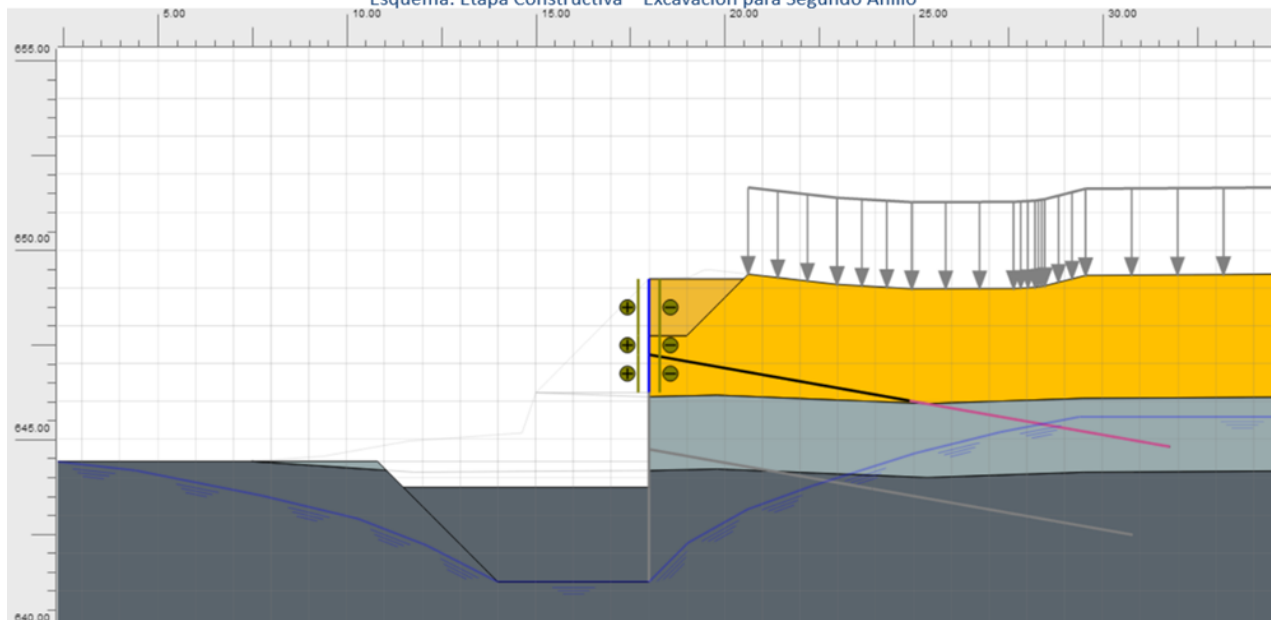
Muro: MU-PR-54B-I (Sección Analizada: Km 0+160)

Esquema: Etapa Constructiva – Primer Anillo



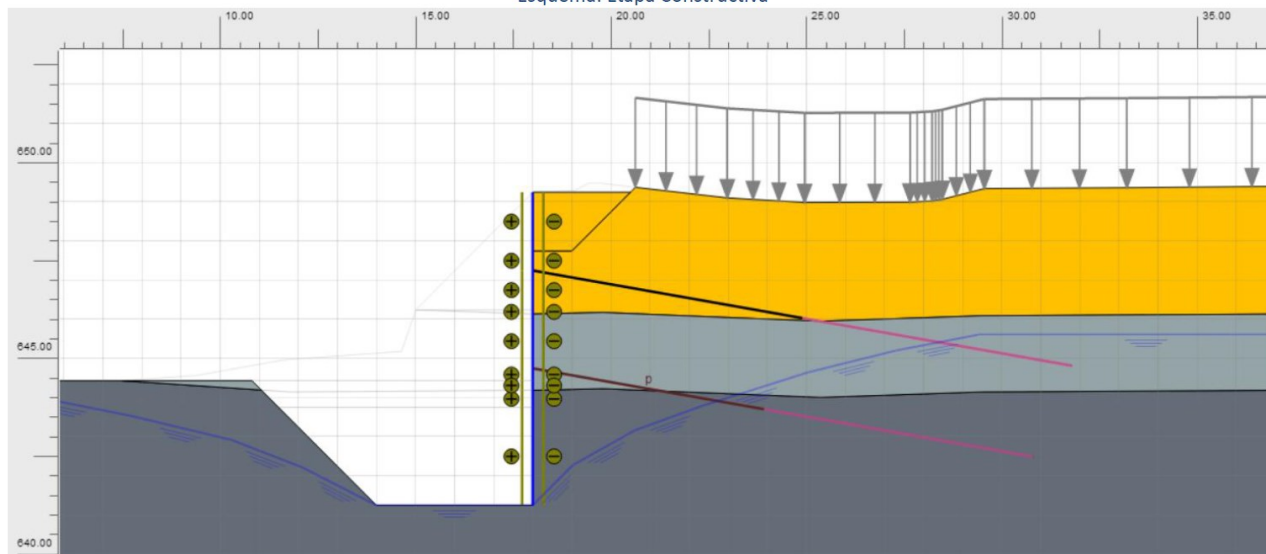
Muro: MU-PR-54B-I (Sección Analizada: Km 0+160)

Esquema: Etapa Constructiva – Excavación para Segundo Anillo



Muro: MU-PR-54B-I (Sección Analizada: Km 0+160)

Esquema: Etapa Constructiva



Muro: MU-PR-54B-I (Sección Analizada: Km 0+160)

Esquema: Final de Construcción

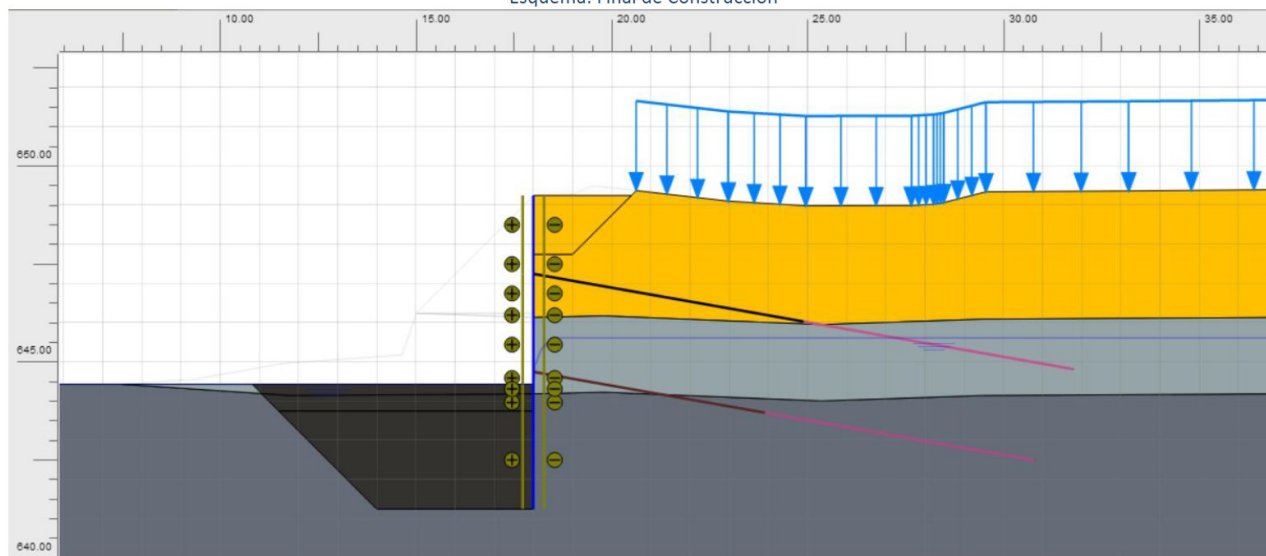


Figura 3 Modelamiento de muro anclado con procedimiento constructivo convencional. Muro MU-PR-54B-I

Como se puede apreciar, en todos los casos se incluyen los efectos del nivel freático en las diferentes etapas constructivas y la condición final de los muros.

