

ANEXO I: SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL PROCESO CONSTRUCTIVO

(Sfriso, A. 2001. "Anexo...". En: Rocca, R. y M. Boldrini, 2001. "Adecuación de escolleros del canal de acceso al Puerto La Plata", AADIP.)

INTRODUCCIÓN

La estabilidad de la obra proyectada depende del proceso constructivo adoptado, puesto que la resistencia de los suelos de fundación no es suficiente para sustentar la escollera a menos que se permita la disipación parcial de las presiones neutras generadas por la construcción misma de la obra.

Con el fin de evaluar cuantitativamente el impacto de la velocidad de construcción de cada etapa sobre la estabilidad global se ejecutaron modelos numéricos de los procesos constructivos en estudio, incluyendo la existencia de la vieja escollera colapsada. Estos modelos numéricos requirieron la determinación de parámetros de comportamiento mecánico confiables, por lo que fueron complementados por un programa de investigación geotécnica de campo y laboratorio. Los resultados de los estudios geotécnicos y los modelos numéricos efectuados se presentan en este anexo, junto con sus conclusiones principales.

PROGRAMA DE INVESTIGACIÓN GEOTÉCNICA Y RESULTADOS OBTENIDOS

El perfil estratigráfico de la zona es el correspondiente a toda la ribera del Río de La Plata, con veinticinco a treinta metros de arcillas blandas, normalmente consolidadas, pertenecientes a la formación Postpampeano, que descansan sobre arenas cuarcíticas densas a muy densas de origen marino, pliocénicas, pertenecientes a la formación Puelchense.

Para confirmar las características del depósito se ejecutaron ocho perforaciones de hasta treinta y siete metros de profundidad a ambos lados del canal. En cada una de las perforaciones se realizaron ensayos SPT y se recuperaron muestras inalteradas mediante sacamuestras de pared delgada. Sobre las muestras obtenidas se ejecutaron ensayos de clasificación, identificación de parámetros de comportamiento mecánico, ensayos triaxiales y de consolidación unidimensional. Los resultados obtenidos en todos los ensayos se presentan en las tablas 1 y 2. En la figura 1 se muestra la variación de la resistencia no drenada con la profundidad, mientras que en la figura 2 se muestra la variación del módulo de deformación total con la resistencia al corte no drenada.

Tabla 1. Resultados de los ensayos edométricos

Son Cota deo		SPT	Propiedades índice								Ensayos edométricos							
			SUCS	ω %	ω_L %	ω_p %	I_p %	e -	γ KN/m ³	C_r -	C_c^{max} -	C_c -	p_c KPa	p_0 KPa	OCR -	k m/sec	C_v m ² /sec	
I	10	2.4	CH	45.3	55	24	31	1.20	17.6	0.020	0.31	0.31	75.6	67.1	1.13	1.E-08	3.E-06	
	15	3.2	CH	60.3	65	28	37	1.60	16.4	0.030	0.50	0.44	110.4	98.4	1.12	1.E-09	3.E-07	
	20	3.2	CH	69.3	72	30	42	1.84	15.8	0.030	0.55	0.44	138.2	128.1	1.08	1.E-09	2.E-07	
II	7	0.8	CH	73.2	82	32	50	1.95	15.6	0.035	0.55	0.55	25.3	16.2	1.56	1.E-10	5.E-08	
	11	1.6	CH	50.5	59	27	32	1.34	17.1	0.020	0.41	0.36	47.9	41.5	1.15	1.E-09	9.E-08	
	18	1.6	CH	63.1	66	32	34	1.68	16.2	0.035	0.52	0.40	101.6	85.7	1.19	1.E-09	4.E-07	
III	7	0.8	CH	83.6	81	28	53	2.22	15.1	0.030	0.52	0.52	60.8	47.8	1.27	1.E-10	1.E-08	
	14	0.8	CH	64.7	71	27	44	1.72	16.1	0.030	0.50	0.40	103.3	92.9	1.11	1.E-09	3.E-07	
	20	2.4	CH	58.0	61	28	33	1.54	16.5	0.020	0.45	0.33	156.9	133.1	1.18	1.E-09	5.E-07	
IV	7	0.8	CH	74.2	82	29	53	1.97	15.6	0.040	0.59	0.59	55.4	48.3	1.15	1.E-10	1.E-08	
	13	1.6	CH	46.7	51	25	26	1.24	17.4	0.020	0.30	0.30	96.1	86.7	1.11	1.E-08	2.E-06	
	21	2.4	CH	46.9	56	28	28	1.25	17.4	0.020	0.40	0.27	145.0	144.9	1.00	1.E-08	5.E-06	
V	7	0.8	CH	86.9	90	31	59	2.31	15.0	0.040	0.60	0.60	60.2	53.1	1.13	1.E-10	2.E-08	
	12	1.6	CH	56.1	64	27	37	1.49	16.7	0.020	0.45	0.35	95.5	83.2	1.15	1.E-09	4.E-07	
	22	2.4	CH	50.1	53	28	25	1.33	17.1	0.020	0.37	0.26	159.0	151.0	1.05	1.E-08	2.E-06	
VI	10	0.8	CL	44.2	44	26	18	1.18	17.6	0.020	0.25	0.25	45.5	36.5	1.25	1.E-08	8.E-07	
	18	2.4	CH	55.8	62	27	35	1.48	16.7	0.030	0.40	0.40	105.6	95.6	1.10	1.E-09	6.E-07	
	24	3.2	CH	60.8	71	30	41	1.62	16.3	0.035	0.53	0.42	144.3	132.8	1.09	1.E-09	7.E-08	
VII	9	0.8	CH	85.1	82	31	51	2.26	15.1	0.035	0.60	0.50	53.2	43.9	1.21	1.E-10	1.E-08	
	14	1.6	CH	44.2	53	28	25	1.18	17.6	0.020	0.34	0.25	85.3	76.2	1.12	1.E-08	1.E-06	
	20	3.2	CH	69.2	72	27	45	1.84	15.8	0.035	0.55	0.45	136.7	117.8	1.16	1.E-09	5.E-07	
VIII	28	3.2	CH	43.7	52	25	27	1.16	17.7	0.020	0.30	0.30	189.2	173.0	1.09	1.E-08	4.E-06	
	10	0.8	CH	89.2	90	26	64	2.37	14.9	0.035	0.70	0.60	40.3	25.1	1.61	1.E-10	3.E-08	
	16	1.6	CH	65.4	72	26	46	1.74	16.1	0.035	0.54	0.45	77.2	61.5	1.26	1.E-09	9.E-08	
	24	2.4	CH	43.1	54	26	28	1.15	17.7	0.020	0.32	0.32	132.5	119.6	1.11	1.E-08	5.E-06	

