



Contenido

- Estados límites últimos
- Fórmula de hincada dinámica
- **Ensayos dinámicos de campo**
- Modelación



Propagación de ondas en pilotes

La propagación de ondas en pilotes se puede originar bajo las siguientes situaciones:

- Hincas dinámicas de pilotes
- Ensayos dinámicos de carga
- Ensayos no destructivos
- Fundaciones de máquinas
- Fundaciones de un puente ferroviario

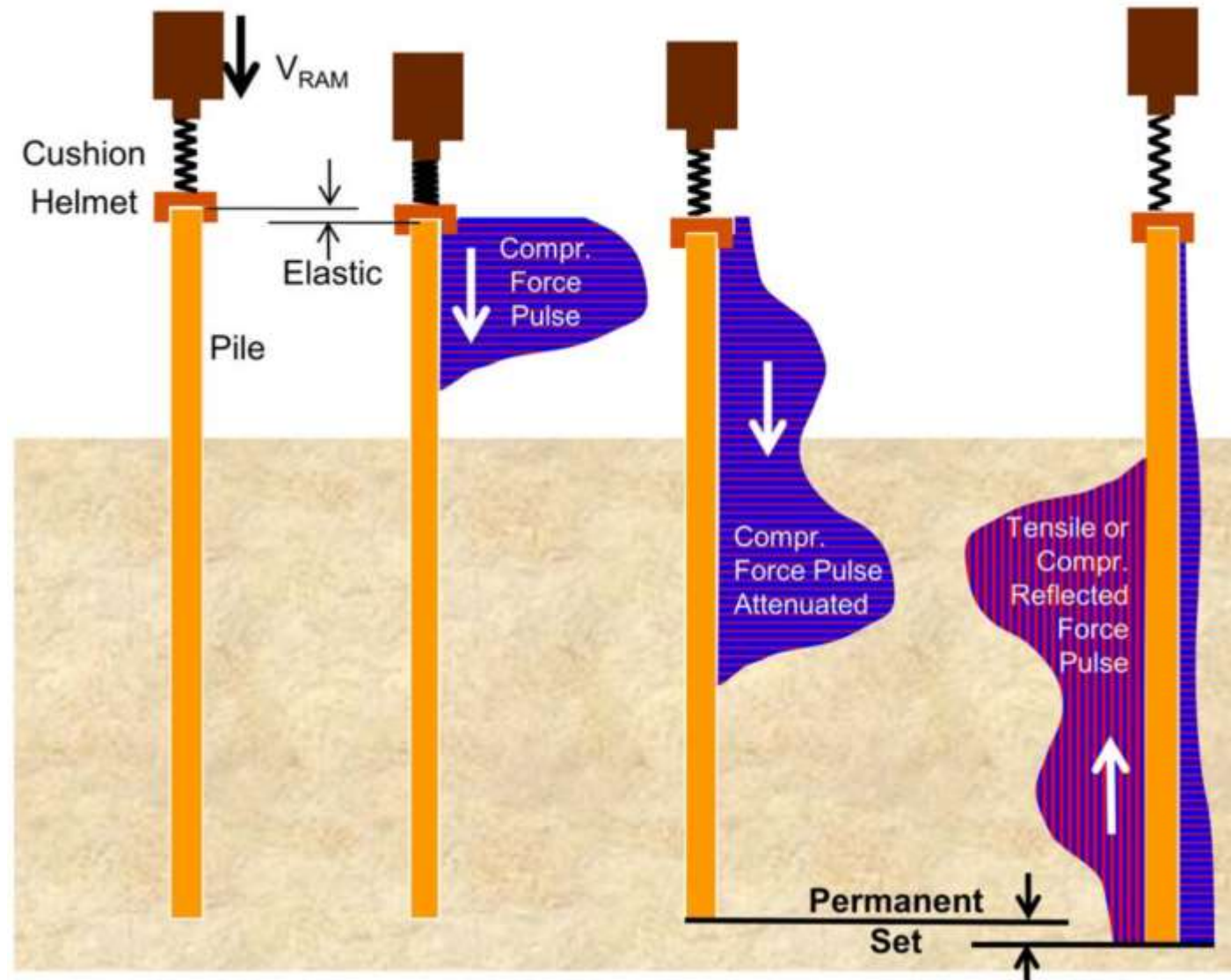
Los casos que se representan corresponden a vibraciones que se propagan en la dirección principal del elemento en análisis

Hinca dinámica





Esquema de hinca dinámica

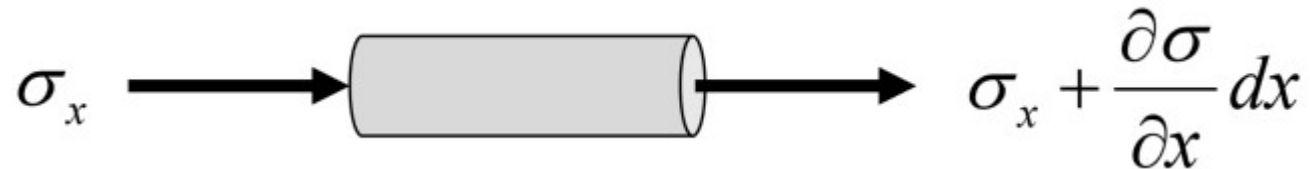


(Cheney y Chassie, 2000)



Propagación de ondas 1D

La ecuación de movimiento unidimensional gobierna el comportamiento en el elemento analizado



$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$

$$u(z, t) = f(c t - z) + g(c t + z)$$

$$u(z, t) = A e^{i(\omega t + k z)} + B e^{i(\omega t - k z)} \quad T = \frac{2\pi}{\omega} \quad \lambda = \frac{2\pi}{k}$$



Condiciones de contorno

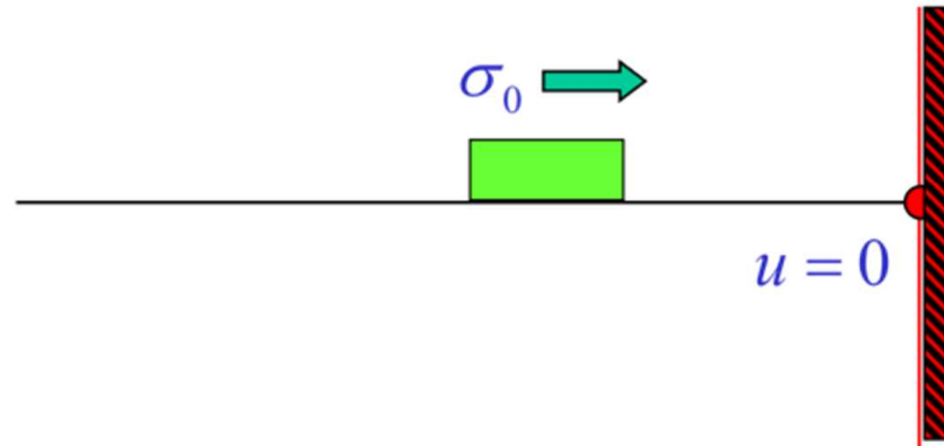
Extremo fijo





Condiciones de contorno

Extremo fijo





Condiciones de contorno

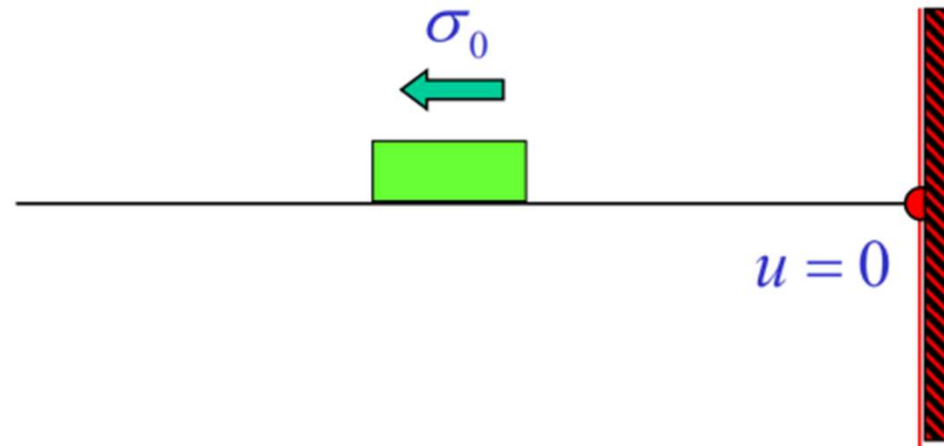
Extremo fijo





Condiciones de contorno

Extremo fijo



La tensión se duplica mientras dura el pulso en ese extremo y la tensión reflejada mantiene el signo de la incidente



