

Desempeño de perfiles metálicos hincados bajo carga lateral en parques solares fotovoltaicos

Bolatti, Alejandro G.^{a,b} Codevilla, Mauro^{c,d}; Covassi, Pedro^e; Dadante Ascar, Julián^f

^aGEOCLUSTER, ^babolatti@geocluster.com.ar, ^epacovassi@gmail.com

^cAOSA SA, ^dmcodevilla@aosa.com.ar, ^fjdadante@aosa.com.ar

Palabras clave: ensayo de carga lateral, perfiles metálicos hincados, parámetros geotécnicos, modelo geotécnico-estructural.

RESUMEN

El estudio aborda la evaluación del desempeño de perfiles metálicos hincados bajo carga lateral, considerando la interacción suelo–estructura y la confiabilidad de los parámetros geotécnicos empleados en su etapa de diseño. Los perfiles son utilizados como fundaciones de estructuras tipo tracker en parques solares fotovoltaicos (PSFV). Se presentan resultados de ensayos in situ procedentes de dos sitios: 1) PSFV Victorica (La Pampa), donde se ensayaron 27 perfiles en suelos compuestos predominantemente por arenas finas sueltas, 2) PSFV San Vicente (Misiones), donde se ensayaron 22 perfiles en suelos compuestos predominantemente por limos arcillosos plásticos. La metodología consiste en comparar la respuesta medida in situ con las predicciones analíticas obtenidas a partir de modelos basados en parámetros derivados de estudios geotécnicos convencionales, considerando la rigidez relativa suelo–perfil. El trabajo estudia el grado de concordancia entre ambas aproximaciones y analiza la sensibilidad de la respuesta a las hipótesis adoptadas en la caracterización del suelo. Los resultados permiten discutir el alcance y las limitaciones de las prácticas habituales de exploración y diseño, así como su impacto en la estimación del desempeño en carga lateral para este tipo de fundaciones.

ABSTRACT

The study addresses the evaluation of the lateral load performance of driven steel profiles, considering soil–structure interaction and the reliability of the geotechnical parameters adopted during the design stage. These profiles are used as foundations for tracker structures in photovoltaic solar plants. In situ test results from two sites are presented: (1) Victorica solar park (La Pampa), where 27 profiles were tested in loose fine sandy soils; and (2) San Vicente solar park (Misiones), where 22 profiles were tested in plastic clayey silt soils. The methodology consists in comparing the measured in situ response with analytical predictions obtained from models based on parameters derived from conventional geotechnical investigations, considering the relative stiffness between soil and profile. The study examines the level of agreement between both approaches and evaluates the sensitivity of the response to the assumptions adopted in soil characterization. The results enable a discussion on the scope and limitations of common site investigation and design practices, as well as their impact on the estimation of lateral load performance for this type of foundation system.

1. INTRODUCCIÓN

El uso de perfiles metálicos hincados constituye una solución ampliamente empleada como fundación de sistemas de trackers y paneles en parques solares fotovoltaicos de mediana y gran envergadura, tanto en el país como a nivel internacional. Debido al reducido peso propio de estas estructuras, las acciones predominantes sobre las fundaciones se vinculan principalmente con los efectos del viento, que generan esfuerzos verticales de compresión o tracción y cargas laterales.

La respuesta frente a carga lateral suele estimarse mediante métodos simplificados de interacción suelo–estructura, siendo el método de Broms (Broms, 1964) uno de los más utilizados para evaluar la resistencia última y los desplazamientos de pilotes sometidos a cargas horizontales.

El presente trabajo analiza la validez de las predicciones obtenidas mediante dicho método, a partir de parámetros derivados de estudios geotécnicos convencionales, mediante su comparación con ensayos de carga lateral realizados en los mismos proyectos. Para ello, se evalúan el sesgo en la estimación de la resistencia última, la respuesta de los perfiles frente al límite de desplazamiento establecido para condiciones de servicio y las diferencias de comportamiento entre suelos friccionales y cohesivos.

La evaluación no se limita a la comparación puntual entre valores calculados y medidos, sino que considera también la tendencia y la dispersión de los resultados. Siguiendo el enfoque de Paikowsky, S. G. et al. (2004) y Amar et al. (2021), se utiliza el factor de sesgo (bias en inglés) de resistencia, definido como la relación entre la resistencia medida y la estimada, junto con su media y coeficiente de variación, para caracterizar el desempeño predictivo del método.

2. CASOS DE ESTUDIO

Los proyectos de estudio se encuentran en las localidades de Victorica (La Pampa) y San Vicente (Misiones). La selección de los sitios permite comparar el desempeño del modelo en condiciones geotécnicas contrastantes: suelos predominantemente granulares - friccionales (PSFV Victorica) y suelos finos - cohesivos (PSFV San Vicente). A continuación, se realiza una breve descripción de cada proyecto.