Tabla 2. Resultados de los ensayos triaxiales

Son Cota deo		SPT	Propiedades índice							Ensayos triaxiales										
			SUCS -	ω %	ω _L %	ω _p %	I _p %	e -	γ KN/m ³	σ ₃ KPa	u KPa	σ ₃ ' KPa	c _u KPa	A _f -	E _i MPa	R _f -	ε _f %	N _φ -	φ °	
I	10	2.4	CH	45.3	55	24	31	1.20	17.6	50.0	28.5	21.5	17.5	0.81	9.6	0.87	1.75	2.63	26.7	
	15	3.2	CH	60.3	65	28	37	1.60	16.4	50.0	19.5	30.5	22.5	0.43	14.1	0.92	1.65	2.48	25.1	
	20	3.2	CH	69.3	72	30	42	1.84	15.8	75.0	31.0	44.0	28.5	0.54	16.5	0.90	2.20	2.30	23.2	
II	7	0.8	CH	73.2	82	32	50	1.95	15.6	25.0	16.5	8.5	8.0	1.03	5.9	0.85	1.45	2.88	29.0	
	11	1.6	CH	50.5	59	27	32	1.34	17.1	25.0	11.0	14.0	11.0	0.50	7.1	0.82	1.50	2.57	26.1	
	18	1.6	CH	63.1	66	32	34	1.68	16.2	50.0	20.5	29.5	20.5	0.50	10.4	0.86	2.00	2.39	24.2	
III	7	0.8	CH	83.6	81	28	53	2.22	15.1	25.0	9.0	16.0	12.5	0.36	8.3	0.84	1.50	2.56	26.0	
	14	0.8	CH	64.7	71	27	44	1.72	16.1	50.0	20.0	30.0	22.0	0.45	14.0	0.84	1.90	2.47	25.0	
	20	2.4	CH	58.0	61	28	33	1.54	16.5	75.0	35.5	39.5	31.5	0.56	17.3	0.90	2.50	2.59	26.4	
IV	7	0.8	CH	74.2	82	29	53	1.97	15.6	25.0	3.5	21.5	15.0	0.12	8.2	0.93	2.20	2.40	24.3	
	13	1.6	CH	46.7	51	25	26	1.24	17.4	50.0	28.5	21.5	17.5	0.81	10.9	0.89	2.70	2.63	26.7	
	21	2.4	CH	46.9	56	28	28	1.25	17.4	75.0	41.0	34.0	25.5	0.80	15.7	0.91	2.40	2.50	25.4	
V	7	0.8	CH	86.9	90	31	59	2.31	15.0	25.0	4.0	21.0	14.0	0.14	9.7	0.91	3.30	2.33	23.6	
	12	1.6	CH	56.1	64	27	37	1.49	16.7	50.0	20.0	30.0	22.0	0.45	11.2	0.89	3.50	2.47	25.0	
	22	2.4	CH	50.1	53	28	25	1.33	17.1	75.0	33.5	41.5	31.0	0.54	16.5	0.97	2.10	2.49	25.3	
VI	10	0.8	CL	44.2	44	26	18	1.18	17.6	25.0	13.0	12.0	10.0	0.65	8.8	0.86	1.80	2.67	27.0	
	18	2.4	CH	55.8	62	27	35	1.48	16.7	50.0	24.0	26.0	22.5	0.53	11.9	0.78	1.50	2.73	27.7	
	24	3.2	CH	60.8	71	30	41	1.62	16.3	75.0	47.5	27.5	24.0	0.99	12.3	0.86	1.50	2.75	27.8	
VII	9	0.8	CH	85.1	82	31	51	2.26	15.1	25.0	9.5	15.5	12.0	0.40	6.5	0.82	2.10	2.55	25.9	
	14	1.6	CH	44.2	53	28	25	1.18	17.6	50.0	26.5	23.5	19.5	0.68	10.9	0.80	1.30	2.66	27.0	
	20	3.2	CH	69.2	72	27	45	1.84	15.8	75.0	35.0	40.0	26.5	0.66	17.6	0.78	1.60	2.33	23.5	
VIII	28	3.2	CH	43.7	52	25	27	1.16	17.7	75.0	32.0	43.0	36.0	0.44	17.9	0.98	2.00	2.67	27.1	
	10	0.8	CH	89.2	90	26	64	2.37	14.9	25.0	11.0	14.0	9.0	0.61	6.4	0.83	1.50	2.29	23.0	
	16	1.6	CH	65.4	72	26	46	1.74	16.1	50.0	29.0	21.0	15.5	0.94	10.0	0.92	1.80	2.48	25.1	
	24	2.4	CH	43.1	54	26	28	1.15	17.7	75.0	39.0	36.0	31.0	0.63	17.5	0.95	2.10	2.72	27.6	