2.3. Resultados para el procedimiento constructivo inverso (de abajo hacia arriba)

Se presentan los resultados del análisis en condición estática y pseudoestática para el procedimiento constructivo inverso. La línea de color naranja representa los resultados en la última fase constructiva (final de construcción), mientras que la línea verde representa la envolvente de los resultados de todas las fases analizadas (etapa constructiva y final de construcción).

- Resultados del Análisis en Condición Estática

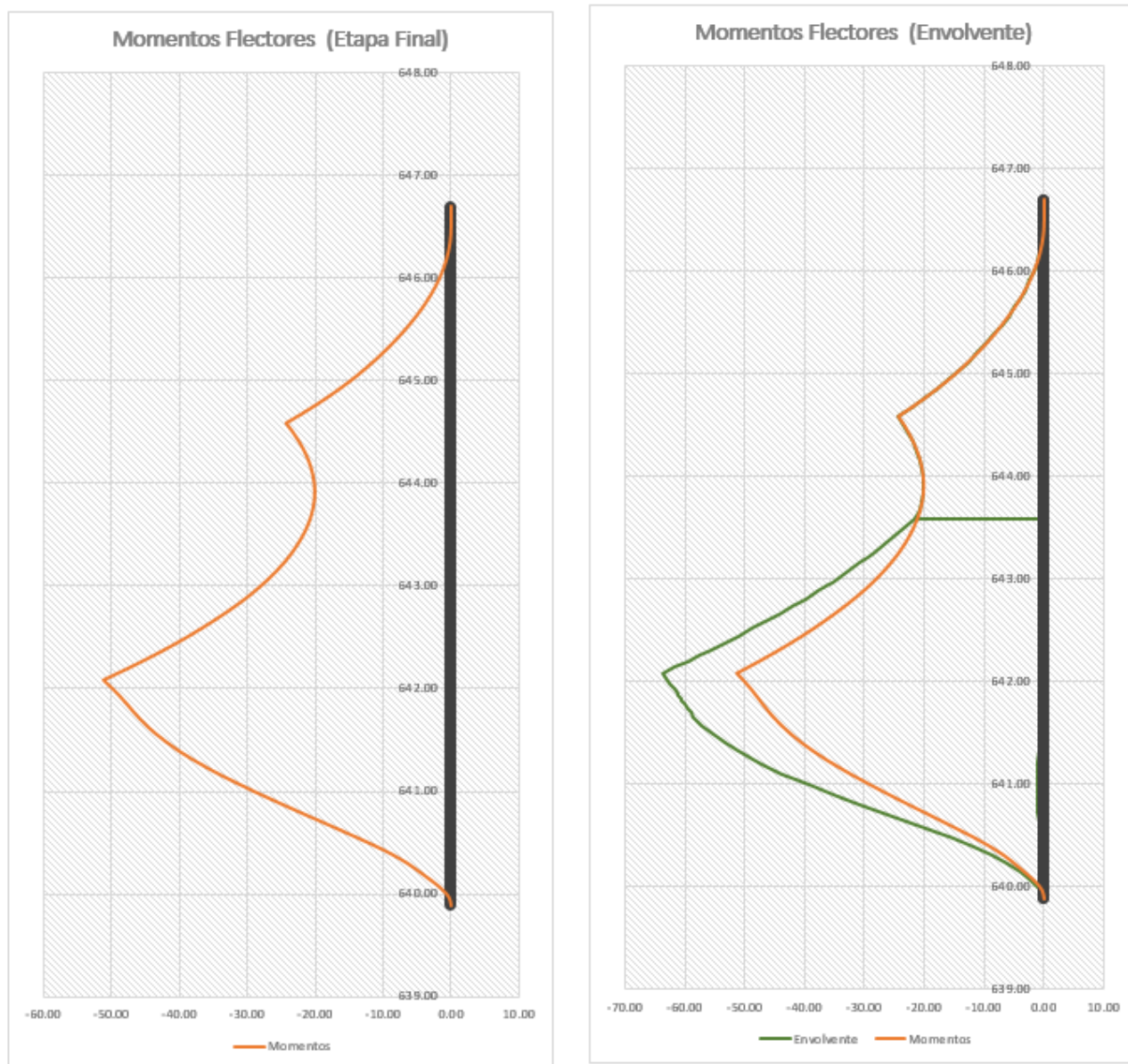


Figure 4 Envolvente de momentos para Condición Estática (kN-m/m)