2.1 PSFV Victorica

El PSFV Victorica ocupa una superficie total de aproximadamente 16 Has y posee una capacidad instalada de 7.85 MW, requiriendo para su ejecución el uso de alrededor de 3.000 perfiles W de distintas secciones, con longitudes del orden de los 4 metros.

El estudio geotécnico contempló la ejecución de 10 sondeos SPT, ensayos de penetración de cono dinámico (DCP) y una calicata superficial para inspección visual y muestreo. Los ensayos de laboratorio consistieron en análisis granulométricos, límites de consistencia, contenido de humedad, pesos unitarios y clasificación SUCS.

En términos generales, el perfil geotécnico investigado está constituido predominantemente por arenas finas mal graduadas, con bajo contenido de finos y reducidos pesos unitarios secos en los estratos superficiales. No se detectó la presencia de nivel freático dentro de la profundidad explorada. La conformación superficial del perfil responde a depósitos de origen eólico, desarrollados en forma de dunas.

2.2 PSFV San Vicente

El PSFV San Vicente ocupa una superficie total de aproximadamente 37 Has y posee una capacidad instalada de 21.9 MW, requiriendo para su ejecución el uso de alrededor de 6.500 perfiles W.

El estudio geotécnico contempló la ejecución de 12 sondeos SPT. Los ensayos de laboratorio consistieron en análisis granulométricos, límites de consistencia, contenido de humedad, pesos unitarios y clasificación SUCS. Adicionalmente, se realizaron pruebas triaxiales rápidas (UU).

En términos generales, el perfil geotécnico investigado se compone de una arcilla limosa natural de origen residual, procedente de la descomposición del basalto subyacente. Se trata de materiales muy blandos a nivel superficial con tendencia al incremento de su resistencia en profundidad.

3. ENSAYOS DE CARGA LATERAL

3.1 Metodología de ejecución del ensayo

A partir de este ensayo se pretende simular la incidencia del viento sobre los paneles vía esfuerzos de flexión simple, aplicando una carga horizontal a una altura libre tal que el esfuerzo aplicado sea equivalente a la acción natural.

La carga lateral se aplica en forma gradual mediante un aparejo de cadenas vinculado al perfil por medio de un gancho para vigas. En el extremo opuesto, se vincula el aparejo al chasis de un vehículo o máquina pesada que representa el "peso muerto" y genera una reacción registrada por la celda de carga, dando como resultado el desplazamiento lateral del perfil mediante el registro de 1 ó 2 flexímetros. El protocolo de ejecución de ensayo responde, en general, a los lineamientos propuestos por el fabricante de trackers. En la Figura 1 (Bolatti et. Al, 2025) se presenta la configuración general del ensayo.

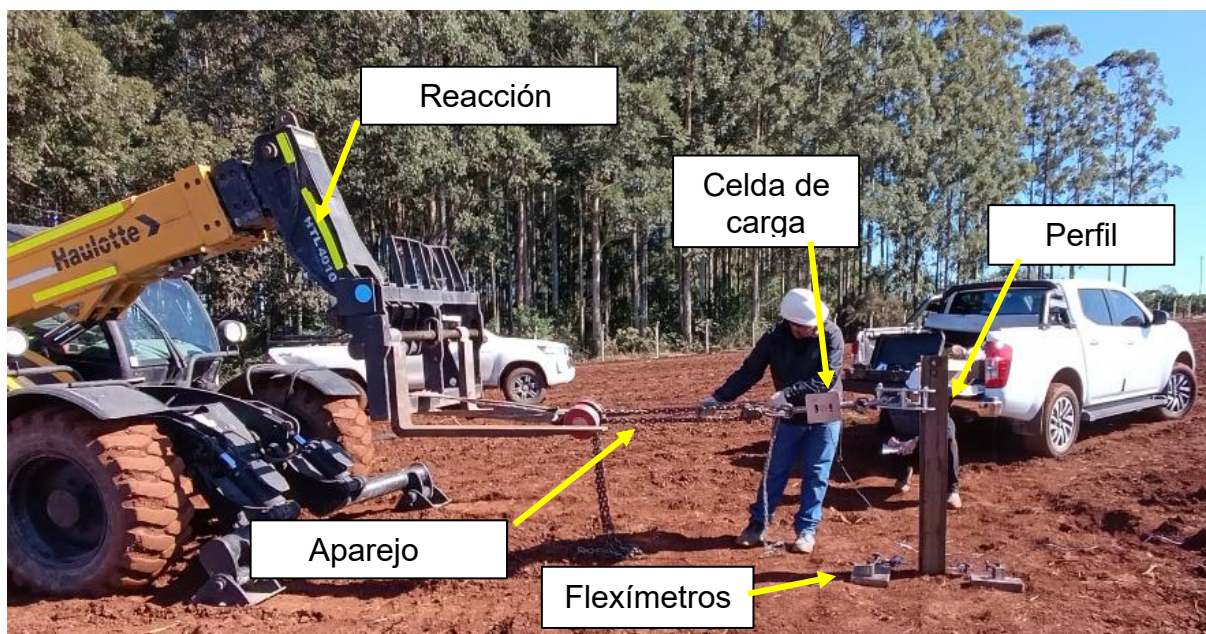


Figura 1. Arreglo típico de un ensayo de carga lateral.