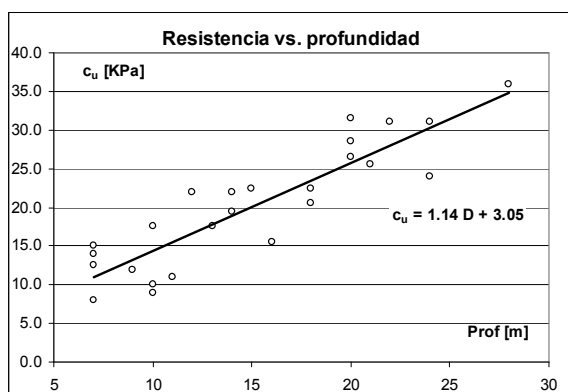


Figura 1. Resistencia al corte no drenada vs. profundidad de las muestras respecto al lecho

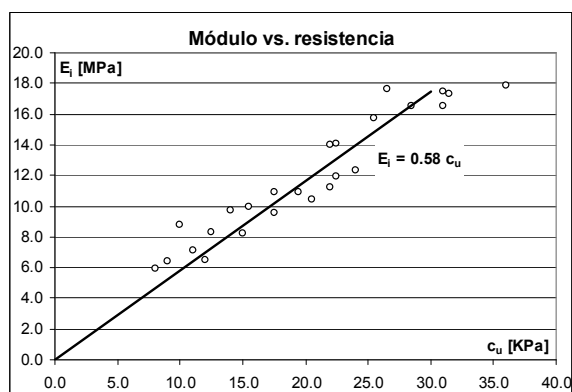


Figura 2. Módulo de deformación inicial no drenada vs resistencia al corte no drenada

SIMULACIÓN DEL PROCESO CONSTRUCTIVO

La simulación numérica del proceso constructivo se ejecutó en el programa de elementos finitos Plaxis V 7.2, que es un código de cálculo geotécnico no lineal que permite el estudio de los procesos de deformación plástica, consolidación, cambio de las presiones neutras, cambios de marea y efectos dinámicos. Se utilizó una ecuación constitutiva derivada de la expresión hiperbólica de Duncan – Chang, con parámetros mecánicos obtenidos mediante la simulación previa de los ensayos triaxiales y de consolidación ejecutados en el laboratorio. Esto implica que los mismos parámetros que permiten repetir numéricamente los resultados de laboratorio fueron utilizados en la verificación de la estructura.

Luego de un proceso de selección preliminar se completaron los estudios de dos secciones típicas, la 5100 NO y la 5100 SE, con dos procesos constructivos diferentes: i) construcción de un primer banco en toda la extensión con recrecimiento posterior, y ii) construcción frontal mediante topado.