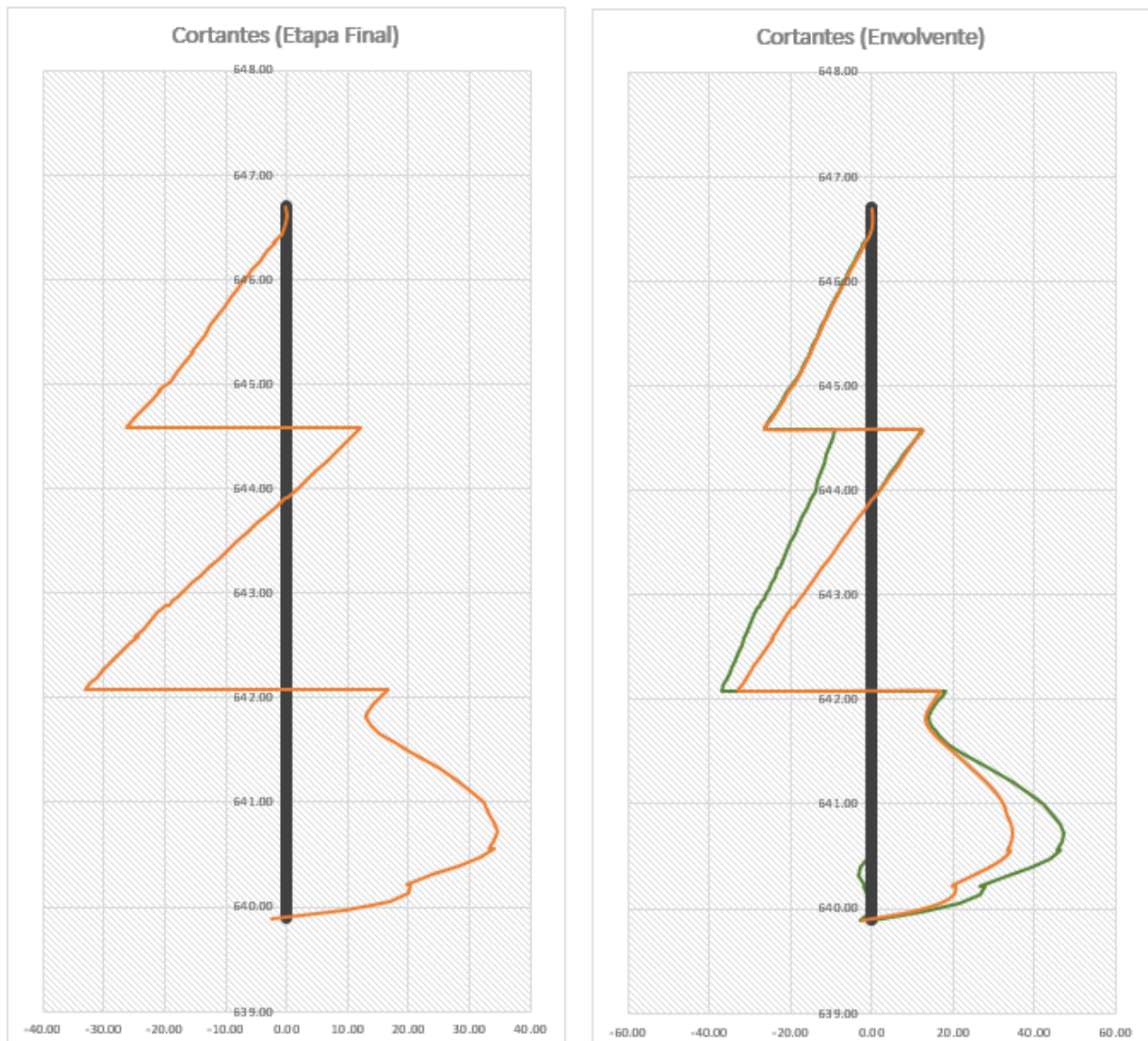


Figure 5 Envolvente de cortantes para Condición Estática (kN/m)

- Resultados del Análisis en Condición Pseudoestática

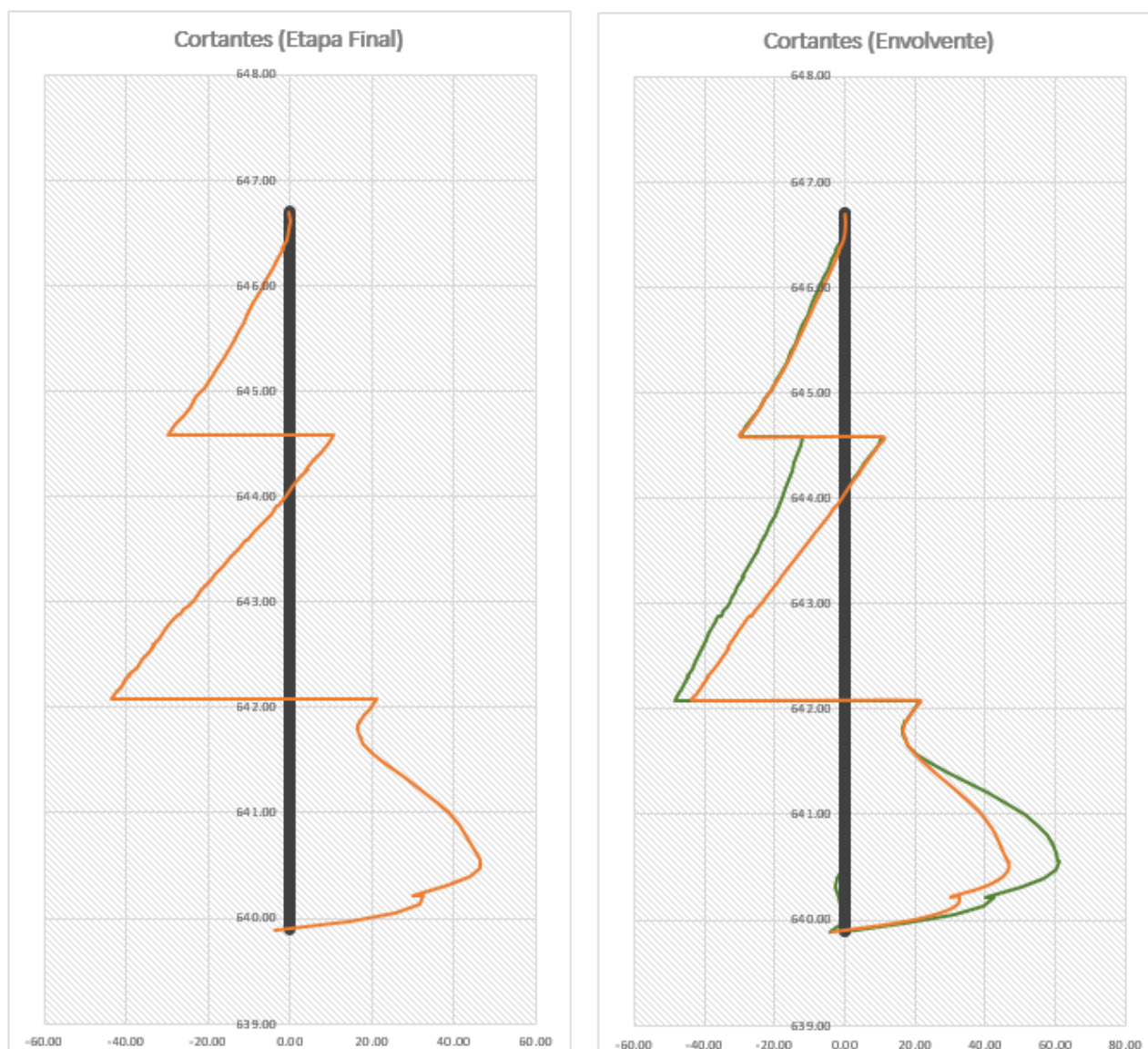


Figure 6 Envelope de cortantes en Condición Pseudoestática (kN/m)

Como podemos observar, existen fases constructivas que presentan esfuerzos mayores a los que se presentan al finalizar la construcción en algunas zonas de la pantalla. Esto se debe a que hay fases constructivas que están siendo estabilizadas con un solo anclaje, mientras que al finalizar la construcción ya se considera el efecto de ambos anclajes. Sin embargo, el funcionamiento del segundo anclaje también representa un incremento de esfuerzos en algunas zonas de la pantalla. Por esta razón, es importante considerar la envolvente de esfuerzos de todas las etapas temporales y permanentes para el diseño de la pantalla.

2.4. Resultados para el procedimiento constructivo convencional (de arriba hacia abajo)

Se presentan los resultados del análisis en condición estática y pseudoestática para el procedimiento constructivo convencional. La línea de color naranja representa los resultados en la última fase constructiva (final de construcción), mientras que la línea verde representa la envolvente de los resultados de todas las fases analizadas (etapa constructiva y final de construcción).