Los flexímetros se ubicaron a una altura prefijada de 50 mm desde el nivel del terreno natural. La aplicación de la carga se efectuó a 100 cm y 150 cm desde el nivel del terreno natural para los ensayos en PSFV Victorica y PSFV San Vicente, respectivamente.

En la Tabla 1 presenta los perfiles ensayados en cada sitio. Las Figuras 2 y 3 presentan las curvas carga (kN) – desplazamiento lateral (mm) obtenidas:

Proyecto	Perfil	Longitud total [m]	Longitud hincada [m]	Ensayos realizados	Carga máxima a ensayar [kN]
Victorica	W8x10	3,4	2,2	2	16
		3,7	2,5	3	16
		4,2	3,0	6	16
	W6x8,5	3,4	2,2	4	8
		3,7	2,5	9	8
		4	2,8	3	8
		4	1,8	6	48
	W6x15	4	2,5	5	48
		4	1,8	5	24
		4	2,5	6	24

Tabla 1. Perfiles ensayados en PSFV Victorica y San Vicente.

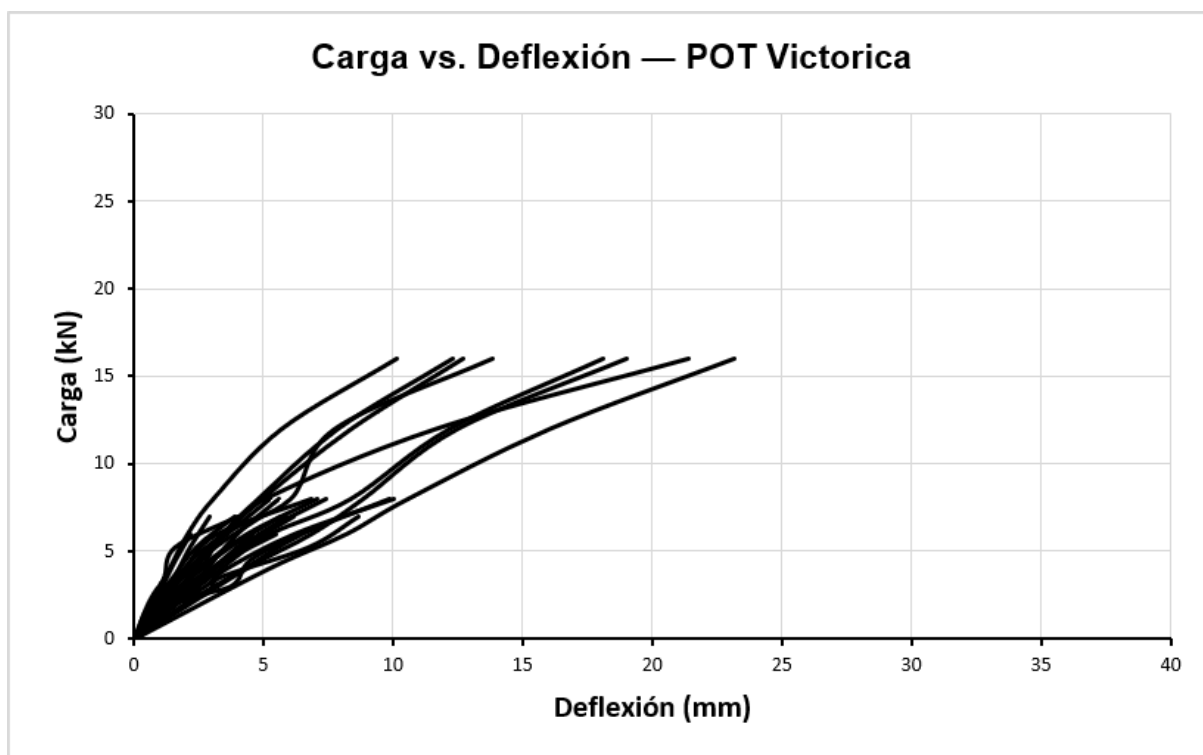


Figura 2. Curvas Carga-Deflexión PSFV Victorica.

