



RETRO-ANÁLISIS DE FALLA POR LICUEFACCION DE TERRENO GANADO AL MAR EN LA BAHÍA DE SAN VICENTE



Andrés Torres G.
Universidad de Chile
andres.torres@idiem.cl

Ramón Verdugo A.
Universidad de Chile
rverdugo@cmgi.cl

RESUMEN

Como consecuencia del terremoto 27F se observó una falla por licuefacción del tipo “lateral spreading” en un terreno ganado al mar en la Bahía de San Vicente. Se realizó un retro-análisis de estabilidad del talud submarino mediante un análisis numérico dinámico, con el cual se verificaron los desplazamientos y deformaciones observados en terreno, lográndose establecer valores para la resistencia no drenada movilizada de las arenas que experimentaron licuación.

1. INTRODUCCION

En el sector de la Bahía de San Vicente en la provincia de Concepción (ver Fig. 1.1), se localiza una de las obras portuarias que fue afectada por la ocurrencia del fenómeno de licuefacción durante el terremoto ocurrido en Chile el 27 de febrero del 2010 (Verdugo et al., 2012). Corresponde a una planta de alimentos marinos cuyas instalaciones hasta los años noventa consistían principalmente de un muelle, edificios de oficinas y galpones que contenían equipos industriales. A partir de ese periodo, la empresa comenzó un proyecto de ampliación que contemplaba la construcción de una explanada para instalar nuevas oficinas, equipos y estanques para el almacenamiento y procesamiento de sus productos.

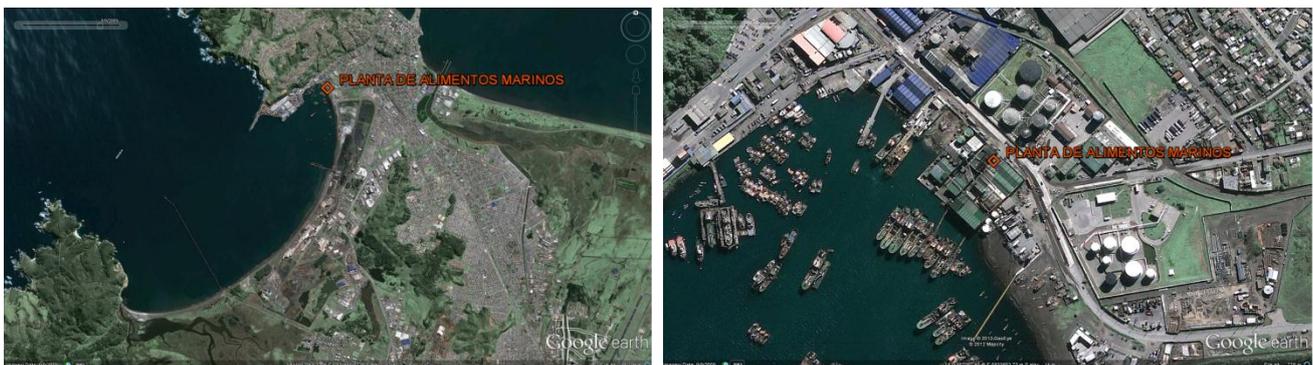


Figura 1.1. Ubicación de Planta de Alimentos Marinos, Bahía de San Vicente (09/09/2009).

Con el objetivo de ganarle terreno al mar, y permitir la generación de una explanada con material de relleno constituido por arenas del Biobío, diseñaron un sistema de contención compuesto de un tablestacado en la periferia Oeste y gaviones en la periferia Sur-Este de la explanada (ver Figs. 1.2 y 2.1). De acuerdo a datos batimétricos, la superficie del relleno presentaba alturas de 12m en el sector Nor-Oeste y 5m en el sector Sur-Este. Debido a la mala calidad del terreno natural, inmediatamente después de su construcción y durante un periodo de dos años, el relleno experimentó importantes asentamientos y desplazamientos horizontales en dirección Oeste. En el área Sur-Este y Nor-Oeste se registraron aproximadamente 0.1m y 1.0m de asentamientos, respectivamente. Con el objetivo de mantener la cota del terreno se continuó relleno con material hasta su estabilización.

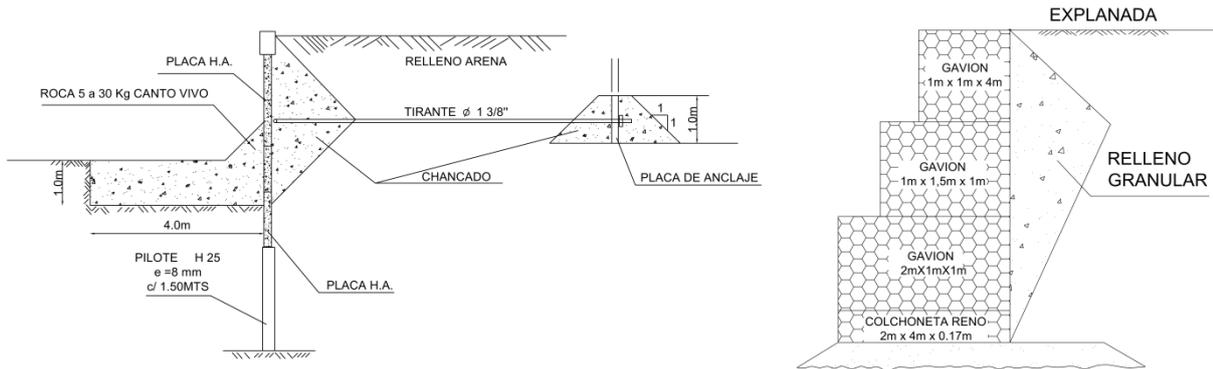


Figura 1.2. Sistema de contención de la explanada: tablestacado y gaviones.