- Resultados del Análisis en Condición Estática

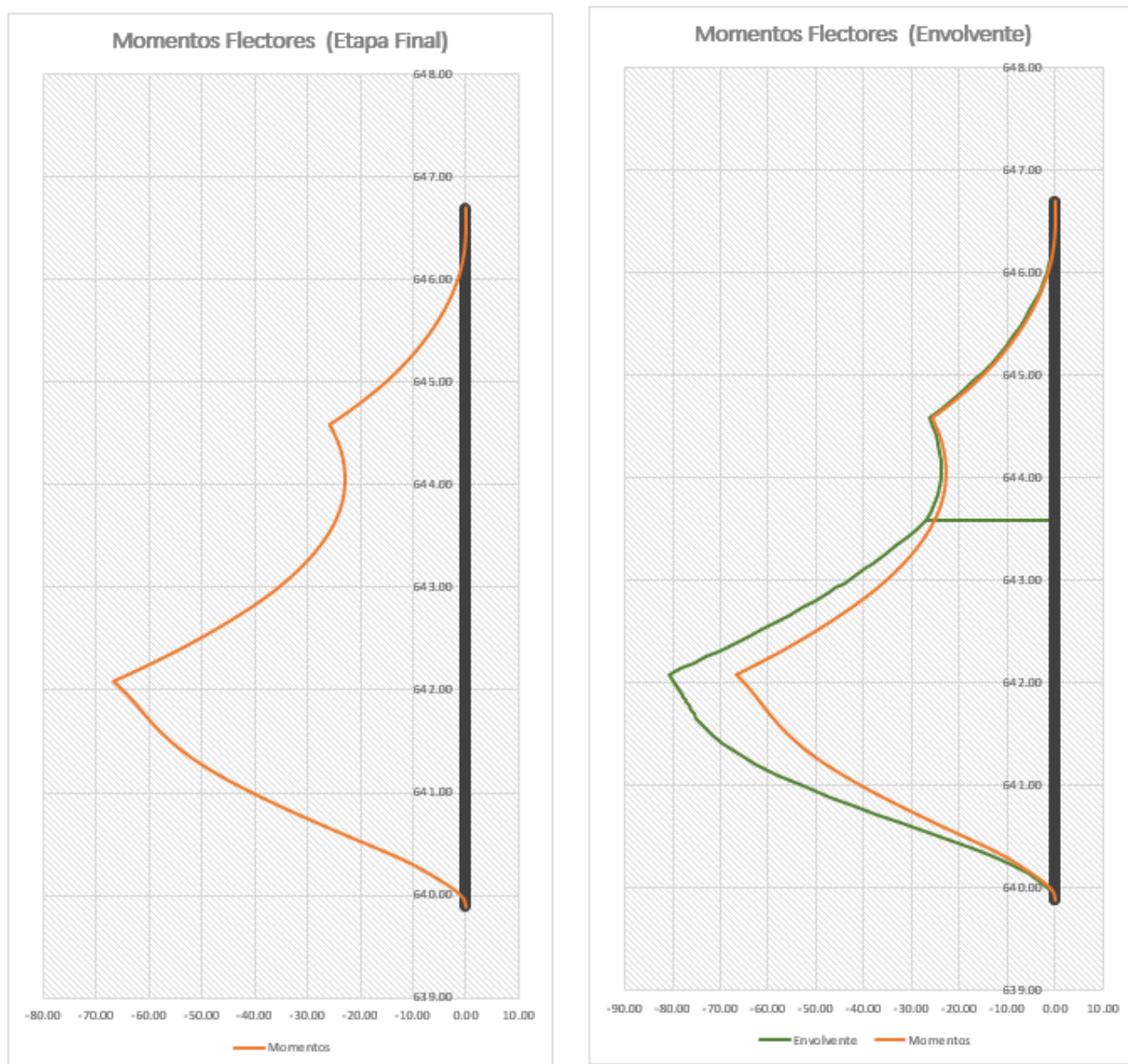


Figure 7 Envolvente de momentos en Condición Pseudoestática (kN-m/m)

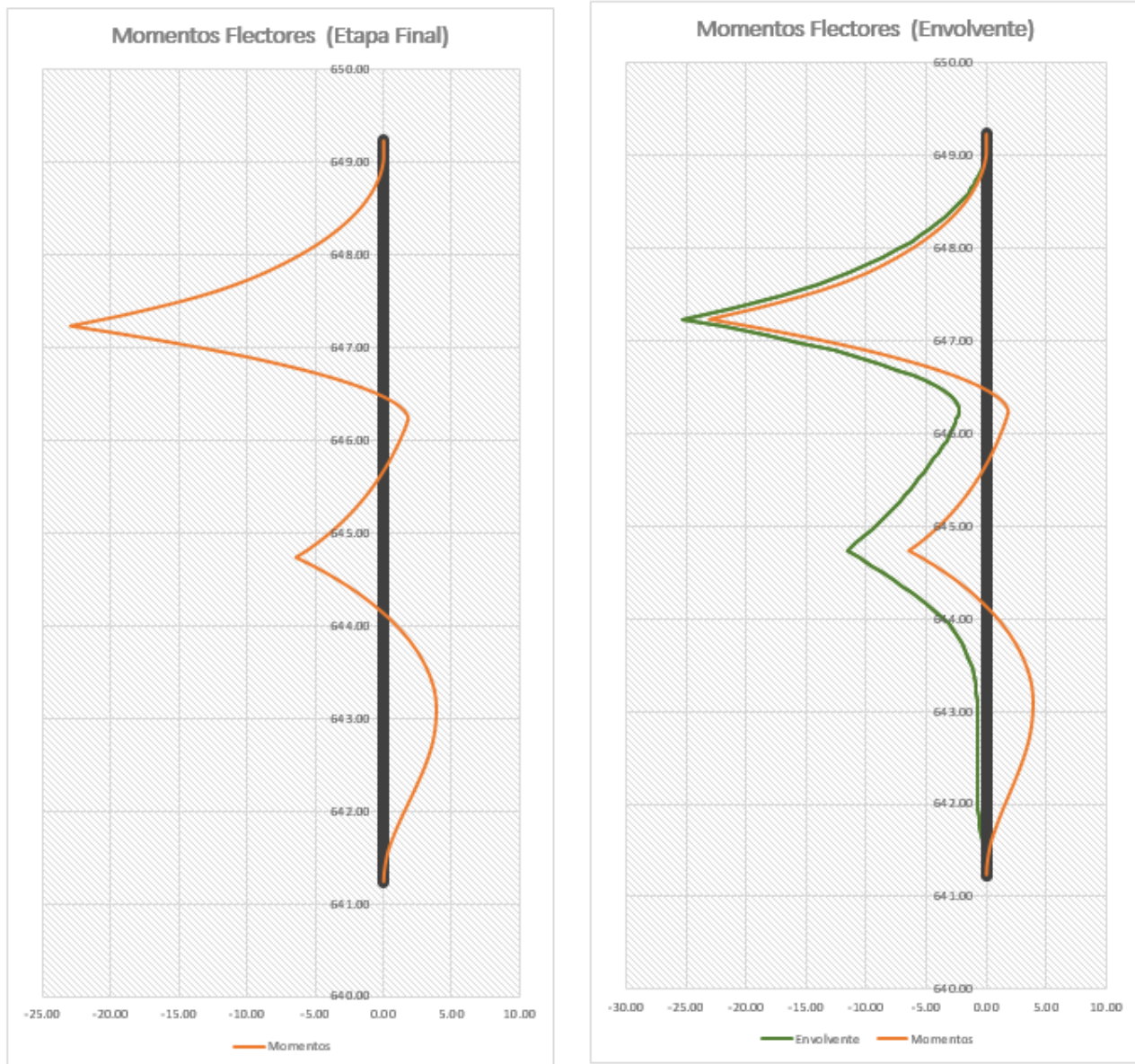


Figure 8 Envoltente de momentos para Condición Estática (kN-m/m)