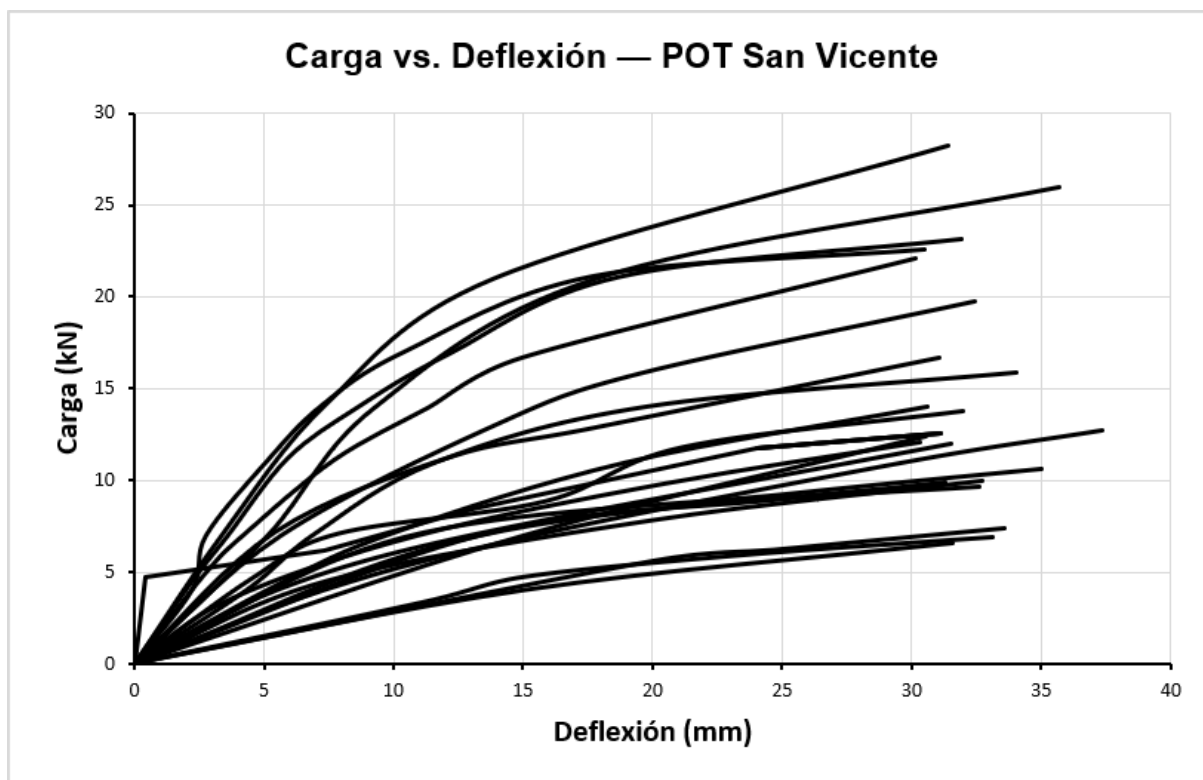


Figura 3. Curvas Carga-Deflexión PSFV San Vicente.

4. ESTIMACIÓN TEÓRICA

4.1 Método de Broms

La predicción de resistencia últimas y en servicio se llevó a cabo empleando el método de Broms (Broms, 1964). El método estima la capacidad lateral última de pilotes mediante modelos simplificados de equilibrio límite entre el pilote y el suelo. La estimación de las resistencias se lleva a cabo distinguiendo entre pilotes cortos y largos, según predomine la rotación rígida del pilote o la formación de rótulas plásticas. Las formulaciones propuestas varían de acuerdo con el tipo de suelo (friccional o cohesivo) y restricción o no del desplazamiento lateral del pilote a nivel superior. A continuación se indican alguna de las expresiones para suelos cohesivos y granulares, respectivamente:

Módulo de reacción horizontal:

$$K = 67 \left(\frac{C_u}{D} \right) \quad (1)$$

$$K = n_h \left(\frac{Z}{D} \right) \quad (2)$$

Donde:

C_u : cohesión no drenada.

D : ancho de ala.

Z : profundidad.

Factor de rigidez:

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{KD}{4E_p I_p}} \quad (3)$$

$$\eta = \sqrt[5]{\frac{n_h}{E_p I_p}} \quad (4)$$

E_p : módulo elástico del perfil.

I_p : momento de inercia.

Resistencias últimas:

$$f = \frac{H_u}{9C_u D} \quad (5)$$

$$M_{max} = H_u (e + 1.5D + 0.5f) \quad (6)$$

$$H_u = \frac{0.5DL^3 K_p \gamma}{(e+L)} \quad (7)$$

Donde:

f : profundidad donde se produce máximo momento flector en suelos cohesivos.

M_{max} : momento máximo en la falla de un pilote corto, cabeza libre en suelos cohesivos.

K_p : coeficiente de empuje pasivo, suelos granulares.

γ : peso unitario del suelo.

e : distancia desde el punto de aplicación de la carga a la superficie del terreno.

L : longitud de empotramiento del perfil.