La nueva infraestructura de la planta estaba constituida por edificios de oficinas y servicios, además de un sector de estanques de hormigón armado para el almacenamiento de la materia prima. Los sistemas de fundación utilizados eran tan variados como las estructuras que soportaban. El edificio destinado a la administración de la flota y el edificio administrativo ubicado frente a Av. La Marina fueron construido sobre pilotes de 8" de diámetro y 15m de largo, del mismo modo los evaporadores se encontraban apoyados sobre pilotes 14" de diámetro y 10m de largo (ver Fig. 2.1). El resto de las estructuras y equipos de la planta estaban emplazados sobre fundaciones superficiales como zapatas, vigas o losas de fundación.

Debido a las características de los estanques de hormigón, los cuales alcanzaban hasta 10m de altura, se realizó un mejoramiento del terreno antes de su construcción, basado en la hincada de pilotes. Los pilotes utilizados fueron de madera de eucaliptos de 12" de diámetro y 5m de largo, la secuencia de hincada consideró en la primera etapa un espaciado de 1.5m entre cada pilote. Los estanques se construyeron sobre una losa flotante que iba por sobre la línea de los tirantes del tablestacado.

2. ANTECEDENTES GEOTECNICOS

La limitada pero valiosa información geotécnica recolectada, permite tener una aproximación del modelo estratigráfico del sector, el cual se presenta en los Perfiles A y B. (ver Figs. 2.1 a 2.3). Los datos correspondientes a los índices de penetración estándar fueron recuperados de mediciones realizadas en los años 1990 y 1993 como parte del proyecto de ampliación de la planta, estos se presentan en el Perfil B. Además, se incorporaron los resultados de los ensayos ejecutados el año 2003 durante una exploración geotécnica realizada en una pesquera ubicada al Sur-Este de la planta de alimentos, los cuales se muestran en el Perfil A.

Adicionalmente, se estimó que el basamento rocoso correspondía a una arenisca y que se encontraba a 20m de profundidad desde el fondo marino. Este supuesto está basado en un estudio de mecánica de suelos realizado en el Puerto de San Vicente (Ortigosa, 1993).

Considerando estos antecedentes se confeccionó un modelo estratigráfico para el sector Nor-Oeste del terraplén, el cual se muestra en el Perfil C (ver Fig. 2.4).

La interpretación de los datos indica que existen principalmente tres horizontes de relevancia, un estrato de limos con alto contenido de materia orgánica (Horizonte H-1), un estrato de arenas de bajo contenido de finos (Horizonte H-2,) y finalmente un estrato de arenas limosas (horizonte H-3). El Horizonte H-1 se localiza en las zonas profundas de la bahía, y es producto del material que en una época fue desechado por las industrias pesqueras durante el faenamiento de sus materias primas. Adicionalmente, se encuentra un estrato correspondiente al material de relleno compactado y/o suelo mejorado por la hincada de pilotes (Horizonte H-4) y el basamento rocoso correspondiente a una arenisca (Horizonte H-5).

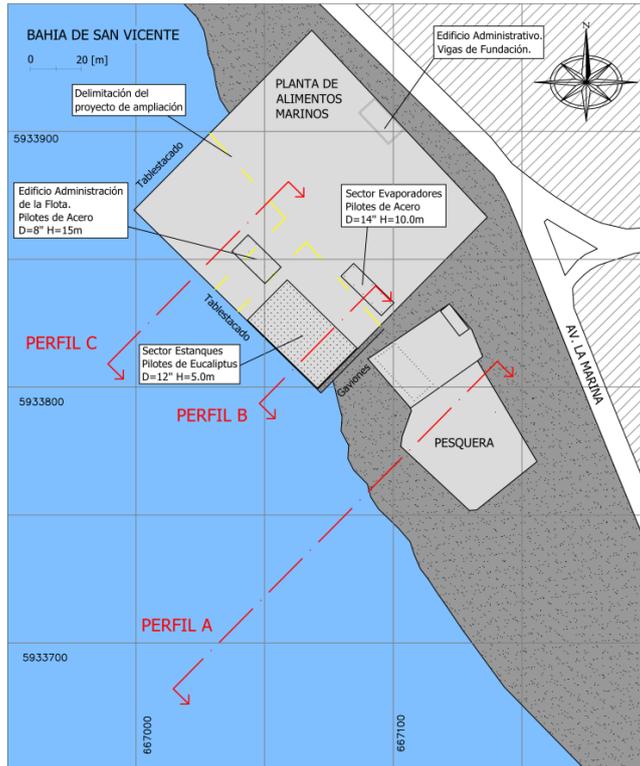


Figura 2.1. Planta general del sector de la explanada de la industria.