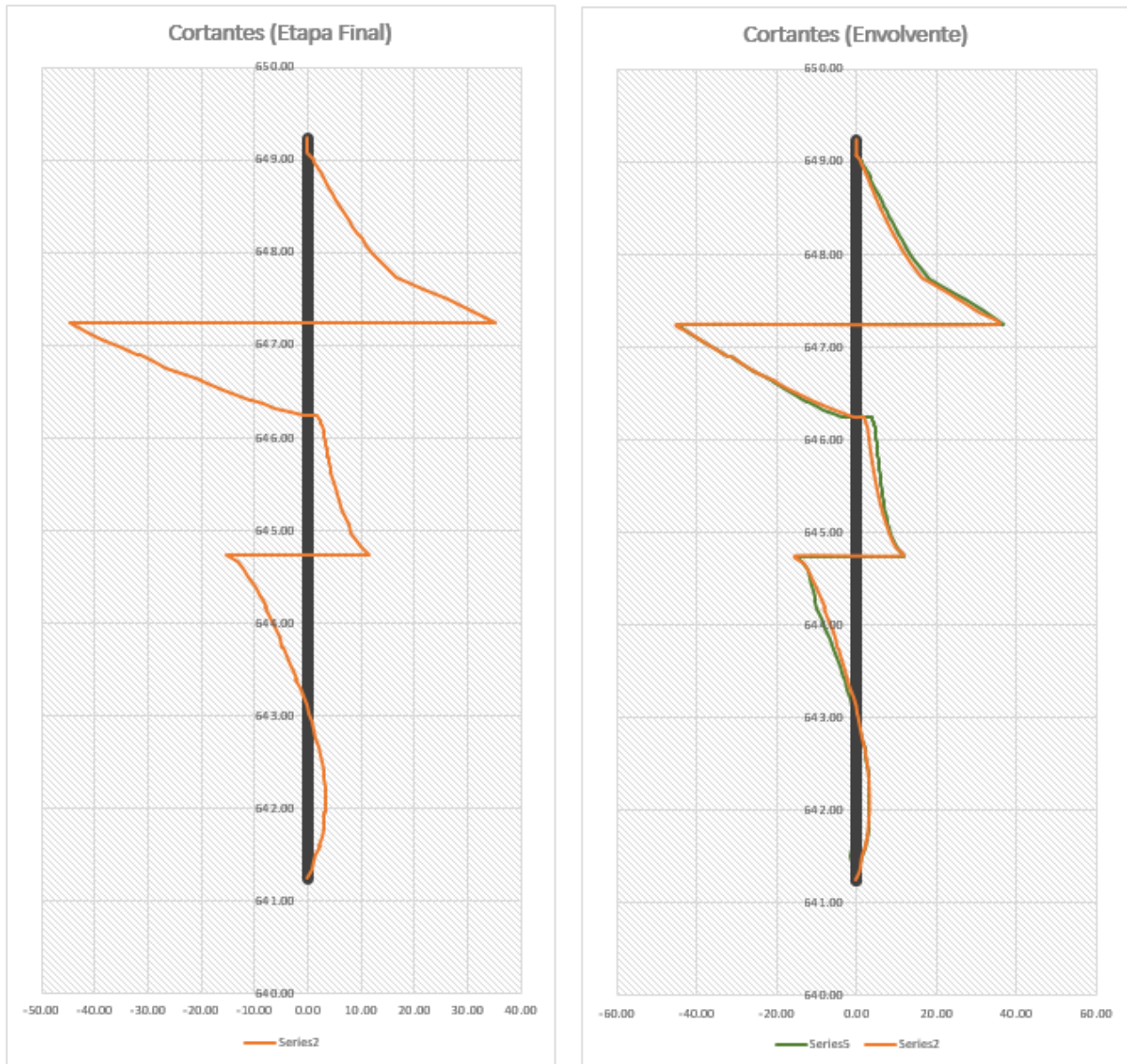


Figure 9 Envolvente de cortantes para Condición Estática (kN/m)

- Resultados del Análisis en Condición Pseudoestática

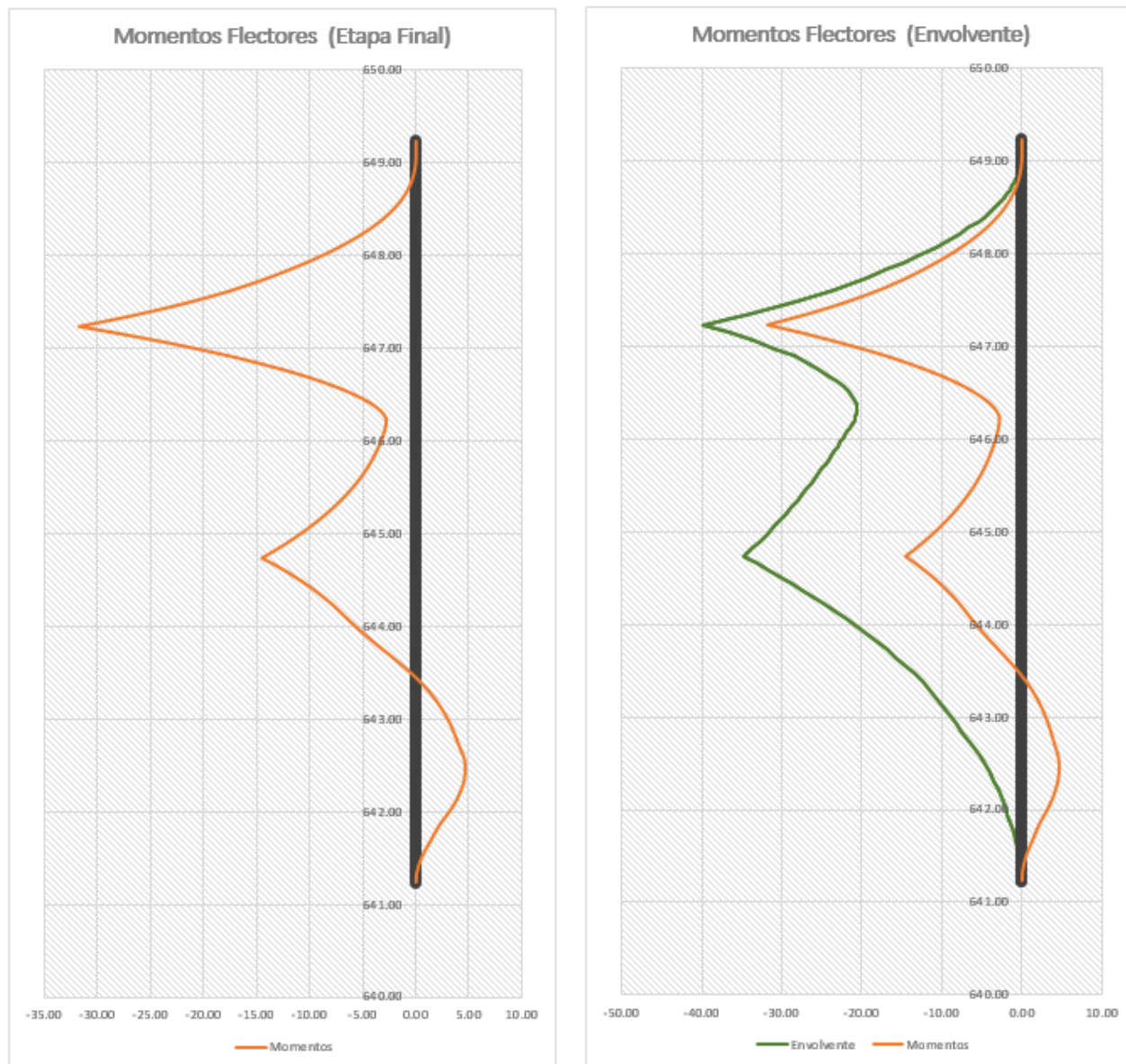


Figure 10 Envolvente de momentos en Condición Pseudoestática (kN-m/m)