4.2 Parámetros geotécnicos adoptados

Los parámetros empleados en el análisis se estimaron mediante el empleo de correlaciones empíricas basadas en los valores de N_{SPT} y ensayos de laboratorio obtenidos en los estudios geotécnicos, con el propósito de aplicar un procedimiento equivalente y facilitar la comparación entre ambos sitios.

A partir de los valores de N_{SPT} corregidos, se obtuvieron valores de densidad relativa (PSFV Victorica) y resistencia al corte no drenado (PSFV San Vicente) para luego obtener los módulos de reacción lateral según el procedimiento detallado por Broms.

En el caso de PSFV Victorica, ante la ausencia de una determinación directa del ángulo de fricción interna, se adoptó un valor de 30° , considerado representativo de las arenas identificadas en el sitio, para la determinación de la resistencia pasiva del suelo.

La Tabla 2 presenta los datos geotécnicos de interés para la presente investigación:

Parámetros	Símbolo	Victorica	San Vicente
Clasificación SUCS	—	SP-SM	MH
Valores SPT hasta 3-4 m prof.	N_{60} o $(N_1)_{60}$	3 - 9	4–8
Densidad relativa	D_r	27 - 43%	—
Índice de plasticidad	IP	No plástico	14–37 %
Ángulo de fricción	ϕ	30°	—
Resistencia al corte no drenado	s_u	—	25–50 kPa
Peso unitario	γ	14 kN/m ³	15 kN/m ³
Módulo de reacción horizontal	n_h o K	8 – 21 MN/m ³	10 – 36 MN/m ³
Condición de cabeza	—	Libre	Libre

Desplazamiento límite de servicio	y_s	25 mm	25 mm
Modelo de resistencia última	—	Broms, suelo granular	Broms, suelo cohesivo
Condición del pilote según Broms	—	Corto	Corto

Tabla 2. Parámetros geotécnicos adoptados.

4.3 Predicción de resistencia lateral última y en servicio

Para cada uno de los perfiles ensayados se determinaron la resistencia lateral última (H_u) y la carga correspondiente a un desplazamiento horizontal de 25 mm (H_{25}). Esta última magnitud se adoptó como referencia para analizar el comportamiento de los perfiles frente al límite de desplazamiento establecido para las condiciones de servicio provistas en el protocolo de ensayos del proyecto PSFV Victorica.

La Tabla 3 presenta, para cada combinación, el número de casos analizados y los valores medios, mínimos y máximos en estado último y en servicio. Con el objeto de facilitar su interpretación, los resultados se agruparon según el sitio, la sección del perfil y la longitud de hincado.

Sitio	Sección	L [m]	H_u [kN] media, (mín.–máx.)	H_{25} [kN] media, (mín.–máx.)
Victorica	W6×8,5	2,20	7.16 (7.16–7.16)	14.8 (9.6–19.0)
		2,50	9.3 (9.3–9.3)	16.0 (10.9–19.2)
		2,80	12.2 (12.2–12.2)	20.8 (20.5–21.5)
	W8×10	2,20	7.2 (7.2–7.2)	19.6 (19.6–19.6)
		2,50	9.3 (9.3–9.3)	25.8 (24.2–29.0)
		3,00	14.1 (14.1–14.1)	26.1 (17.7–27.8)
San Vicente	W6×15	1,80	10.9 (7.5–15.9)	19.7 (15.8–25.0)
		2,50	23.3 (20.2–29.5)	21.6 (19.8–25.0)
	W6×8,5	1,80	10.2 (8.5–11.19)	17.5 (15.7–19.3)
		2,50	15.8 (12.41–20.6)	16.0 (14.0 - 20.6)

Tabla 3. Cargas últimas y en servicio obtenidas mediante el método de Broms.

En PSFV Victorica, la resistencia lateral última calculada varió entre 7,2 y 14,1 kN. Las cargas calculadas para un desplazamiento de 25 mm presentaron valores entre 9,6 y 29,0 kN. Las diferencias observadas se vinculan principalmente con la sección del perfil, la longitud hincada y el módulo de reacción lateral adoptado en cada punto.

En PSFV San Vicente, las resistencias últimas calculadas se ubicaron entre 7,5 y 29,5

kN. Por su parte, las cargas correspondientes a un desplazamiento de 25 mm variaron entre 14,0 y 25,0 kN. La amplitud de los resultados refleja las variaciones de la resistencia al corte no drenado y de los módulos de reacción lateral estimados para los distintos sectores del proyecto.

Según se puede observar en la Tabla 3, la mayoría de los casos muestra valores de cargas últimas inferiores a las cargas estimadas para el desplazamiento de servicio. En estos casos, se adopta el valor estimado para la resistencia última, ya que el modelo de Broms asume un comportamiento elasto - plástico perfecto: elástico hasta la falla y luego de la falla, plastificación.