Condiciones de contorno

Extremo libre



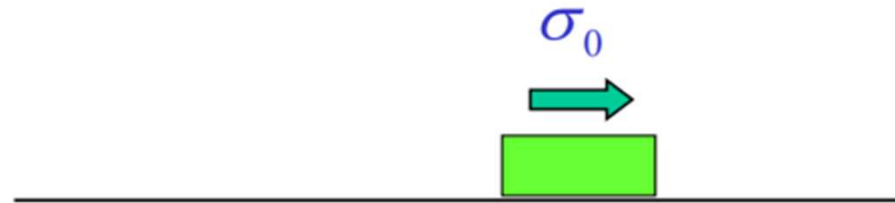
$$\sigma = 0$$

$$u = 0$$



Condiciones de contorno

Extremo libre



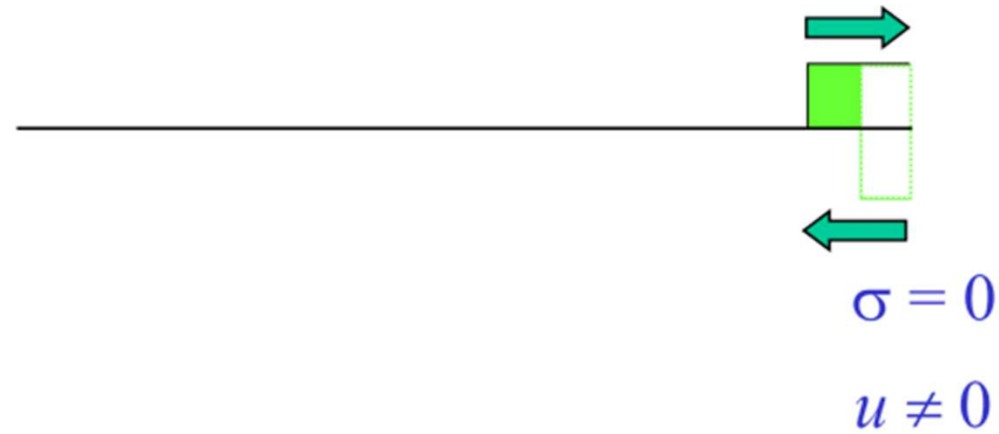
$$\sigma = 0$$

$$u = 0$$



Condiciones de contorno

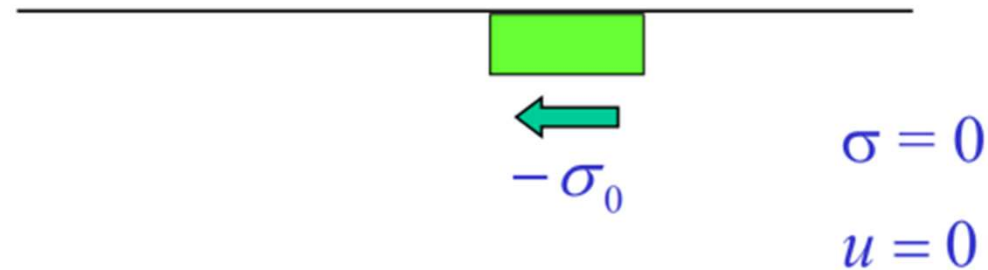
Extremo libre





Condiciones de contorno

Extremo libre

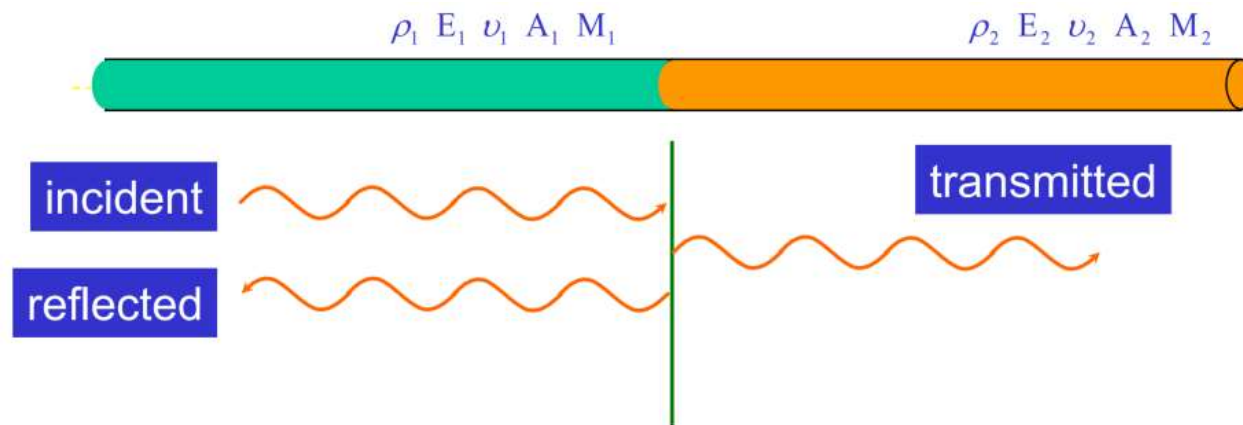


La tensión se anula mientras dura el pulso en ese extremo y la tensión reflejada cambia el signo de la incidente



Condiciones de contorno

Extremos materiales: al pasar de un material a otro la onda incidente se descompone en una transmitida y una reflejada



$$\alpha_z = \frac{\rho_2 c_2}{\rho_1 c_1}$$

En el borde se deben cumplir continuidad y equilibrio:

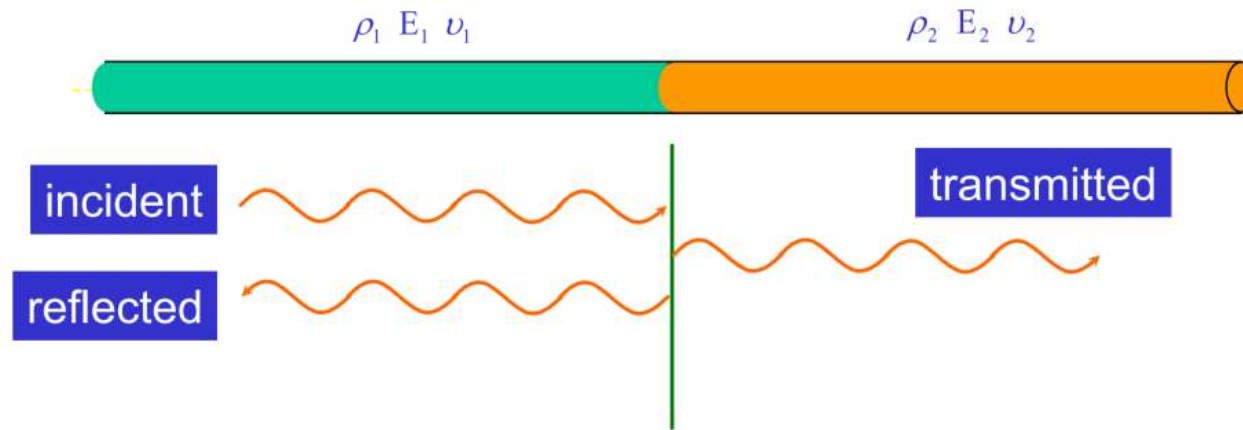
$$u_1(0, t) = u_2(0, t)$$

$$\sigma_1(0, t) = \sigma_2(0, t)$$



Condiciones de contorno

Extremos materiales: al pasar de un material a otro la onda incidente se descompone en una transmitida y una reflejada



$$\alpha_z = \frac{\rho_2 c_2}{\rho_1 c_1}$$

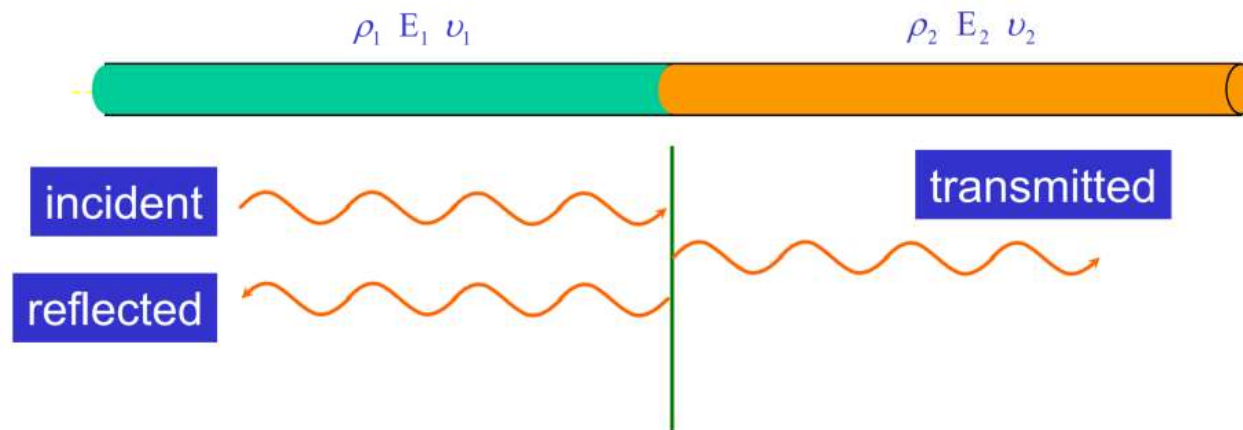
En el borde se deben cumplir continuidad y equilibrio:

$$\begin{aligned} u_1(0, t) &= u_2(0, t) & A_2 &= \frac{1 - \alpha_z}{1 + \alpha_z} A_1 & \sigma_{A2} &= \frac{2\alpha_z}{1 + \alpha_z} \sigma_{A1} \\ \sigma_1(0, t) &= \sigma_2(0, t) & B_1 &= \frac{2}{1 + \alpha_z} A_1 & \sigma_{B1} &= \frac{\alpha_z - 1}{1 + \alpha_z} \sigma_{A1} \end{aligned}$$