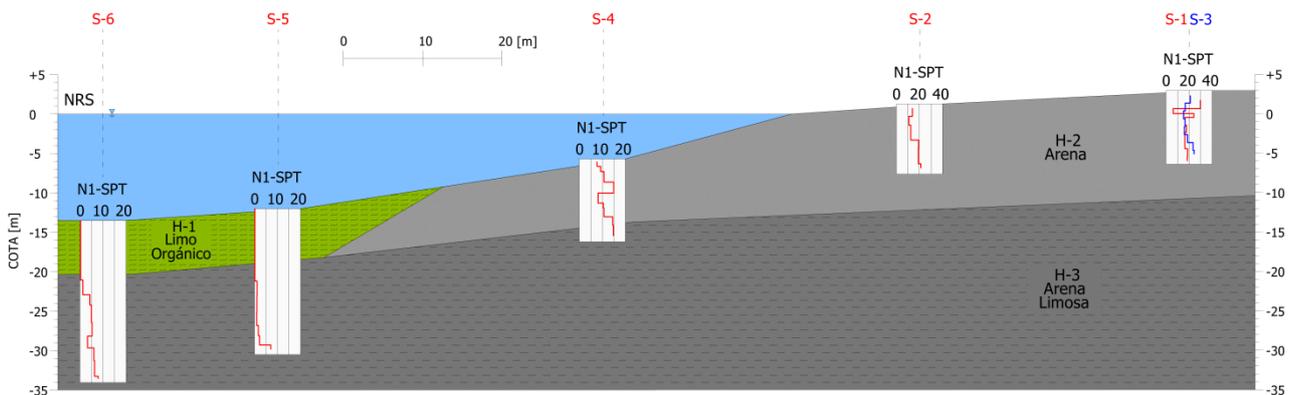


Figura 2.2. Perfil A con propuesta de modelo estratigráfico.

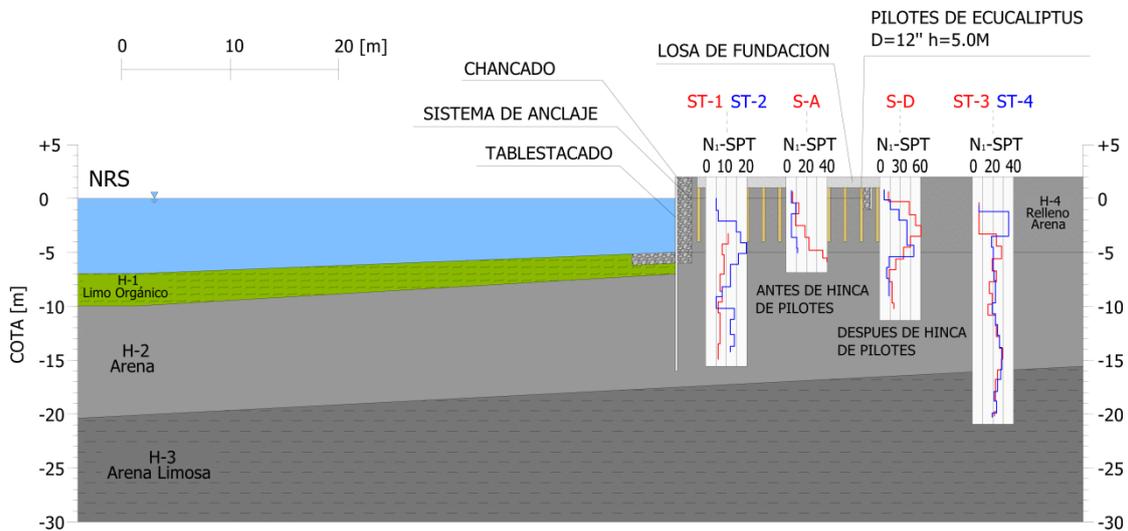


Figura 2.3. Perfil B con propuesta de modelo estratigráfico.

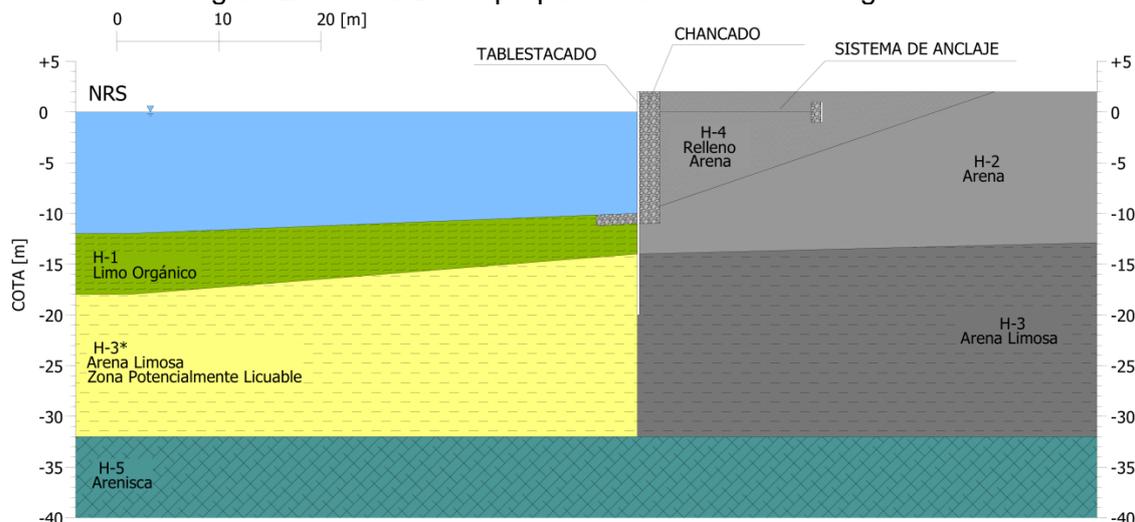


Figura 2.4. Perfil C con propuesta de modelo estratigráfico del sector Nor-Oeste.