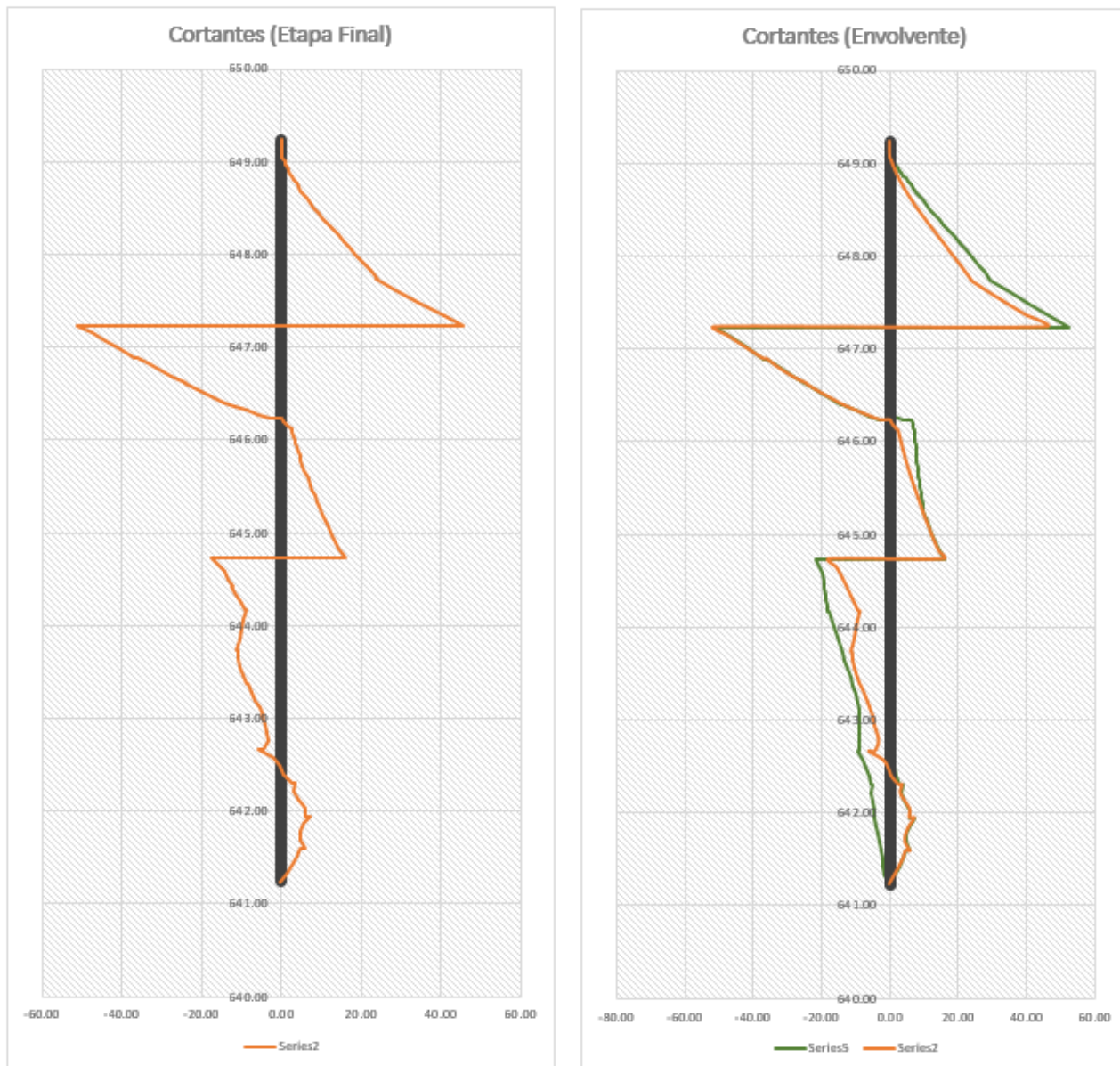


Figure 11 Envolvente de cortantes en Condición Pseudoestática (kN/m)

Como podemos observar, existen fases constructivas que presentan esfuerzos mayores a los que se presentan al finalizar la construcción en algunas zonas de la pantalla. Esto se debe a que hay fases constructivas que están siendo estabilizadas con un solo anclaje, mientras que al finalizar la construcción ya se considera el efecto de ambos anclajes. Sin embargo, el funcionamiento del segundo anclaje también representa un incremento de esfuerzos en algunas zonas de la pantalla. Por esta razón, es importante considerar la envolvente de esfuerzos de todas las etapas temporales y permanentes para el diseño de la pantalla.