Condiciones de contorno

Extremos materiales: al pasar de un material a otro la onda incidente se descompone en una transmitida y una reflejada



$$\alpha_z = \frac{\rho_2 c_2}{\rho_1 c_1}$$

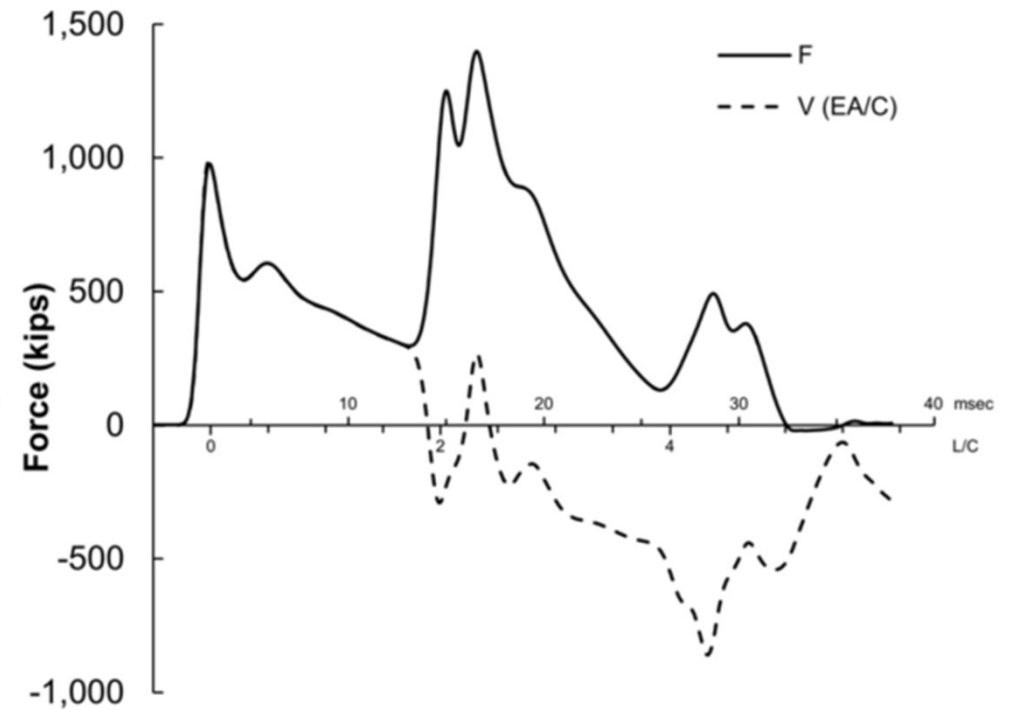
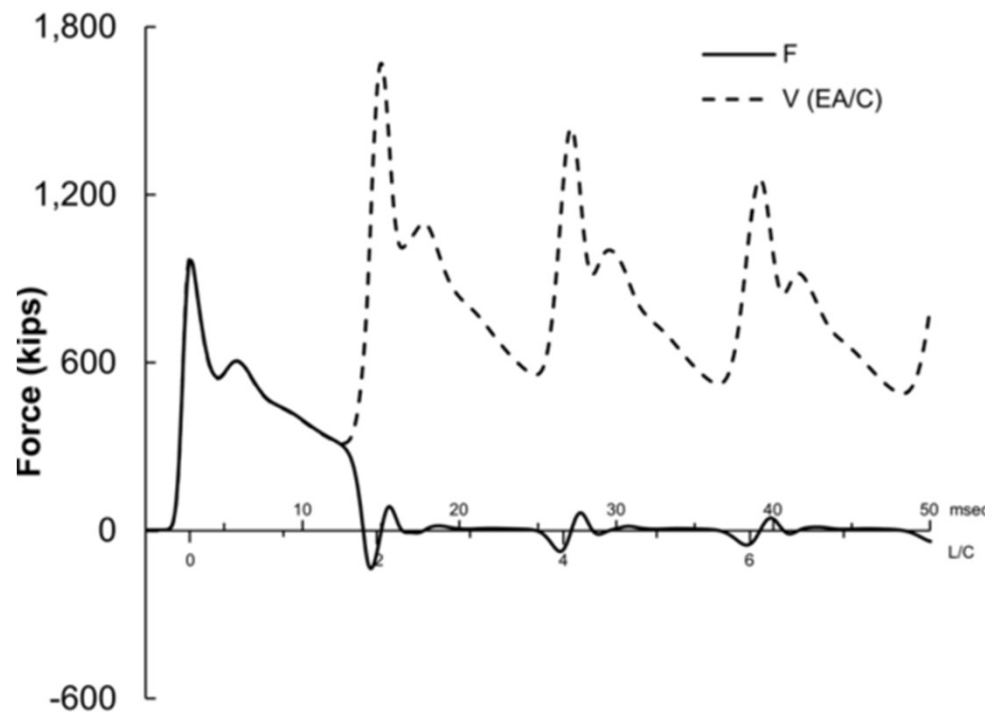
α_z	Desplazamiento			Tensión		
	A1	B1	A2	A1	B1	A2
0	1.00	1.00	2.00	1.00	-1.00	0.00
1/2	1.00	0.33	1.33	1.00	-0.33	0.67
1	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00	1.00
2	1.00	-0.33	0.67	1.00	0.33	1.33
∞	1.00	-1.00	0.00	1.00	1.00	2.00



Condiciones de contorno en la hinca

Extremo libre

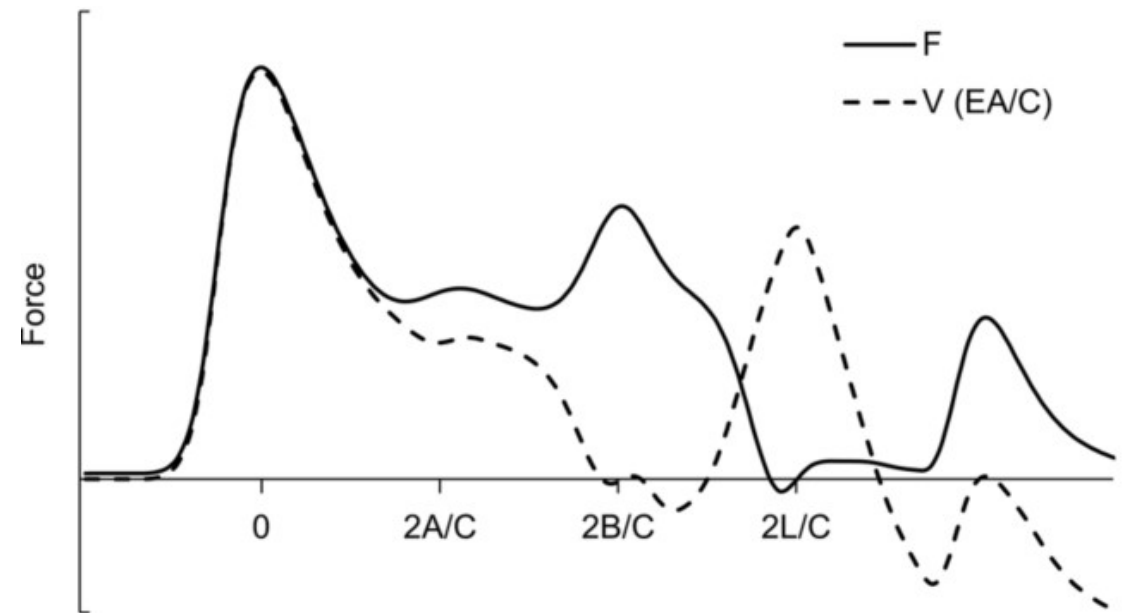
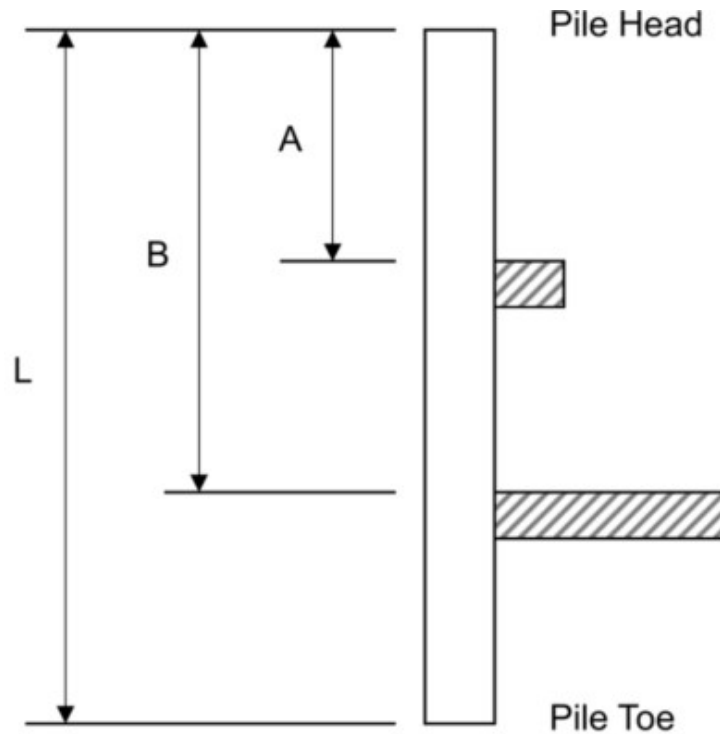
Extremo fijo