Considerando los valores del número de golpes normalizado N_1 es posible identificar los sectores en que existen arenas de baja compacidad, particularmente en la zona del tablestacado y lecho marino. El índice de penetración también confirma la baja consistencia del Horizonte H-1.

Por otra parte, las propiedades de los elementos estructurales que componen el sistema de contención fueron obtenidas de los planos estructurales, y se presentan en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Propiedades de los elementos estructurales utilizados en los modelos.

Elemento Estructural	Modelo	Peso Unitario γ [kg/m ³]	Área Transversal A [m ²]	Modulo de Deformación E [MPa]	Momento de Inercia I [m ⁴]
Tablestacado	Elástico	7500	0.0163	1.80E+05	2.72E-04
Placa de Anclaje	Elástico	2500	0.3	3.50E+04	2.25E-03
Cable	Elasto-Plástico	7000	0.06	2.00E+05	-

3. CARACTERISTICAS DE LOS DAÑOS POST-SISMO

Tras el terremoto 27F se pudo observar una falla por licuefacción del tipo “lateral spreading” en dirección Sur-Oeste, la cual afectó a la totalidad de las instalaciones de la planta pesquera (ver Fig. 3.1). La ocurrencia de este fenómeno se explica por la presencia de arenas potencialmente licuables en el sector del tablestacado, y además, por las características batimétricas y topográficas del lugar.



Figura 3.1. Situación antes (09/09/2009) y después del terremoto 27F (03/06/2010).

En base a las características de los daños ocurridos se pueden distinguir tres zonas cuya distribución se presenta en la Figura 3.1. Los daños más importantes se produjeron en el sector Nor-Oeste de la explanada (Zona 1), el cual quedó sumergido bajo el mar junto con el tablestacado (ver figura 3.2). Este último presentó asentamientos de más de 1.5m y desplazamientos laterales hacia el mar de al menos 2.0m, los que produjeron el colapso de las vigas de acero en un tramo aproximado de 40m de defensa.

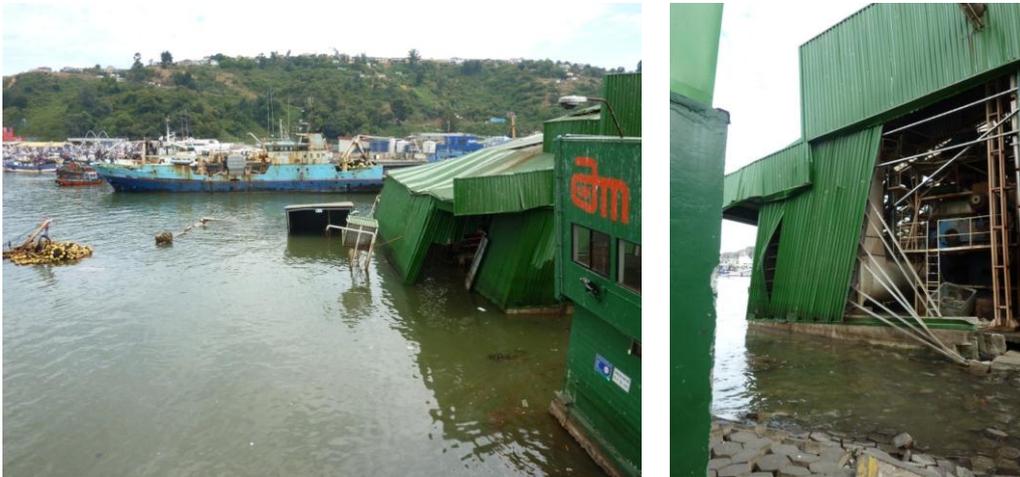


Figura 3.2. Hundimiento bajo el mar de zona Nor-Oeste, Zona 1. (Alimar S.A.).



Figura 3.3. Secuencia de grietas paralelas a Av. La Marina, Zona 2. (Alimar S.A.).



Figura 3.4. Edificio administrativo frente a Av. La Marina, Zona 2. (Bray, 2010 y Alimar S.A.).

Es importante señalar que en la esquina Nor-Oeste del terraplén, el tablestacado se encontraba reforzado por un enrocado que efectivamente fue capaz de protegerlo, razón por la cual no se observaron mayores desplazamientos del sistema de defensa en ese sector. En la zona 2 se observaron grietas en el terreno paralelas a la línea costera que se presentaron hasta Av. La Marina (ver Fig. 3.3), además, se produjeron importantes asentamientos diferenciales de las estructuras que poseían sistemas de fundaciones superficiales y del edificio administrativo ubicado frente a Av. La Marina (ver figura 3.4). En la zona 3, sector donde se encuentran emplazados los estanques, se observaron asentamientos y desplazamientos laterales de aproximadamente 1.0m, quedando el nivel de terreno bajo el agua y originando asentamientos diferenciales de los estanques en dirección Sur-Oeste.

4. RETRO-ANALISIS

Utilizando el código computacional FLAC^{2D} se realizó un análisis de las fallas ocurridas en el tablestacado debido a la ocurrencia del fenómeno de licuefacción.