Estado Límite de Resistencia I

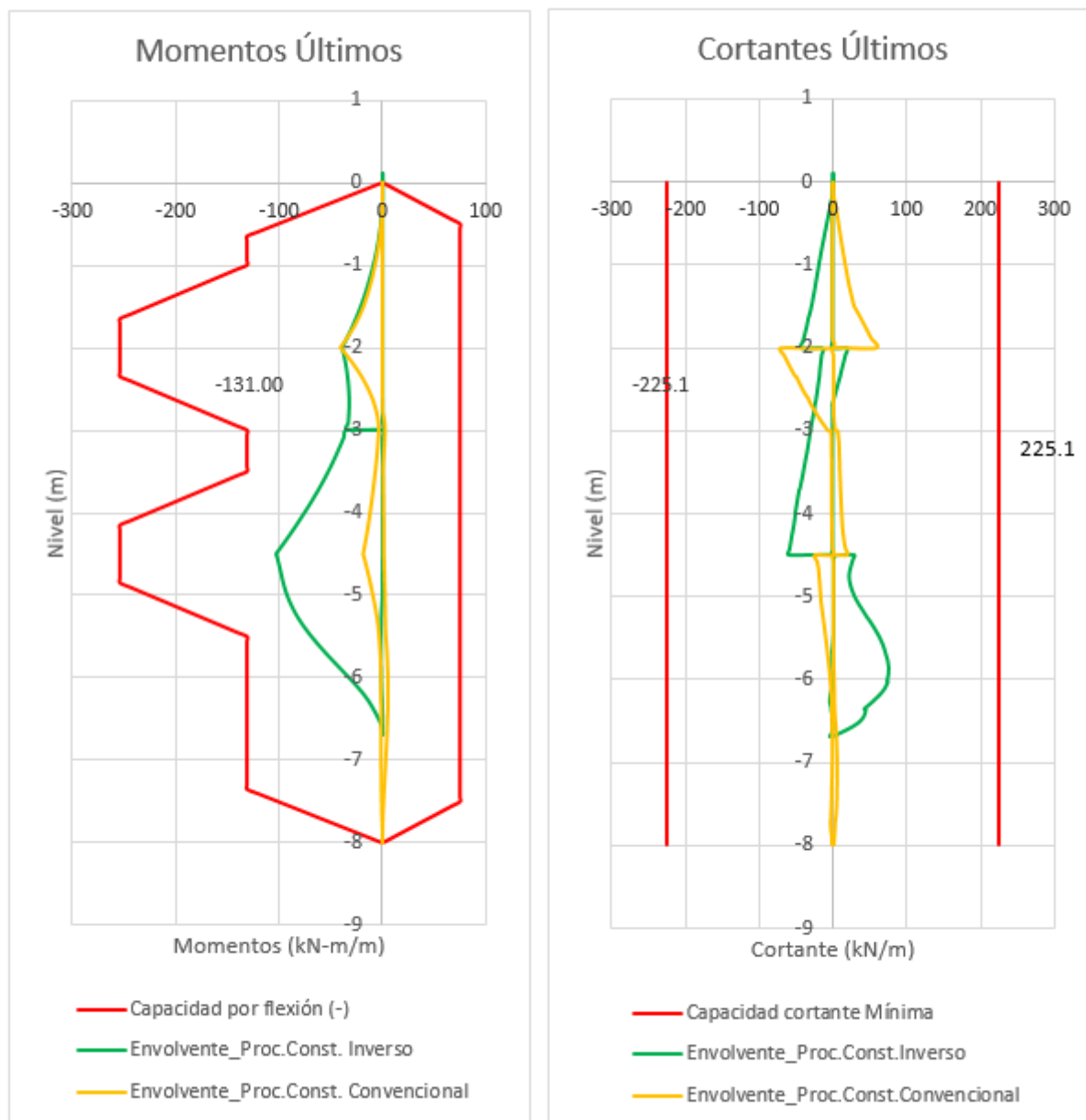


Figura 13 Envolvente de Demanda y capacidad por flexión y corte para Resistencia

Estado Límite de Evento Extremo - I

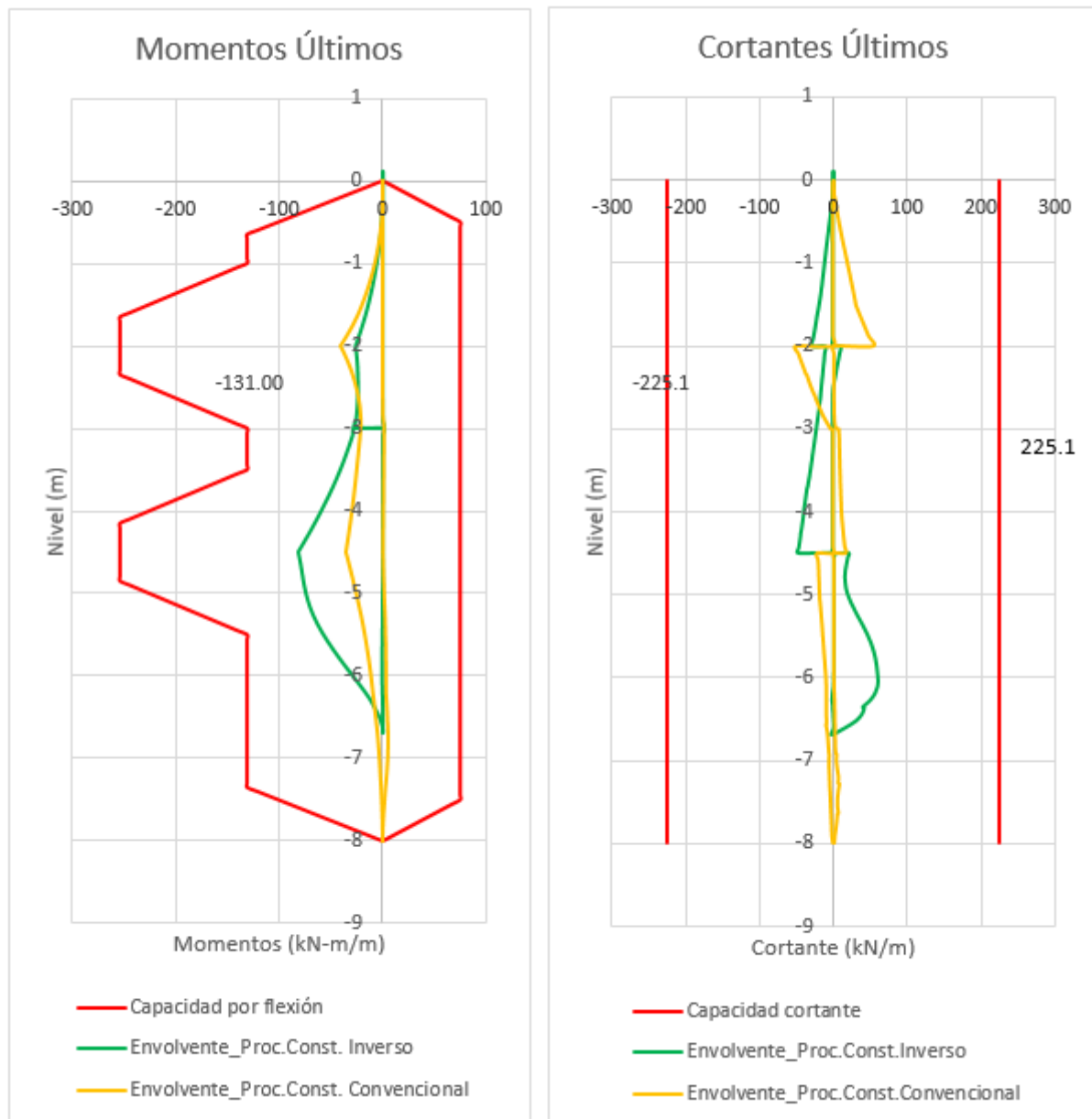


Figura 14 Envolvente de Demanda y capacidad por flexión y corte para Evento Extremo I

4. EVALUACIÓN DE ASPECTOS CONSTRUCTIVOS DE LA EJECUCIÓN DE ANCLAJES BAJO NIVEL FREÁTICO

Uno de los criterios más importantes en el diseño y ejecución de muros anclados es que se debe llegar al estrato competente y anclarse con una longitud mínima de bulbo (4.50 m mínimo según la Norma E.050 y 5.00 m según nuestro diseño) o una longitud libre (4.50 m mínimo según la Norma E.050 y 5.00 m según nuestro diseño) para salvar la cuña de rotura. Sin embargo, en los anclajes que se ejecutan bajo el nivel freático hay otro condicionante: el anclaje debe instalarse con una inclinación mínima tal que la presión hidrostática sea inferior presión de lechada.

Por otro lado, se debe tener especial cuidado a las variaciones producidas en el nivel freático durante la ejecución de la obra, sea por cambios estacionales o actuaciones humanas que puedan variar la presión hidrostática con el tiempo. Por esta razón, es importante conocer la altura entre el nivel freático y la cota de perforación.

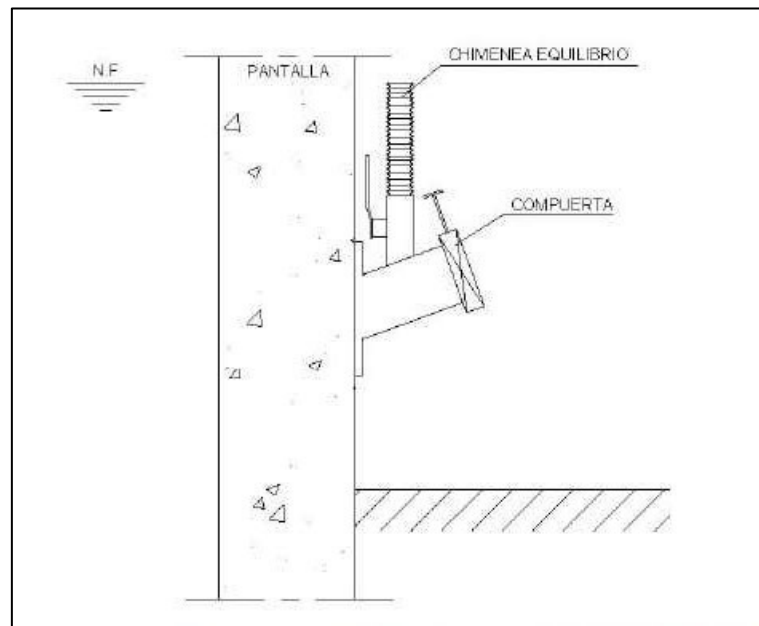
Según el terreno a perforar, se dan las siguientes recomendaciones:

- Si el terreno a perforar presenta elevado porcentaje de material fino, se realizará un revestimiento de la perforación e inyección previa de la perforación ya revestida, perforación con tapones en la cabeza de barrido o perforación con puntaza perdida.
- Debido a la problemática existente durante la ejecución de anclajes bajo el nivel freático, tanto en la ejecución de la perforación como en su posterior instalación y sellado, se debe prestar especial atención a llevar por delante del varillaje de perforación el revestimiento a fin de afectar lo menos posible el terreno contiguo así como observar el volumen de agua que sale entre el revestimiento y la pantalla pues se puede producir un descenso en el nivel freático lo cual provocaría automáticamente asientos.
- En terrenos con gran cantidad de finos y riesgos de sifonamiento (fangos, limos y arenas) se debe tener especial cuidado con el volumen de material arrastrado, incluso en suspensión con el agua.
- Los problemas de la perforación se refieren sobre todo al sifonamiento producido por dentro del revestimiento lo que se soluciona con el empleo de puntazas pérdidas que pueden ir provistas de válvulas antiretorno en caso de que exista mucha sobrepresión. Por otro lado, hay que tener especial cuidado con el volumen de finos que se va disuelto en el agua en suspensión durante todo el proceso de perforación, instalación del anclaje, retirada del revestimiento y sellado.

4.1. Técnicas de perforación e instalación de anclajes bajo nivel freático

Durante la ejecución de la perforación en este tipo de terrenos podemos aplicar distintas técnicas que enumeramos según el nivel de complejidad.

- La cámara de aislamiento con chimenea de equilibrio es de utilidad para garantizar un arrastre totalmente nulo cuando en la perforación se produzcan sobre presiones en el trasdós de la pantalla. El sistema se puede observar en la siguiente figura:



- La cámara de aislamiento elimina la colocación de la chimenea de equilibrio y coloca una salida de una pulgada de diámetro para liberar esas sobre presiones. Una de las posibles desventajas de este sistema es que por esa salida se puede producir un escape de finos con el agua. Sin embargo, esto sucede de forma más controlada.



- Durante la ejecución de la técnica con cámara de aislamiento sencilla se reduce aún más el elemento de aislamiento eliminando la necesidad de preparar otro elemento de aislamiento distinto para cada inclinación de anclaje colocando directamente el anillo de inyección en el interior de la pantalla. Con este tipo de junta tenemos un primer anillo para revestimiento y perforación con salida para agua y un segundo anillo para colocar entre el primer anillo y el anclaje.



Una vez realizada la perforación se realiza la inyección e instalación del anclaje, para después retirar el revestimiento. Si se considera necesario, se procede a inyectar por la campana con presión en la zona del bulbo cada vez que se retira una tubería. Finalmente, se procede al sellado del anclaje.

4.2. Procedimiento de sellado de anclajes bajo nivel freático

Una vez terminada la instalación del anclaje se realizará el sellado. Este procedimiento se puede diferenciar en las siguientes fases:

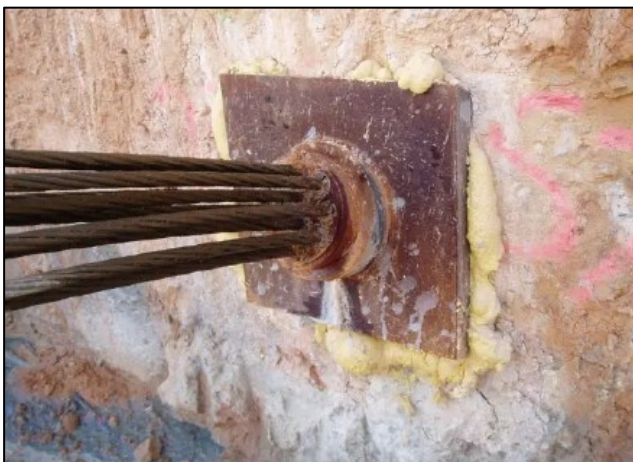
1ª Fase: Sellado finalizada la perforación:

- En primer lugar, se realizará un tapón con geotextil impregnado en resina aquoreactiva a la mitad de la pantalla, esto se realizará para cerrar las posibles vías de agua una vez terminada la perforación. Este tapón se colocará entre los cables del anclaje mediante la tubería de perforación y a unos 50 cm desde la cara exterior de la pantalla. Luego, se realizará un tratamiento hacia el interior del anclaje desde este tapón con la finalidad de que los cables del anclaje (entre el tapón y la placa) queden libres de tratamiento para facilitar un futuro proceso de impermeabilización.
- Los anclajes se fabricarán con dos tubos manguitos de inyección de 2.50 m de longitud, de los cuales uno de ellos se dejará accesible una vez realizado el tesado por la placa portacúñas. Por uno de estos tubos manguitos, previo al tesado, se inyectará lechada de cemento o resina aquoreactiva. Esto dependerá del caudal de agua, así como del comportamiento de la lechada. Realizada esta inyección se dará por terminada esta primera fase. La resina aquoreactiva utilizada es una mezcla bicomponente y en función de la cantidad de agua que salga se añadirá más reactivo.
- También se puede proceder al sellado colocando juntas estancas dependiendo el n° de cables del anclaje, tal y como se muestra en la siguiente figura:



2ª Fase: Sellado una vez realizado el tesado del anclaje

- Una vez realizado el tesado es posible que el tapón rompa, fisure y se produzcan nuevas vías de agua, la impermeabilización final la conseguiremos inyectando resinas aquoreactiva a través del tubo manguito que se dejó accesible desde el exterior de la placa del anclaje.
- Si fuera necesario se procederá a cubrir el contacto entre la placa de reparto y el concreto de pantalla con un mortero de fraguado rápido tipo SIKA o similar.
- En caso de salida incontrolada de agua se realizará un pequeño agujero en el tubo de apoyo de la placa porta cuñas para poder introducir la resina.



3ª Fase: Sellado una vez realizado el tesado del anclaje

- Una vez los anclajes tengan la fuerza de tesado especificada, se fijarán con cuñas permanentes y se cortarán los cables unos 10 cm hacia el exterior del dispositivo de anclaje y seguir a la siguiente fase de sellado.
- Se realizará la aplicación de concreto de baja retracción con fibras de polietileno de 12 mm realizándose incluso el fratasado de este material.

5. CONCLUSIONES

- Los diseños de muros anclados presentados en el Expediente Técnico del Paquete 4 de Huaura contemplan dos métodos constructivos, los resultados de los análisis realizados fueron expresados en las envolventes de esfuerzos y deformaciones de diseño que se muestran en los diferentes documentos del referido expediente,
- De los resultados de cálculos de verificación interna mostrados en el presente documento, se muestra que las capacidades del muro son satisfactorias para las demandas por cortante y flexión máximas que se generan durante las fases del proceso constructivo de los muros anclados. Por lo tanto, se verifica que el diseño del acero de refuerzo propuesto cumple con las demandas presentadas durante la construcción del muro.
- Se ha revisado el proceso constructivo de anclajes con presencia de nivel freático, el cual se incluye como referencia en la presente nota. Es importante que el anclaje se instale con una inclinación mínima tal que la presión hidrostática sea inferior presión de inyección de la lechada. Razón por la que será importante conocer las variaciones del nivel freático durante la ejecución de obra.