Condiciones de contorno en la hinca

Resistencias en cotas A, B y extremo libre

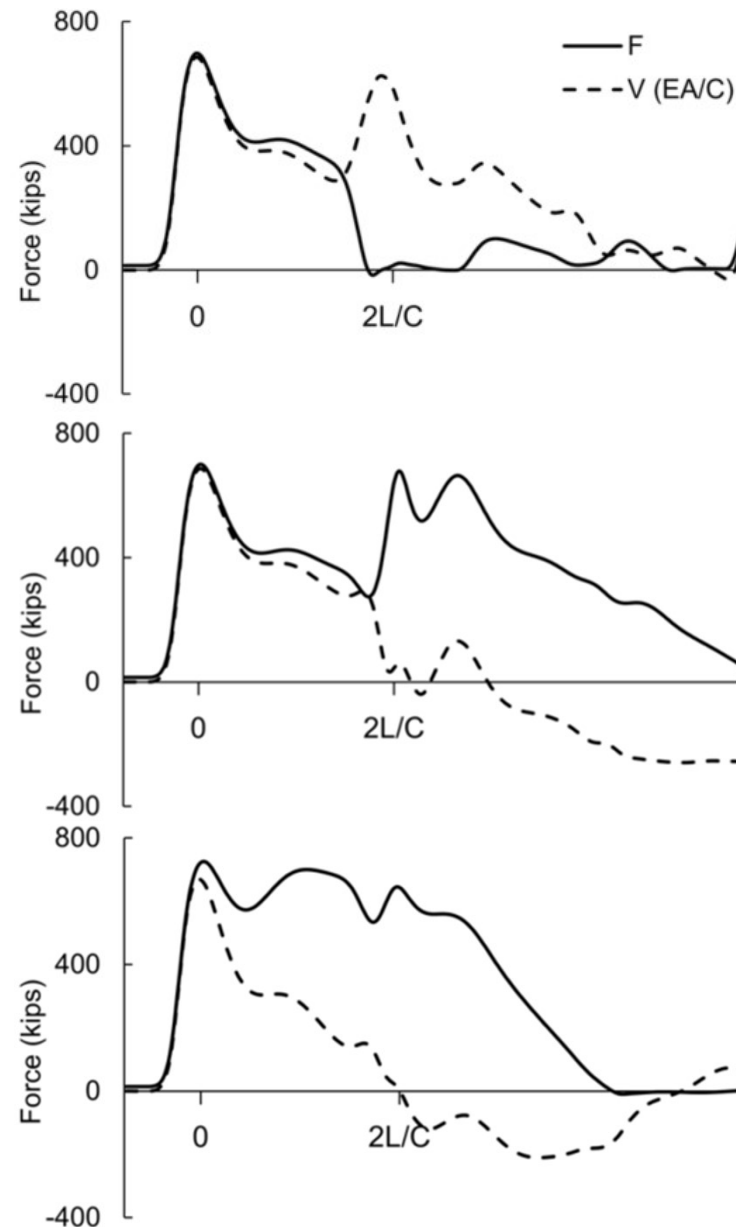


Hannigan (1990)



Condiciones de contorno en la hinca

Registros
típicos para
distintas
condiciones
de resistencia

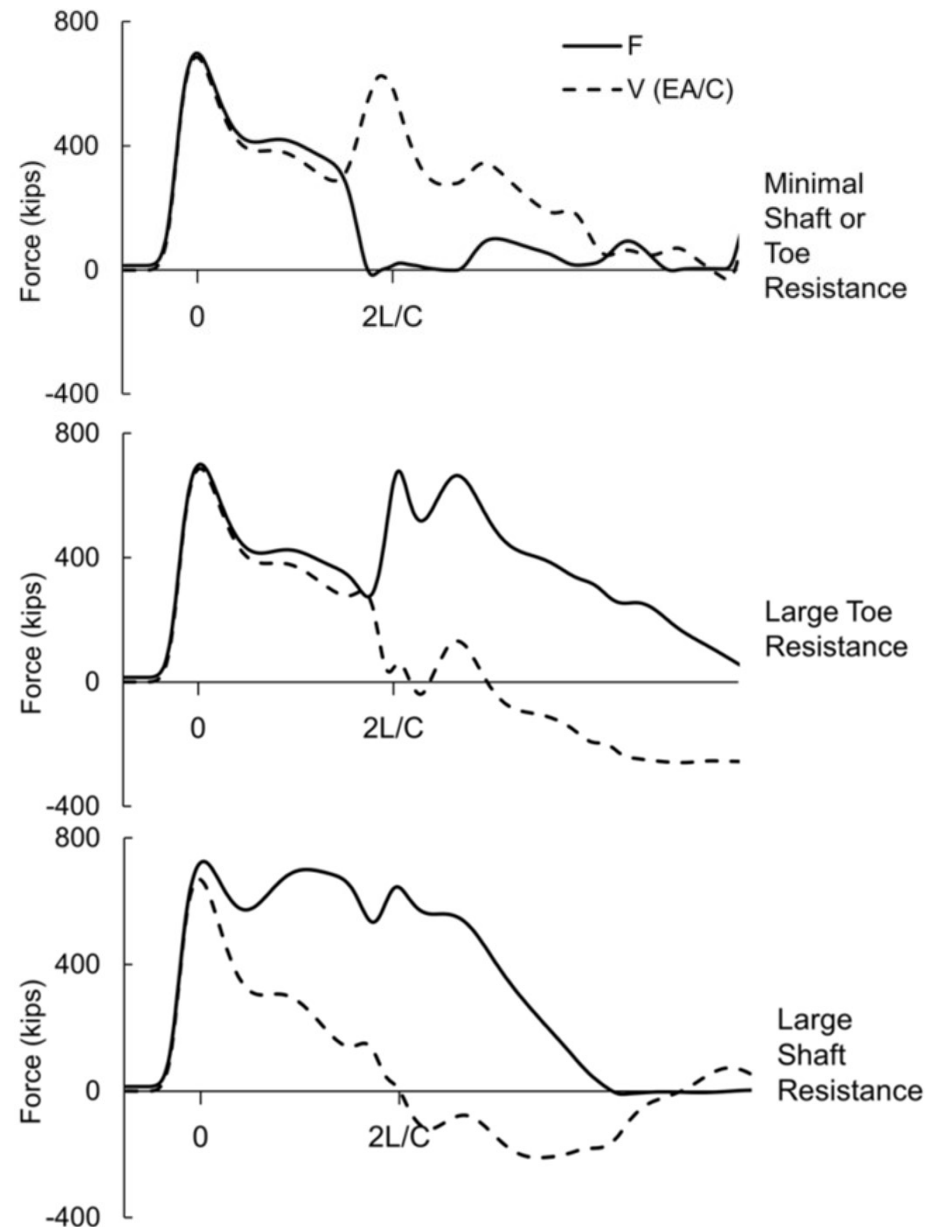


Hannigan (1990)



Condiciones de contorno en la hinca

Registros típicos para distintas condiciones de resistencia



Hannigan (1990)



Requisitos del proyecto

Sobre los resultados del análisis de ondas en pilotes se debe analizar la factibilidad del hincado de manera de mantener la capacidad proyectada. Las variables a considerar son:

- Material del pilote: E y V_p
- Longitud L y sección A
- Características del suelo
- Metodología de hinca: características del martillo

Un parámetro fundamental en el análisis es la impedancia del pilote: $E A / V_p$



Tensiones admisibles

Frente a la hincia los reglamentos permiten tensiones mayores a las estáticas

Material	Compresión	Tracción
Acero		$0.9f_y$
Hormigón armado	$0.85 f'_c$	$0.70 f_y$
Hormigón Pretensado	$0.85 f'_c - f_{pe}$	$0.095 \sqrt{f'_c} + f_{pe}$

(FHWA-NHI-16-009; AASHTO, 2012)



Definición de la capacidad portante

Los tipos de ensayos asociados al proyecto y el control de la construcción son:

- Análisis de la ecuación de ondas: WEA
- Monitoreo dinámico de la hinca
 - Soluciones de campo: Case method
 - *Signal matching*: CAPWAP, iCAP, TNOWAVE, All-Wave DLT
- Ensayos de carga estática