Para su desarrollo el tablestacado fue simulado a través de dos vigas independientes (modelo elástico) unidas por un cable (modelo elasto-plástico). Debido a que los anclajes no presentaron daños post-terremoto, se consideró que las cargas axiales en el cable nunca excedieron la tensión de fluencia.

Se identificaron como arenas potencialmente licuables aquellas que presentaban índices de penetración estándar normalizado N_1 menores a 15, y que además, se localizaban al Sur-Oeste de la línea del tablestacado. El sector Nor-Este no se consideró potencialmente licuable en consideración de que los trabajos de construcción de la explanada pudieron haber densificado las arenas que la subyacen.

Se utilizaron diferentes registros sísmicos del terremoto 27F medidos en roca, los cuales fueron aplicados al modelo desde la profundidad a la cual se estimó el basamento rocoso y modificados por un multiplicador hasta obtener una aceleración máxima aproximada de 0.41g en la superficie del modelo. Esta aceleración corresponde al medido en la ciudad de Concepción por los equipos de la Red Sismológica de la Universidad de Chile (Boroschek et al., 2010). Para efectos prácticos sólo se presentan los resultados obtenidos con el registro sísmico de la componente E-W medida en la estación ubicada en Rapel (ver Fig. 4.1).

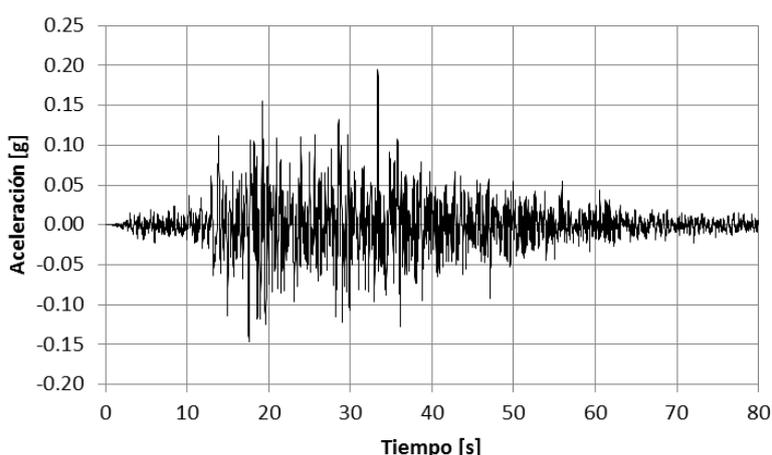


Figura 4.1. Registro de la componente E-W medido sobre roca en la Estación Rapel.

Simplificadamente, la condición de licuefacción de las arenas fue considerada desde el comienzo del registro sísmico, y para su reproducción se utilizó $\Phi=0$ y $C=S_u$, siendo S_u la resistencia última

no drenada. Para asignar los valores de S_u a las distintas cotas del estrato de arena potencialmente licuable, se recurrió a la expresión (1) en que α es una constante.

$$S_u / \sigma'_v = \alpha \quad (1)$$

Para realizar el retro-análisis se buscó un valor para la constante α en un rango de 0.05 a 2.5, tal que el modelo quedara calibrado con los desplazamientos y deformaciones observados en terreno.

El primer modelo buscó reproducir los daños ocurridos en la Zona 1, que es donde se localizaron los mayores desplazamientos y deformaciones del tablestacado y relleno. La geometría del terreno y la estratigrafía se basan en el modelo presentado en el Perfil C (Fig. 2.4). Las propiedades estáticas (drenadas) de los suelos utilizados en la modelación se presentan en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2. Propiedades estáticas (drenadas) de materiales involucrados en el análisis.

Parámetro	Fango	Arena / Arena limosa	Arena Potencialmente Licuable		Relleno Compactado	Material Chancado
	H-1	H-2 / H-3	H-3*		H-4	
N_1 -SPT	-	25	10	8	-	-
Densidad Seca γ_d [ton/m ³]	1.52	1.63	1.56	1.54	1.71	2
Densidad Saturada γ_s [ton/m ³]	1.99	2.06	2.01	2.00	2.12	2.2
Cohesión C [Pa]	0	0	0	0	0	0
Ángulo de Fricción Interna Φ [°]	28	37	35	35	37	46
Módulo de Deformación E [Pa]	9.16E+05	$73800 \cdot (\sigma'_3)^{0.5}$	$65700 \cdot (\sigma'_3)^{0.5}$	$64300 \cdot (\sigma'_3)^{0.5}$	$6000 \cdot (\sigma'_3)^{0.732}$	4.15E+07
Coefficiente de Poisson ν	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30

Para estimar los parámetros de deformación estáticos (drenados) de las arenas y arenas limosas (Horizontes H-1, H-2, H-3 y H-3*), se utilizó el 87% del valor de los módulos de deformación obtenidos de ensayos triaxiales no drenados que se realizaron en muestras inalteradas de arenas limosas del sector (Ortigosa, 1993). En el caso del material de relleno compactado, se recurrió a resultados de ensayos triaxiales drenados en muestras de arenas del Biobío compactadas al 75% de su densidad relativa (Riquelme, 1980).

En la etapa dinámica del modelamiento se empleó un 7.0% de amortiguamiento de Rayleigh y se degradó el módulo de corte de los materiales en un 30%. Adicionalmente, se redujo a un 2% los parámetros de deformación del estrato de arena que licuó durante el sismo (Horizonte H-3*).