5. INTERPRETACIÓN Y FILTRADO DE ENSAYOS

Con el objeto de determinar la resistencia última y en servicio a partir de los ensayos, se procedió a realizar un ajuste de las curvas carga – deflexión a partir del modelo hiperbólico propuesto por Duncan y Chan (1970). Si bien el modelo fue desarrollado originalmente para representar relaciones tensión–deformación de suelos en ensayos triaxiales, su formulación permite aproximar el comportamiento no lineal observado en las curvas carga–deflexión. Para cada ensayo, la relación entre la carga lateral (H) y la deflexión horizontal (y) se expresó mediante:

$$H_i = \frac{y_i}{a + b \cdot y_i} \quad (8)$$

Donde a y b se determinan ajustando flexibilidad vs. Deflexión a una ecuación lineal:

$$\frac{H_i}{y_i} = a + b \cdot y_i \quad (9)$$

De este modo, los parámetros a y b se determinaron mediante una regresión lineal entre la flexibilidad secante y la deflexión. En el presente trabajo se adoptó como resistencia última experimental de referencia el 85 % del valor asintótico.

5.1 Filtrado de ensayos

Para determinar la validez de los ensayos incluidos en el estudio, se establecieron dos criterios de aceptación. En primer lugar, que el ajuste lineal asociado al ajuste de Duncan y Chan presentara un coeficiente de determinación R^2 comprendido entre 0,90 y 1,00, como indicador de una adecuada correspondencia entre los datos experimentales y la hipérbola adoptada. En segundo lugar, se requirió que cada curva carga–deflexión estuviera construida a partir de, al menos, tres lecturas consistentes durante el ensayo, con el fin de evitar considerar como válidos ajustes definidos por una cantidad insuficiente de mediciones.

Finalmente, se adoptaron como válidos 16 ensayos correspondientes al PSFV Victorica y 19 correspondientes al PSFV San Vicente, sumando un total de 35 ensayos frente a los 49 iniciales.

Sitio	Sección	L [m]	n ²	Resistencia última $f_{0,85}$ [kN] media (mín.–máx.)	Resistencia en servicio H_{25} [kN] media (mín.–máx.)
PSFV Victorica	W6×8,5	2,2	3	12.1 (9.7–14.7)	11.7 (10.4–12.9)
		2,5	7	18.3 (11.5–27.6)	14.2 (11.4–15.5)
		2,8	2	23.2 (16.5–30.0)	15.1 (12.4–17.8)
	W8×10	2,5	1	19.2 (19.2–19.2)	16.5 (16.5–16.5)
		3	3	34.1 (24.5–42.8)	23.1 (21.8–24.8)
PSFV San Vicente	W6×15	1,8	5	13.5 (11.1–19.8)	9.1 (6.0–15.3)
		2,5	4	28.2 (11.6–37.2)	19.1 (9.5–26.3)
	W6×8,5	1,8	4	20.1 (17.2–23.4)	12.6 (10.6–14.6)
		2,5	6	22.5 (12.4–28.8)	16.3 (10.0–22.3)

Tabla 4. Resultados obtenidos mediante ajuste con modelo hiperbólico Duncan y Chan (1970).

6. RESULTADOS Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO

El desempeño del procedimiento de cálculo se evaluó mediante los factores de sesgo (bias en inglés) definidos como la relación entre el valor obtenido a partir de los ensayos y la correspondiente predicción teórica. El análisis se realizó separadamente para la resistencia última y resistencia en servicio (desplazamiento horizontal de 25 mm). Este criterio sigue el enfoque aplicado por Amar *et al.* (2021) para la caracterización estadística de métodos de estimación de resistencia de pilotes hincados.

El objetivo de los bias no es establecer coeficientes normativos de reducción, sino caracterizar la tendencia y la dispersión de las predicciones obtenidas mediante el método de Broms cuando sus parámetros de entrada se estiman a partir de estudios geotécnicos convencionales (ensayos SPT y rutina básica de laboratorio).

6.1 Definición de los bias de resistencia

Para el estado último se definió:

$$\lambda_u = \frac{H_{Umedido}}{H_{Uestimado}} \quad (10)$$

donde $H_{Umedido}$ representa la resistencia de referencia obtenida mediante la interpretación hiperbólica del ensayo y $H_{Uestimado}$ la resistencia última estimada mediante Broms.

Para la respuesta correspondiente al desplazamiento límite de servicio se definió:

$$\lambda_s = \frac{H_{25medido}}{H_{25estimado}} \quad (11)$$

donde $H_{25medido}$ representa la carga obtenida de la curva experimental para un desplazamiento horizontal de 25 mm y $H_{25estimado}$, la carga calculada para el mismo desplazamiento mediante el modelo adoptado.