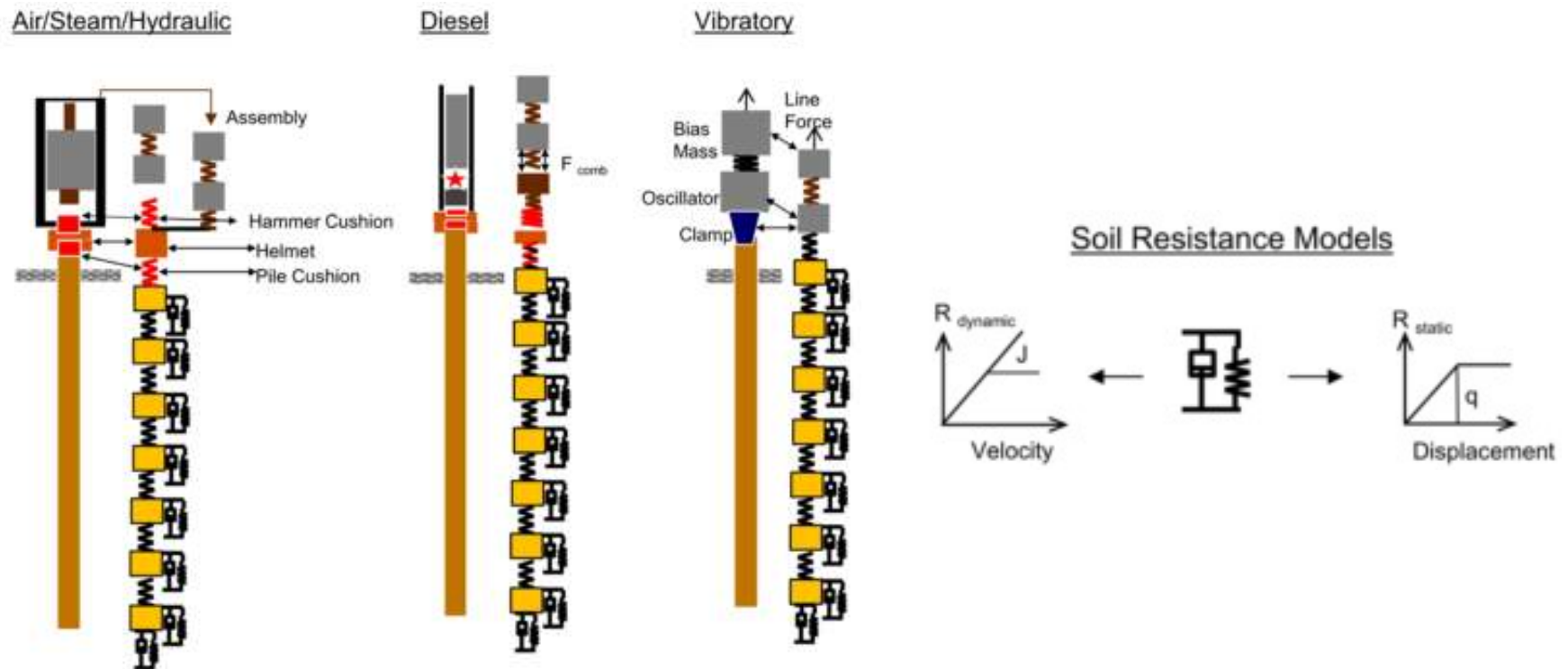
La práctica de los dos primeros permite disminuir la cantidad de ensayos de carga estática a realizar.

Un plan de ensayos adecuado permite aumentar la capacidad admisible al aumentar el factor de resistencia.



Wave Equation Analysis

Este análisis involucra el suelo, el pilote, el martillo y todos los elementos que intervienen en la transferencia de energía del martillo al suelo. Se puede llevar a cabo en el diseño del proyecto y durante la construcción para su ajuste. Ejemplo de programa: GRLWEAP



GRLWEAP - Entrada



Pilotes-bypass

Hammer Information
Select from following list [4/12/2018-2003]: ID: **20**

ID	Name	Type	Ram Wt/Ecc. M.	Energy/Power
19	DELMAG D 36-23	OED	35.288	120.036
20	DELMAG D 36-32	OED	35.288	122.833
21	DELMAG D 44	OED	42.275	122.283

Hammer parameters
Efficiency **0.8**
Pressure **10031** kPa Fixed **97** %
Stroke **3.48** m Variable

Pile material
☒ Concrete ☐ Steel ☐ Timber

Cushion Information

	Hammer	Pile	
Area	0.	2900.	cm ²
Elastic Modulus	0.	210.	MPa
Thickness	0.	80.	mm
C.O.R.	0.	0.8	
Stiffness	1933.	644.	kN/mm
Helmet Weight	9.8		kN

Pile Information

Length	24.	m	30	Segments
Penetration	19.	m	Auto.	S-Length
Section Area	2120.57	cm ²	Auto.	S-St. Wt
Elast Modulus	34500.	MPa	0	Splices
Spec Weight	24.0	kN/m ³		
Toe Area	2120.57	cm ²		Pile Type:
Perimeter	1.88	m		Unknown
Pile Size	600.	mm		

Ultimate Capacities (up to 10)
kN

1	2600.0	6	5600.0
2	3200.0	7	6200.0
3	3800.0	8	6800.0
4	4400.0	9	7400.0
5	5000.0	10	8000.0