Debido a la escasez de información referente al fango (Horizonte H-1) y a su bajo índice de penetración N_1 , conservadoramente se redujo sus parámetros de deformación y se le asignaron valores de la resistencia última no drenada como parte del estrato de arenas licuables (H-3*).

En particular para este modelo se consideró como suelo potencialmente licuable una arena de $N_1=8$ golpes/píe, la cual se ubicaría entre la línea del tablestacado y el mar (ver Fig. 4.2). Además, se estimó un valor de $N_1=25$ golpes/píe para las arenas que subyacen el terraplén, esto en base a

los resultados de los ensayos de penetración estándar ejecutados en el sector Sur-Este del terraplén (Fig. 2.3), y a los importantes asentamientos ocurridos después de la construcción del tablestacado y que se extendieron por un periodo de dos años.

Los asentamientos y desplazamientos laterales de este modelo (ver Figura 4.3) se lograron calibrar para un valor de la constante $\alpha = 0.18$, con el cual se obtuvo valores para la resistencia última no drenada de 9.0 a 25 KPa, como se muestra en la Figura 4.4. Es importante destacar que estos últimos corresponden a los valores del S_u movilizado en las zonas que se observaron las mayores deformaciones y por donde se produjo la falla del terraplén (ver Fig. 4.4). Asimismo, se muestra un registro de aceleraciones medido en la superficie del terraplén, el cual alcanza un máximo aproximado de 3.9 m/s^2 (ver Fig. 4.4).

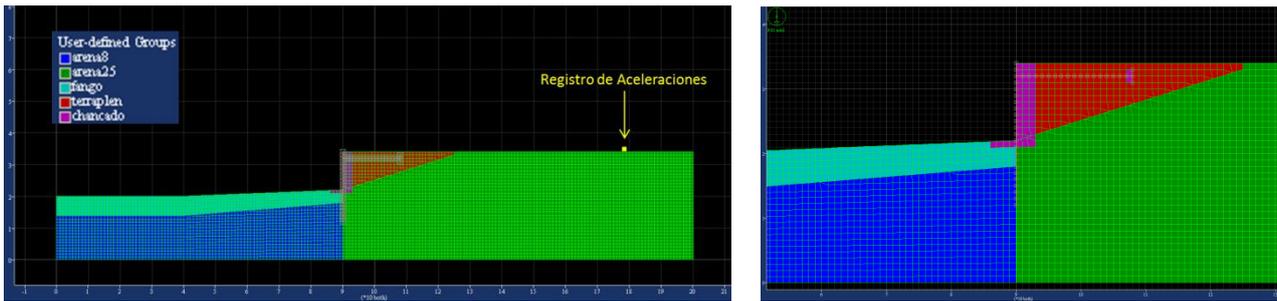


Figura 4.2. Imagen general y detalle del modelo correspondiente al Perfil C.

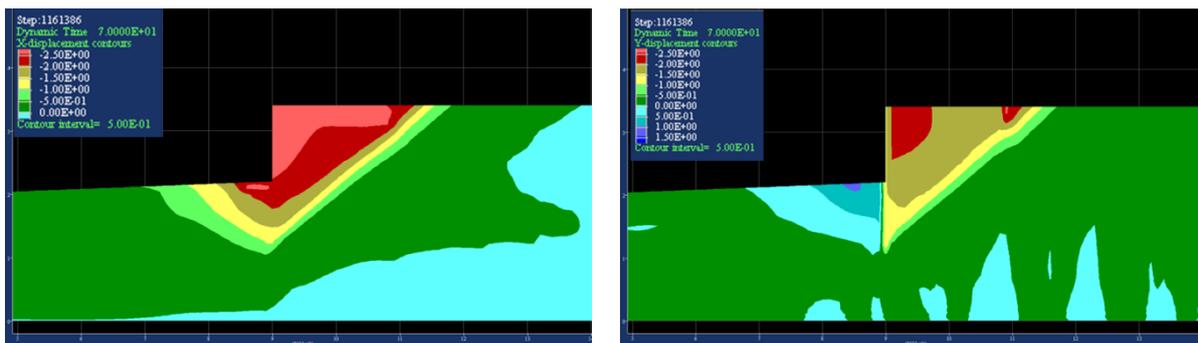


Figura 4.3. Desplazamientos horizontales y verticales post-sismo, Perfil C.

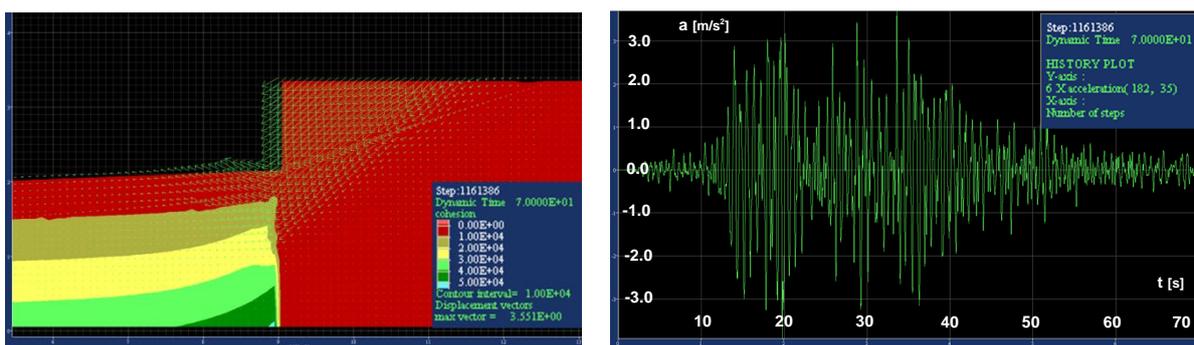


Figura 4.4. Rango de valores de $C=S_u$ y vectores de desplazamiento, y registro de aceleraciones, Perfil C.