Con estas definiciones, un bias de resistencia igual a la unidad indica coincidencia entre el valor medido y el calculado. Los valores mayores que la unidad indican que el método subestima la respuesta experimental, mientras que los valores menores que la unidad muestran que el modelo la sobreestima.

6.2 Resistencia última

La Tabla 5 presenta los datos estadísticos obtenidos para los bias de resistencia última:

Conjunto	n	λ_u	σ	COV	Mín.	Máx.
Total	35	1,76	0,59	0,34	0,53	3,03
PSFV Victorica	16	2	0,55	0,28	1,24	3,03
PSFV San Vicente	19	1,55	0,56	0,36	0,53	2,59

Tabla 5. Media, desvío estándar y COV para carga última.

Donde λ_u representa la media aritmética, σ , el desvío estándar muestral y la relación entre el desvío y la media definen el coeficiente de variación, COV, representando la variabilidad de los bias, con respecto al valor promedio.

Para la muestra completa se obtuvo un bias medio de 1,76, indicando que el método de Broms subestimó, en promedio, la resistencia última obtenida.

En PSFV Victorica, la media alcanza un valor de 2 y todos los bias resultaron mayores a 1, dando indicios de una fuerte tendencia conservadora: la resistencia obtenida a partir de ensayos fue en promedio dos veces la resistencia estimada.

En PSFV San Vicente también se obtuvo una tendencia conservadora, con un promedio de bias de 1,55. No obstante, la dispersión es mayor y se registran casos con bias incluso menores que la unidad. Esto indica que, para algunas ubicaciones, el método sobreestima la resistencia aun cuando la tendencia general fuera conservadora.

6.3 Respuesta para deformación de servicio (25 mm)

En la Tabla 6 se resumen los parámetros estadísticos para las condiciones de servicio:

Conjunto	n	λ_{25}	σ	COV	Mín.	Máx.
Total	35	1,28	0,41	0,32	0,47	2,01
PSFV Victorica	16	1,55	0,2	0,13	1,01	1,81
PSFV San Vicente	19	1,06	0,42	0,39	0,47	2,01

Tabla 6. Media, desvío estándar y COV para carga de servicio.

Para el conjunto completo, la carga obtenida a partir de ensayos in-situ para 25 mm de deflexión resultó, en promedio, un 28% mayor que la carga calculada. Esta media, sin embargo, presenta diferencias al analizar cada sitio por separado.

En PSFV Victorica, el bias medio obtenido fue de 1,55 y un COV de 0,13, siendo todos los valores mayores a 1, mostrando que el modelo también subestimó la carga movilizada para la deflexión de servicio, con una dispersión reducida. En consecuencia, aunque la predicción presentó un bias conservador, su comportamiento presenta mayor estabilidad que en los casos de resistencia última.

En PSFV San Vicente, la media de bias fue de 1,06, hecho que inicialmente pudiera indicar una buena correlación entre valores medidos y estimados. No obstante, el COV obtenido fue de 0,39 con valores mínimos y máximos de bias de 0,47 y 2,01 respectivamente, mostrando una elevada variación entre los resultados y no una correlación uniforme.

En el caso de las cargas de servicio, se puede destacar la diferencia entre los casos PSFV Victorica y PSFV San Vicente. En el primero de ellos el procedimiento presentó una clara tendencia a los valores de bias con dispersiones acotadas, mientras que San Vicente presenta una elevada incertidumbre.

6.4 Influencia del sitio en el desempeño del modelo

En la comparación entre PSFV Victorica y PSFV San Vicente se observa que el desempeño del procedimiento de cálculo depende significativamente del sitio analizado.

En PSFV Victorica el método presentó una tendencia conservadora para la resistencia última y para la respuesta correspondiente al desplazamiento de servicio, acompañada por una dispersión relativamente reducida.

En PSFV San Vicente, por el contrario, la dispersión de los factores de sesgo resultó sensiblemente mayor, particularmente para la condición de servicio donde a pesar de que la media de los bias fuera próxima a la unidad, la coexistencia de sobreestimaciones y subestimaciones evidencia una menor estabilidad del procedimiento predictivo.

Estos resultados indican que la capacidad predictiva del modelo no permanece

constante frente a diferentes condiciones geotécnicas y que la incertidumbre asociada a las predicciones depende de las características del terreno representado.

Las diferencias observadas no permiten identificar cuál es el origen específico de dicha incertidumbre, ya que ésta puede provenir tanto de las simplificaciones propias del método de Broms como de la representatividad de los parámetros geotécnicos empleados para caracterizar el suelo, que naturalmente presenta variabilidad espacial. Este aspecto es de relevancia, especialmente al considerar las grandes extensiones superficiales que ocupan proyectos de este tipo, donde habitualmente tanto la cantidad de ensayos de carga in-situ como la densidad de prospecciones geotécnicas son limitadas, incrementando la incertidumbre en cuanto a la representatividad de los valores obtenidos.