Incr. **0** Action >>

Soil Parameters

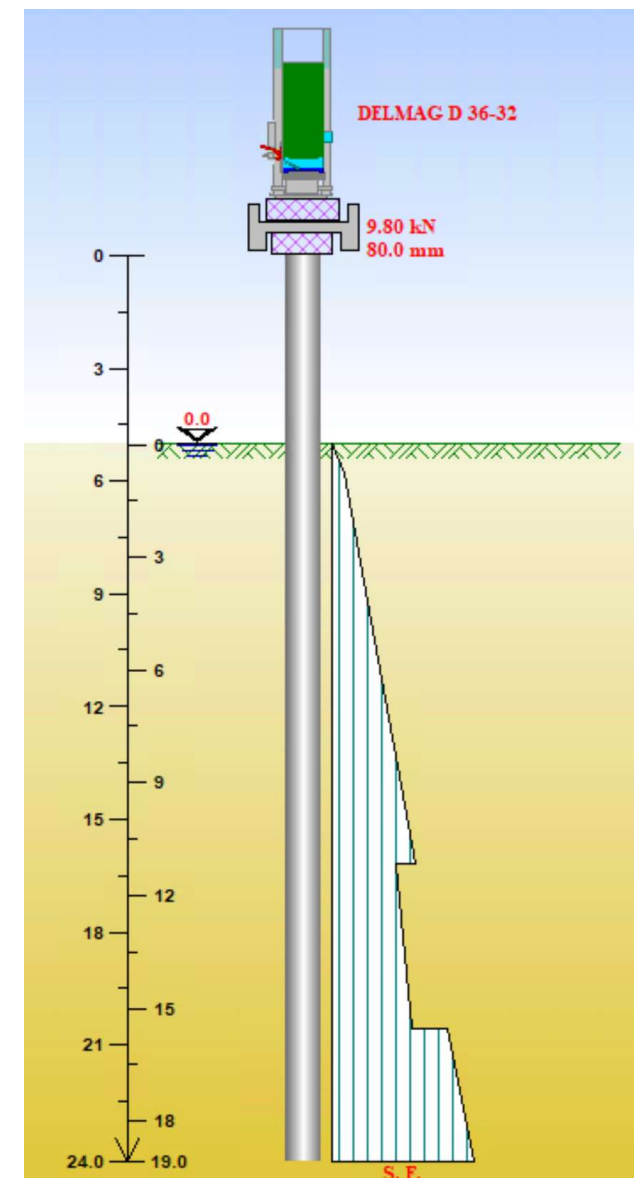
2nd Toe - No

Quake
Shaft **2.5** mm Const
Toe **2.5** mm

Damping
Shaft **0.5** s/m Var.
Toe **0.5** s/m Smith

Shaft Resistance
Percentage **47** %
Dist. Shape Num **0.0**

Residual Stress Analysis: **No**

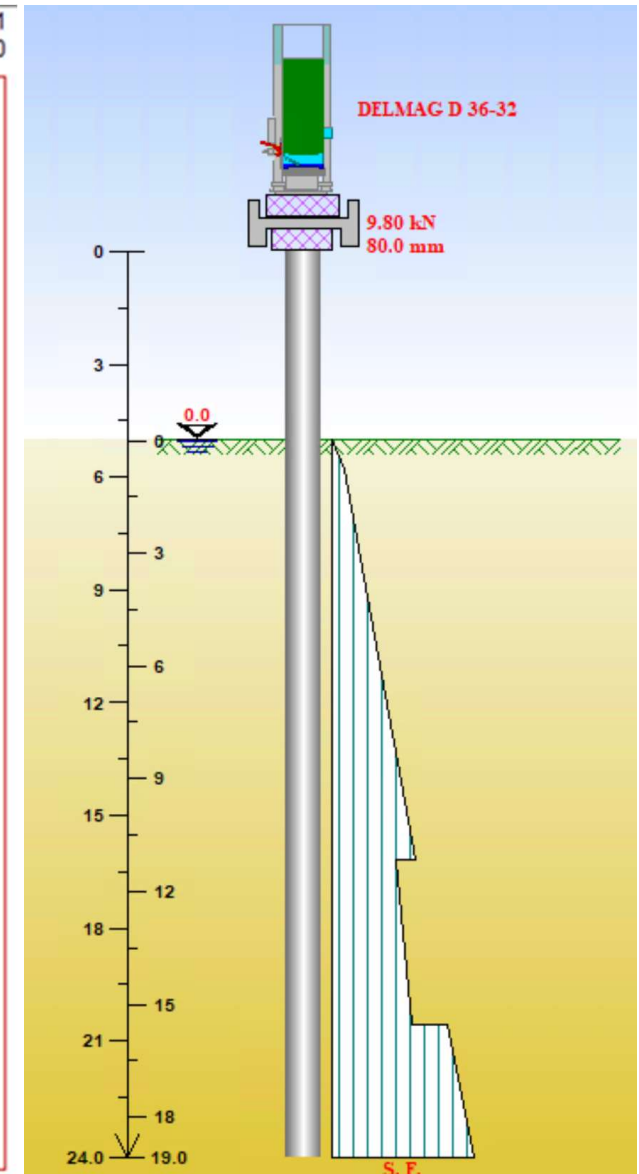
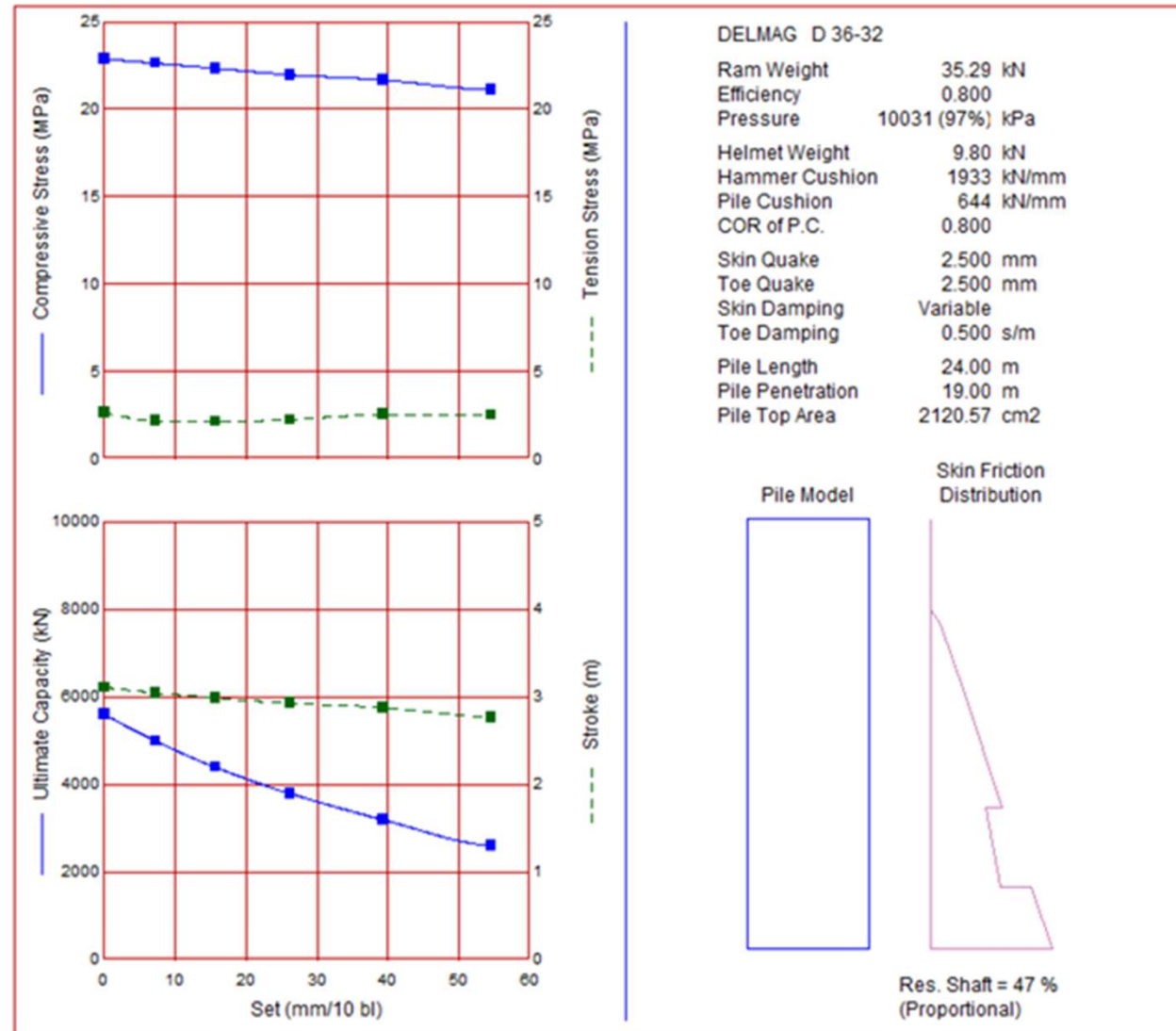


GRLWEAP - Salida



SRK Consulting ARG
Pilotes-bypass

09-Apr-2021
GRLWEAP Version 2010





CASE Method

Investigaciones de la Universidad Case Western Reserve (Cleveland, OH) derivaron en un método para predecir la resistencia nominal. Para un pilote elástico lineal de sección constante, la resistencia estática y dinámica total durante la hinca (RTL) es:

$$RTL = \frac{1}{2} [F(t_1) + F(t_2)] + \frac{1}{2} [V(t_1) - V(t_2)] \frac{EA}{V_p}$$

donde $F(t)$ y $V(t)$ corresponden a la fuerza y velocidad medida en el ensayo en t_1 (instante del primer pico) y $t_2 = t_1 + 2L/V_p$ (reflejo de la punta del primer pico)

La resistencia nominal (RSP) es:

$$RSP = RTL - J \left[V(t_1) \frac{EA}{V_p} + F(t_1) - RTL \right]$$



CASE Method

Para definir la carga es necesario estimar el factor de amortiguamiento J del suelo cerca de la punta.

Los siguientes valores tienen una dispersión del 20% de la carga de un ensayo estático

Soil Type at Pile Toe	Original Case Damping Correlation Range Goble et al. (1975)	Recommended Range in Case Damping Constant for RSP Equation Pile Dynamics (2015)	Recommended Range in Case Damping Constant for RMX Equation Pile Dynamics (2015)
Clean Sands	0.05 to 0.20	0.10 to 0.15	0.40 to 0.50
Silty Sands	0.15 to 0.30	0.15 to 0.25	0.50 to 0.70
Silts	0.20 to 0.45	0.25 to 0.40	0.60 to 0.80
Silty Clays	0.40 to 0.70	0.40 to 0.70	0.70 to 0.90
Clay	0.60 to 1.10	0.70 or higher	0.90 or higher



CASE Method

El método standard RSP se utiliza para pilotes con resistencias de fuste importantes.

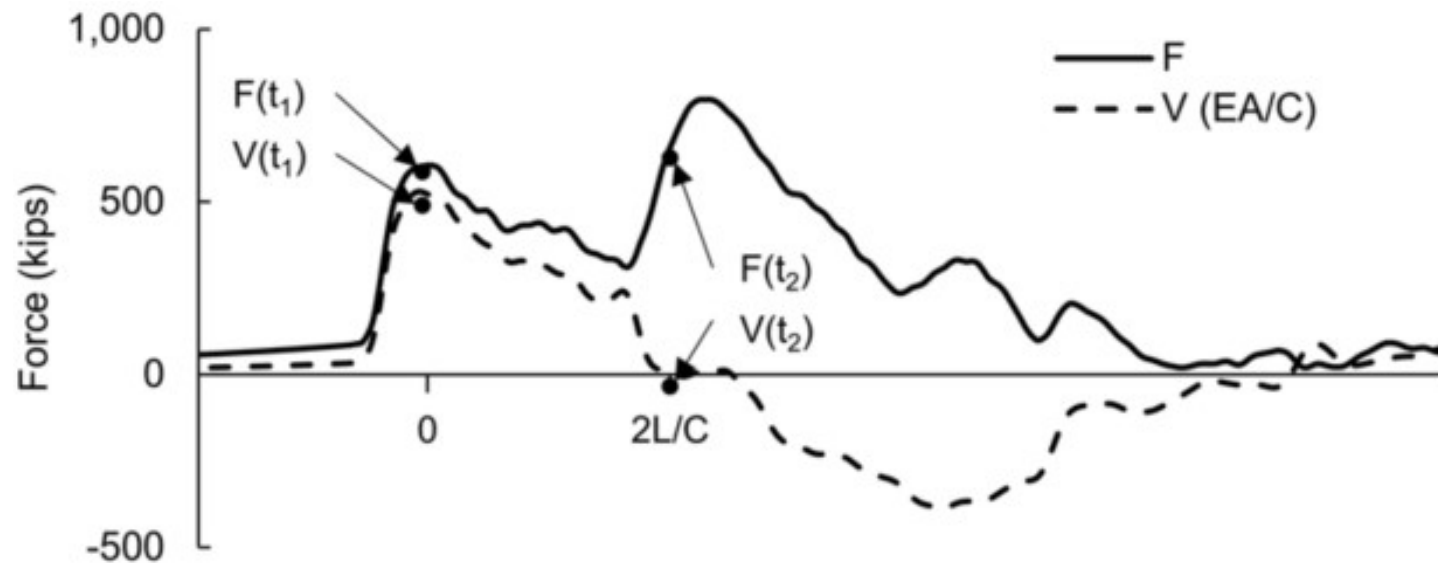
Para pilotes con resistencia importante en punta se utiliza el método RMX: se desplaza el tiempo t_1 hasta alcanzar la resistencia máxima. El factor de amortiguamiento se considera más alto para el mismo tipo de suelo.