Se presentan las etapas del primero de los modelos: i) construcción de la vieja escollera; II) consolidación de los suelos de fundación; iii) colapso de la vieja escollera; iv) primera etapa de la

nueva obra; v) la segunda etapa y vi) tercera etapa de construcción. Para cada una de las etapas se calculó el coeficiente de seguridad en condiciones de marea normal y con bajante extraordinaria (2.50 m bajo el cero). La figura 3 muestra las diferentes etapas del cálculo numérico.

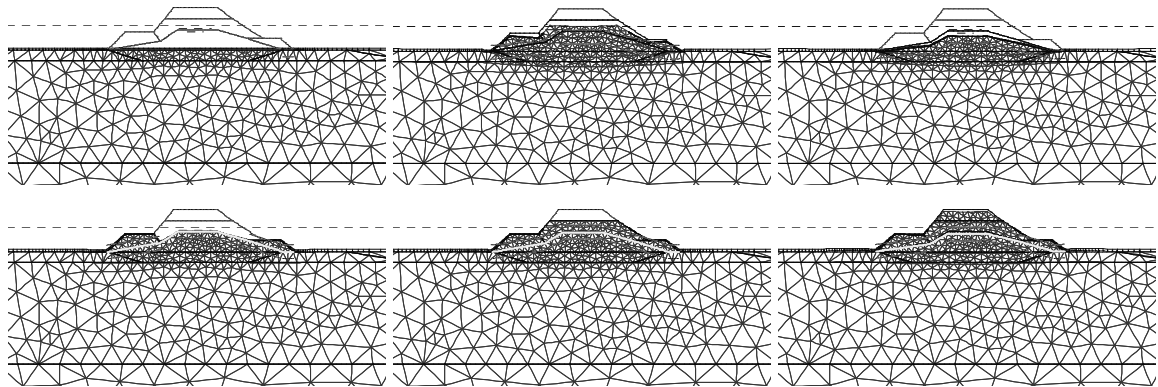


Figura 3. Etapas de cálculo de deformaciones y verificación de estabilidad

Los resultados de las simulaciones numéricas para las dos secciones estudiadas se presentan en la tabla 3, donde S es el asentamiento medio al fin de construcción, mientras que F_u , F_u^{baj} , F_d y F_d^{baj} son los coeficientes de seguridad calculados para las condiciones no drenada, no drenada con bajante extraordinaria, drenada y drenada con bajante extraordinaria (la bajante es no drenada).

Tabla 3. Resultados de la simulación numérica

	S [cm]	F_u [-]	F_u^{baj} [-]	F_d [-]	F_d^{baj} [-]
5100 SE: Banco y recrecimiento	20	1.30	1.05	1.62	1.20
5100 SE:Topado frontal	28	1.26	1.00	1.58	1.20
5100 NO: Banco y recrecimiento	17	1.45	1.32	1.70	1.40
5100 NO:Topado frontal	20	1.36	1.21	1.69	1.40

CONCLUSIONES

Un cálculo convencional de capacidad de carga arroja como resultado que la escollera no puede construirse. Sin embargo, este tipo de cálculo no tiene en cuenta: i) la existencia de una obra anterior; ii) el drenaje parcial de los suelos de fundación; y iii) el proceso constructivo.

Estos factores fueron incluidos en un conjunto de modelos numéricos de las diferentes posibilidades constructivas. Los resultados de este estudio muestran que el coeficiente de seguridad global de la escollera está en el rango 1.26 – 1.45 para el estado “fin de construcción”¹. La condición de máximo riesgo identificada es la ocurrencia de una bajante extraordinaria en los primeros meses después de terminada la obra. Luego de completado el drenaje, una bajante extraordinaria implica una reducción no crítica del coeficiente de seguridad.

La validez de los datos de entrada de todo análisis numérico determina la utilidad de sus resultados. Si bien en este caso se ejecutó un detallado estudio geotécnico, los parámetros de entrada de los modelos no fueron los “peores obtenidos”, sino los “pesimistas”, que incluyen una ponderación de todos los datos disponibles. Por lo tanto, es imprescindible complementar el estudio previo con un programa de control de la obra que incluya los siguientes puntos: i) medición de los asentamientos del lecho; ii) medición de la generación y disipación de presiones neutras en algunas progresivas de control; iii) control del volumen de roca aportada; iv) adaptación del programa de obra a la seguridad global. Si las predicciones de disipación de presiones neutras son más optimistas que la realidad, puede ser necesario intercalar un lapso de consolidación entre las diferentes etapas de obra.

¹ Construcción terminada, sin consolidación primaria producida por la última etapa de obra y sin consolidación secundaria.