El segundo modelo (ver Fig. 4.5.) tiene como objetivo reconstituir lo ocurrido en el sector ubicado frente a los estanques (Zona 3). La geometría del terreno y la estratigrafía se obtuvo del Perfil B (ver Fig. 2.3). Las propiedades de los elementos estructurales y de los estratos son idénticas a los utilizados en el modelo anterior, salvo las propiedades del estrato potencialmente licuable, que en este caso se consideró como una arena de $N_1=10$ golpes/pie.

Los esfuerzos inducidos por los estanques sobre el terraplén fueron modelados a través de una carga uniformemente distribuida de 1.0 kgf/cm². No se consideraron los efectos que pudiesen haber tenido los pilotes de eucaliptos en la mitigación de las deformaciones del suelo durante el sismo.

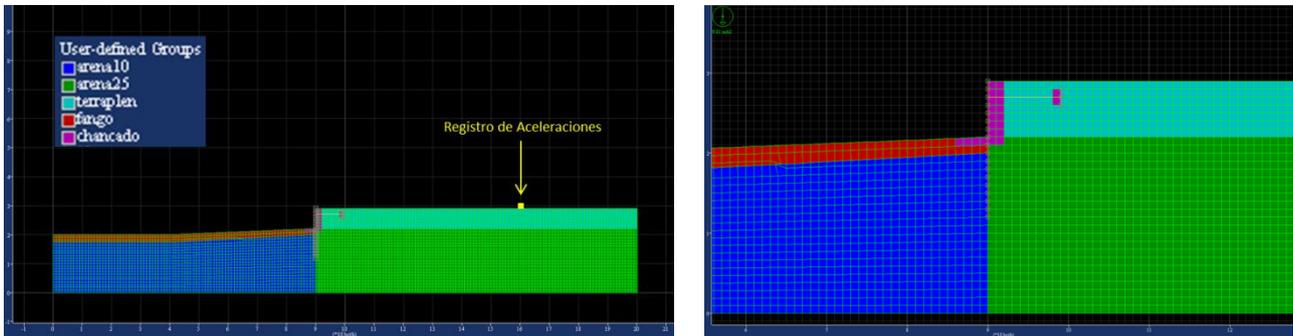


Figura 4.5. Imagen general y detalle del modelo correspondiente al Perfil B.

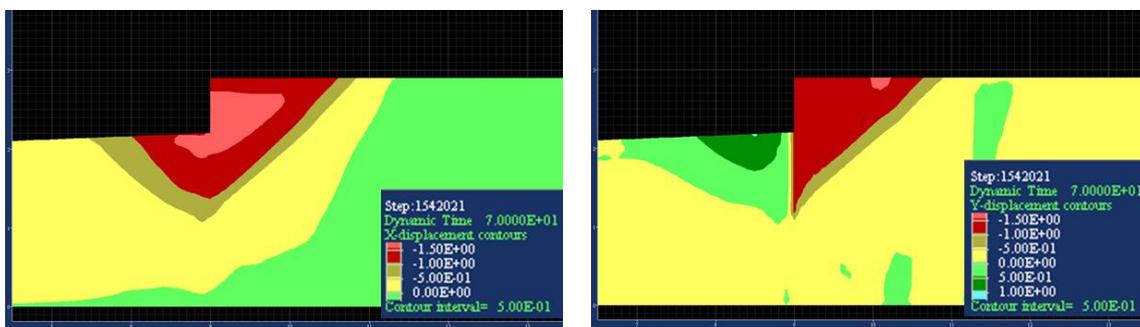


Figura 4.6. Desplazamientos horizontales y verticales post-sismo, Perfil B.

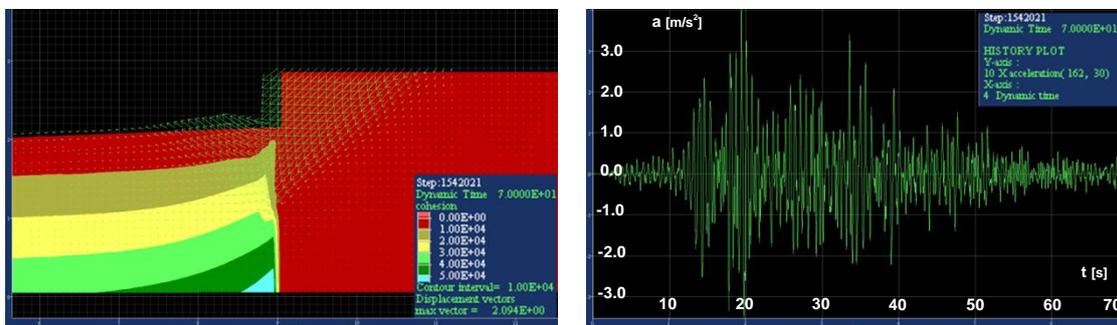


Figura 4.7. Rango de valores de $C=S_u$ y vectores de desplazamiento, y registro de aceleraciones, Perfil B.