Otros métodos adicionales del mismo grupo son RAU y RA2 según la relación de resistencia entre fuste y punta.

Estos valores son orientativos. AASHTO (2014) requiere un ajuste de la señal registrada en el ensayo dinámico.



CASE Method



TOTAL RESISTANCE

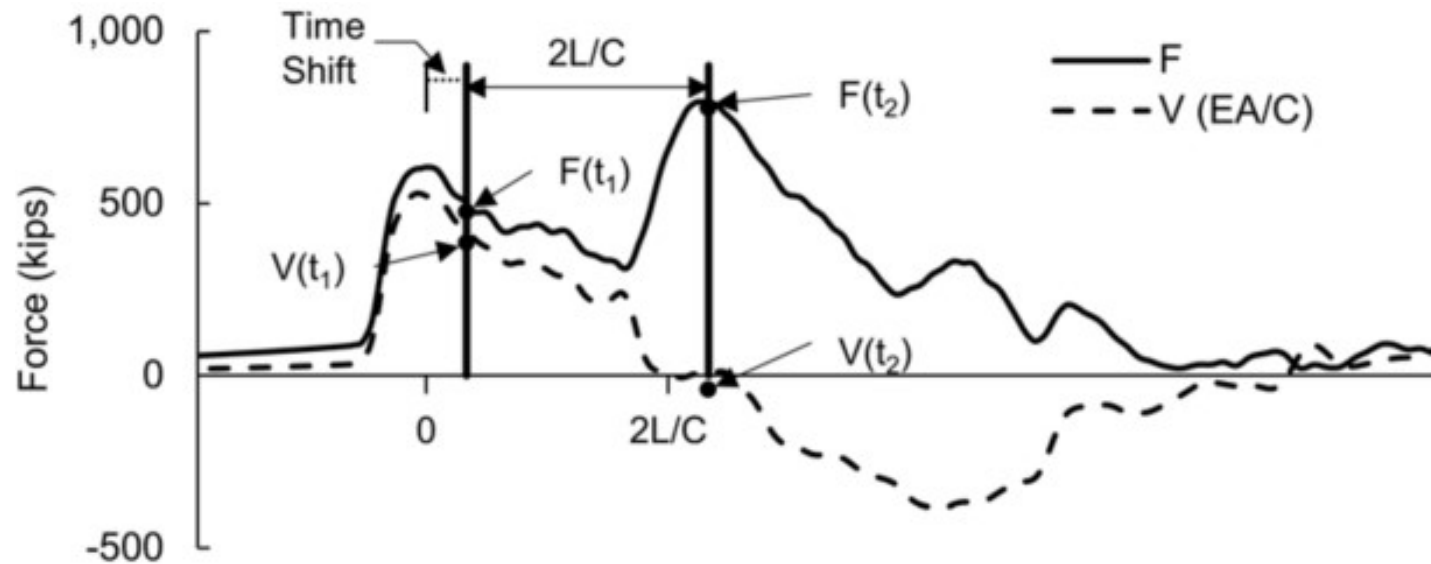
$$\begin{aligned}
 \text{RTL} &= \frac{1}{2} [F(t_1) + F(t_2)] + \frac{1}{2} [V(t_1) - V(t_2)] (EA/C) \\
 &= \frac{1}{2} [599 + 587] + \frac{1}{2} [13.6 - 0.3] 38.9 \\
 &= 593 + 259 = 852 \text{ kips}
 \end{aligned}$$

STATIC RESISTANCE

$$\begin{aligned}
 \text{RSP} &= \text{RTL} - J [V(t_1) * (EA/C) + F(t_1) - \text{RTL}] \\
 &= 852 - 0.4 [13.6 * 38.9 + 599 - 852] \\
 &= 852 - 110 = 742 \text{ kips}
 \end{aligned}$$



CASE Method



TOTAL RESISTANCE

$$\begin{aligned}
 \text{RTL} &= \frac{1}{2} [F(t_1) + F(t_2)] + \frac{1}{2} [V(t_1) - V(t_2)] (EA/C) \\
 &= \frac{1}{2} [529 + 795] + \frac{1}{2} [11.7 - 0.1] 38.9 \\
 &= 662 + 226 = 888 \text{ kips}
 \end{aligned}$$

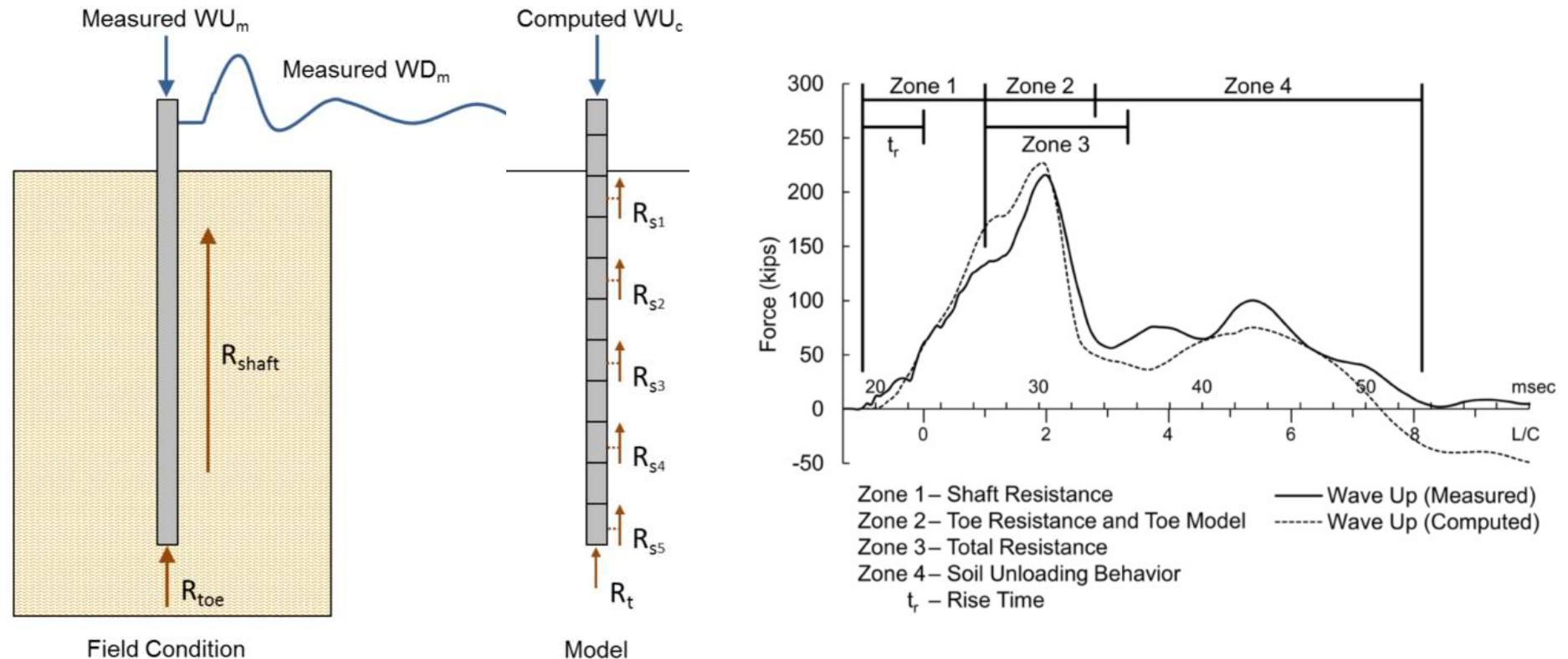
STATIC RESISTANCE

$$\begin{aligned}
 \text{RMX} &= \text{RTL} - J [V(t_1) * (EA/C) + F(t_1) - \text{RTL}] \\
 &= 888 - 0.7 [11.7 * 38.9 + 529 - 888] \\
 &= 888 - 67 = 821 \text{ kips}
 \end{aligned}$$