7. DISCUSIÓN

Los resultados muestran que el procedimiento adoptado presenta, en promedio, una tendencia conservadora para la estimación de la resistencia última, aunque con importantes diferencias entre los dos sitios analizados. En PSFV Victorica, se observa un comportamiento más uniforme, tanto para escenarios de resistencia última como condiciones de servicio. Por otro lado, en PSFV San Vicente se observaron mayores dispersiones, especialmente para las cargas de servicio.

Esta diferencia confirma que la evaluación de los procedimientos no puede basarse únicamente en la evaluación de los bias medios, debiendo evaluar su dispersión para evitar la coexistencia de escenarios de sobreestimación y subestimación.

El desempeño obtenido debe interpretarse no sólo como la aptitud del método de predicción, sino como un conjunto de factores intervinientes:

- Método de predicción.
- Caracterización del perfil geotécnico y parámetros empleados.
- Heterogeneidad del medio (variabilidad espacial).
- Condiciones propias de ejecución de los ensayos (hinca de perfil).

Con la información disponible para los casos analizados, no es factible atribuir a uno u otro factores una mayor importancia.

En este contexto, el procedimiento analítico empleado resulta útil para el pre dimensionado y evaluaciones preliminares (ej. cómputo de perfiles), pero no reemplaza la verificación por medio de ensayos in-situ. Los ensayos de carga lateral permiten contrastar la respuesta del sistema suelo-estructura y evaluar si las hipótesis adoptadas en la estimación tienden a ofrecer resultados conservadores o presentar dispersiones incompatibles con los niveles de confiabilidad requeridos.

8. CONSIDERACIONES FINALES

En primer lugar, resulta necesario ampliar la base de datos incorporando ensayos correspondientes a otros tipos de suelo existentes en nuestro país, secciones de perfil y longitudes de hincado. Con el fin de evaluar si las tendencias identificadas se mantienen en distintas condiciones geotécnicas.

En segundo lugar, resulta de interés analizar la sensibilidad de los parámetros geotécnicos que controlan la resistencia y la rigidez lateral y a su vez, los métodos a partir de los cuales dichos valores son estimados. La variación de los parámetros resistentes ($\phi - c, s_u$) o de deformación (n_h y K) permitirían evaluar la influencia en la

obtención de resistencias últimas y respuestas en servicio.

En este sentido, resulta conveniente que los parámetros geotécnicos principales sean obtenidos, siempre que sea posible, mediante ensayos específicos de campo o laboratorio, utilizando las correlaciones basadas en NSPT como herramientas complementarias de interpretación y control. El uso excesivo de correlaciones indirectas, especialmente cuando se encadenan múltiples relaciones empíricas sin ensayos que brinden sustento independiente, puede introducir incertidumbres significativas en la estimación de los parámetros resistentes y deformacionales.

A su vez, es sumamente necesario optimizar y estandarizar la ejecución de campañas geotécnicas en proyectos de gran envergadura como lo son los PSFV, para lo cual se recomienda seguir lo expuesto por EC7 última generación.

En tercer lugar, se podrán evaluar otros procedimientos existentes para la estimación del comportamiento de perfiles hincados sometidos a cargas laterales, por ejemplo, a partir del empleo de curvas p-y.

Finalmente, en base a estos pasos, los bias de resistencia obtenidos podrán emplearse como insumo para la calibración probabilística de factores de minoración de resistencia, en continuidad con el enfoque propuesto por Amar et al (2021). Este desarrollo permitiría pasar de una evaluación comparativa del desempeño predictivo hacia una formulación que permita establecer criterios de confiabilidad para el diseño de perfiles hincados sometidos a cargas laterales en la ejecución de parques solares fotovoltaicos.

9. AGRADECIMIENTOS

Los autores del trabajo agradecen a las empresas GEOCLUSTER, AOSA SA, e INGALFA por habernos brindado parte de la información presentada en este documento.

10. BIBLIOGRAFÍA

Amar, B., Covassi, P. A. y Zeballos, M. E. (2021). "Tratamiento de base de datos para la calibración de factores de reducción de resistencia para pilotes hincados en arcillas". XXV Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica, Misiones, Argentina.

Bolatti, A., Covassi, P.A. y Codevilla M. (2025). "Consideraciones generales para la planificación y ejecución de campañas geotécnicas en parques solares de la República Argentina" XXVII Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica, Chaco, Argentina.

Broms, B. B. (1964). "Lateral resistance of piles in cohesive soils". Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 90(SM2), 27–63.

Broms, B. B. (1964). "Lateral resistance of piles in cohesionless soils". Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 90(SM3), 123–156.

Duncan, J. M. y Chang, C. Y. (1970). "Nonlinear analysis of stress and strain in soils". Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 96(SM5), 1629–1653.

Paikowsky (2004), "Load and Resistance Factor Design (LRFD) for Deep Foundations".