Para este modelo, los asentamientos y desplazamientos horizontales (ver Fig. 4.6) se lograron calibrar para un valor de $\alpha = 0.19$, con el que se obtuvo valores de la resistencia última no drenada de 5.0 a 27.0 KPa. También se presenta uno de los registros de aceleraciones obtenido en un punto de monitoreo que se encuentra sobre el terraplén, donde se alcanzó una aceleración máxima de 3.9 m/s² (Fig. 4.7).

En la Tabla 4.3 se presenta un resumen de los valores obtenidos para la resistencia última no drenada movilizada y la relación S_u/σ'_v . En la Figura 4.9 se presenta la comparación de estos resultados con los logrados en otros estudios de casos en que ocurrió el fenómeno de licuefacción y se realizó un retro-análisis (Stark & Mesri, 1992). Como se puede ver el rango de valores de la resistencia última no drenada movilizada se ajusta a la tendencia, lo mismo ocurre con la relación S_u/σ'_v .

Tabla 4.3. Resumen de resultados de los modelos.

	N_1 -SPT	S_u [KPa]		S_u/σ'_v
		Mínimo	Máximo	
Modelo 1 - Perfil C	8	9	25	0.18
Modelo 2 - Perfil B	10	5	27	0.19

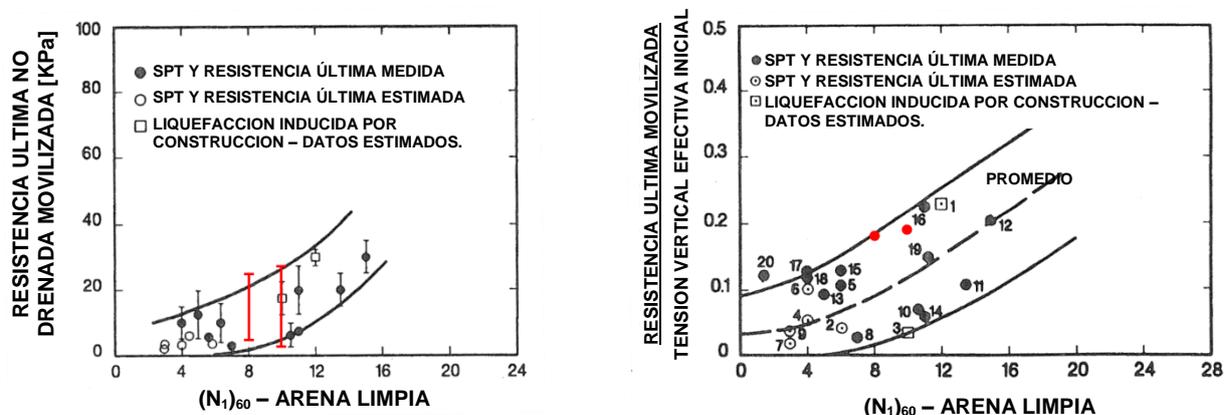


Figura 4. 8. Comparación de los resultados obtenidos para S_u y α (en color rojo) con otros estudios similares (Stark & Mesri, 1992).

5. CONCLUSIONES

Se realizó un retro-análisis de una falla del tipo “lateral spreading” en un terreno ganado al mar, debido a la ocurrencia del fenómeno de licuefacción durante el terremoto 27F. Los modelos fueron calibrados en base a los desplazamientos y deformaciones observados en terreno, pudiéndose estimar valores para la resistencia última no drenada movilizada S_u y para la relación S_u/σ'_v , de acuerdo al índice de penetración estándar normalizado N_1 que presentaban los estratos de arena potencialmente licuable. En el contexto de la limitada información disponible y de las hipótesis adoptadas, es posible señalar que los resultados conseguidos se ajustan al rango de valores obtenido en otros estudios a nivel mundial.

6. AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Ingeniero Julián Ocqueteau, ALIMAR S.A. y SIRUS Consultores Marítimos por compartir la valiosa información con la cual fue posible desarrollar este estudio.

7. REFERENCIAS

- Alimentos Marinos Alimar S.A. Comunicación Personal.
- Boroschek R., Soto P., León R., (2010). Registros del terremoto del Maule, Mw=8.8, 27 de febrero de 2010. Informe RENADIC 10/05 Rev. 1.
- Bray, J. (2010). Effects of liquefaction on buildings and industrial facilities. Special Session. 5th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Santiago Chile.
- Ortigosa P., Musante H., (1993). Análisis de los corrimientos del sitio cero del Puerto de San Vicente. Conferencia Especial. 3er Congreso Chileno de Ingeniería Geotécnica, Vol. 2.
- Riquelme R., Valenzuela M., (1980). Estudio de las propiedades ingenieriles de las arenas Bio-Bio. Tesis, Universidad de Concepción.
- Stark T., Mesri. G., (1992). Undrained shear strength of liquefied sands for stability analysis. Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 118, No.11, 1727-1747.
- Verdugo R., González J., González V. y Torres A., (2012). Características y efectos del fenómeno de licuefacción observado en el sismo del 27F. Mw=8.8. Terremoto en Chile. 27 de Febrero 2010.