Signal matching

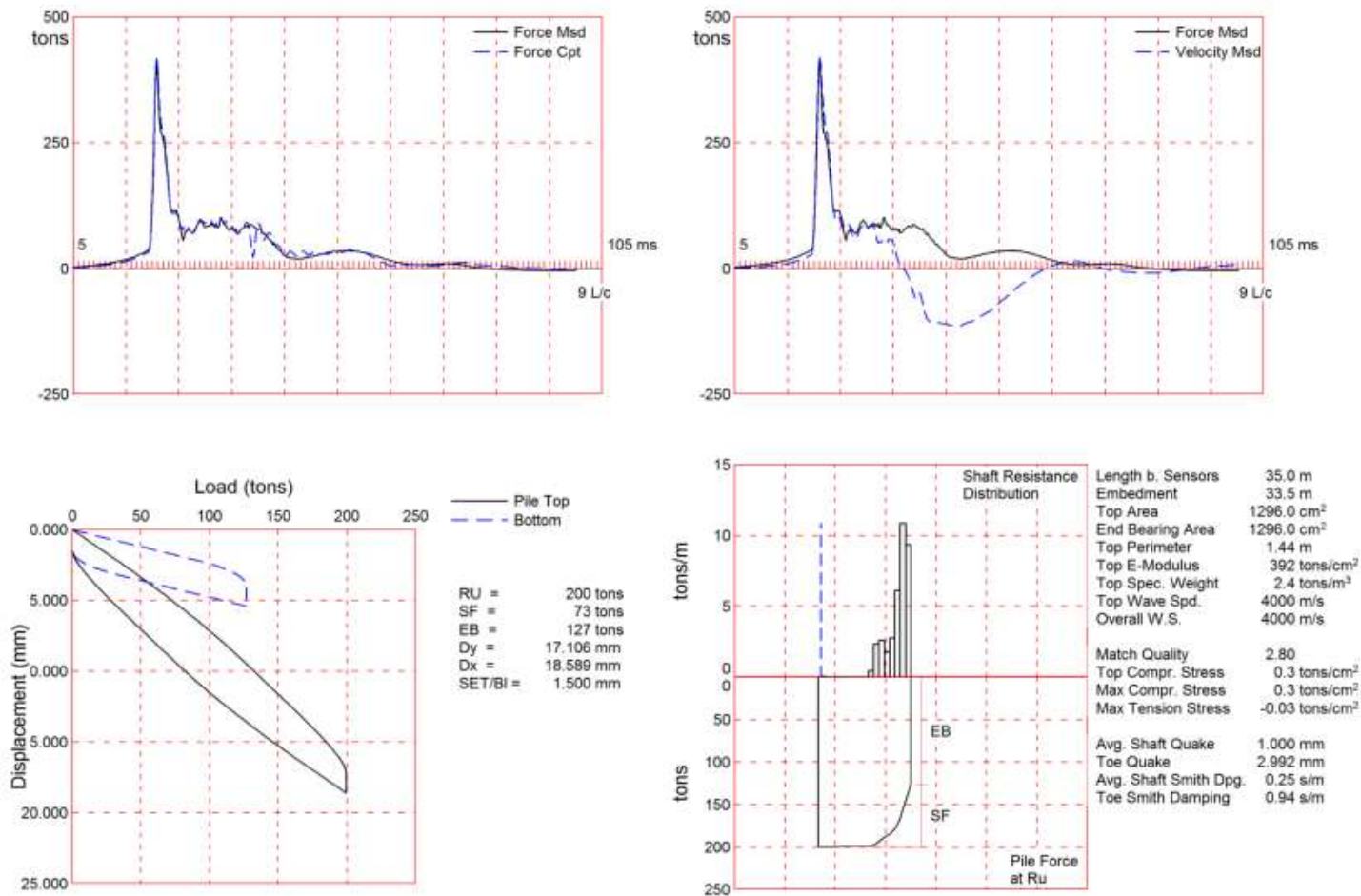
Este método permite una evaluación más rigurosa de la resistencia nominal, la distribución de la resistencia y los parámetros involucrados en fuste y punta.





CAPWAP

Ejemplo de resumen de resultados de la aplicación del método

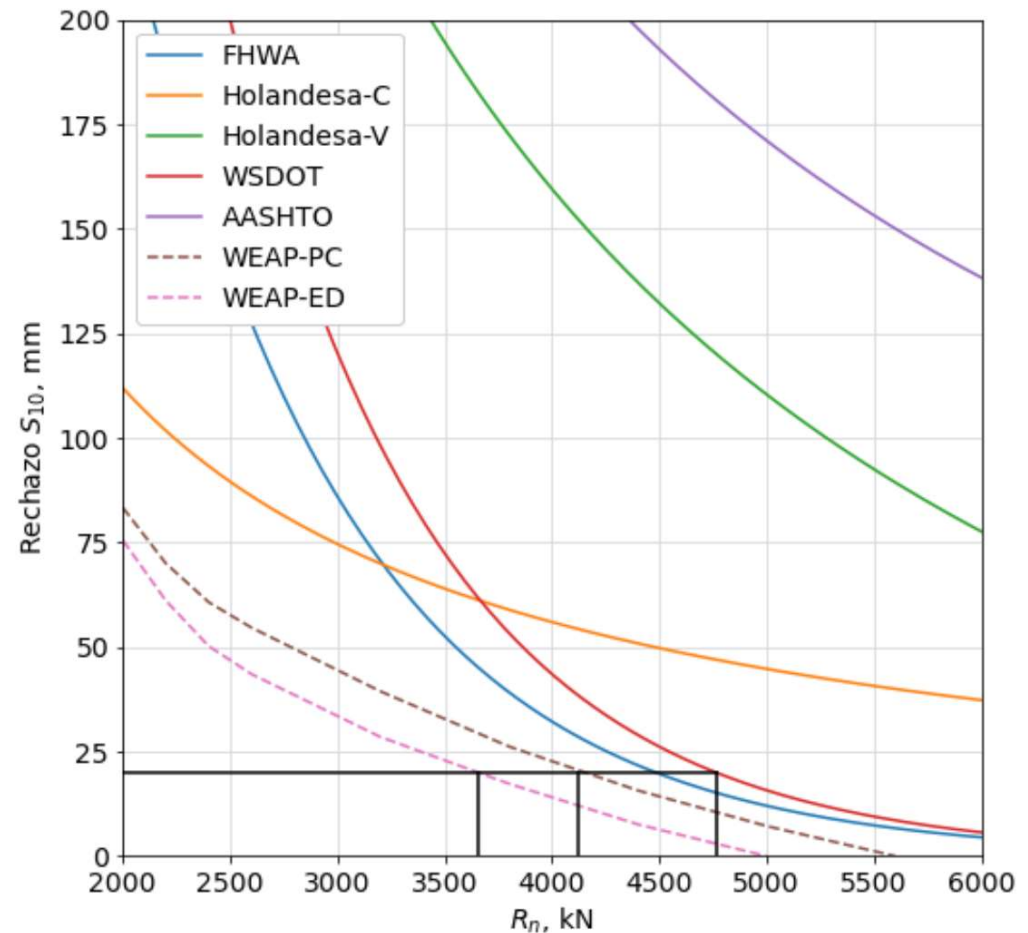




GRLWEAP + Fórmulas de hinca dinámica

Comparamos el asiento vs capacidad de carga con las curvas de las formulas de hinca:

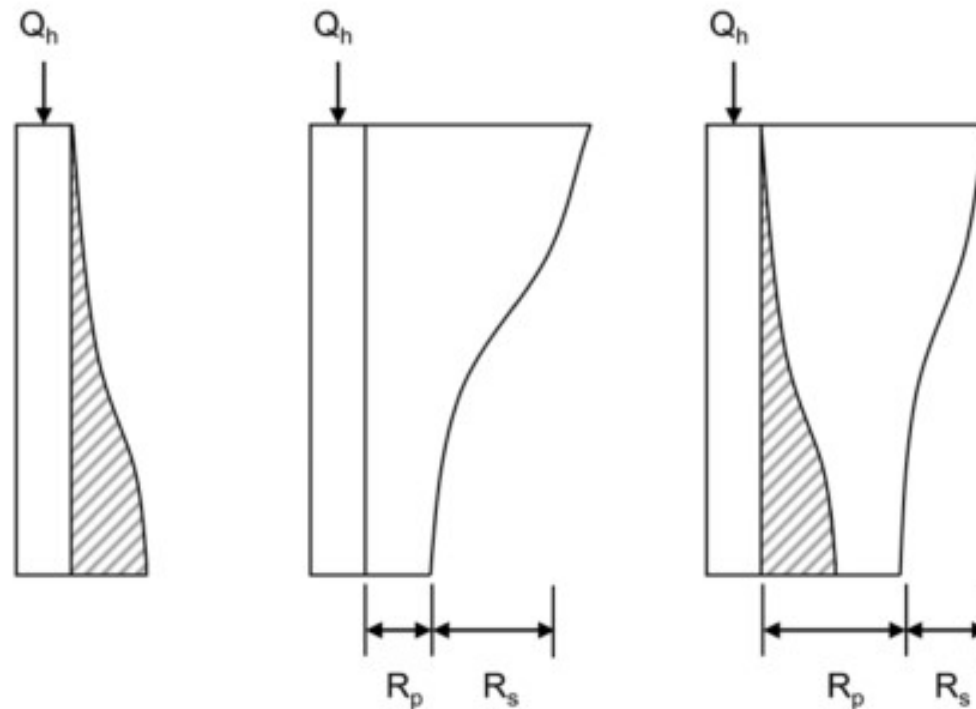
- FHWA: 4483 kN
- H-C: 11185 kN
- H-V: 9258 kN
- WSDOT: 4765 kN
- AASHTO: 21635 kN
- WEAP: 4120 kN
- WEAP-ED: 3650 kN





Consideraciones sobre la capacidad (ELS)

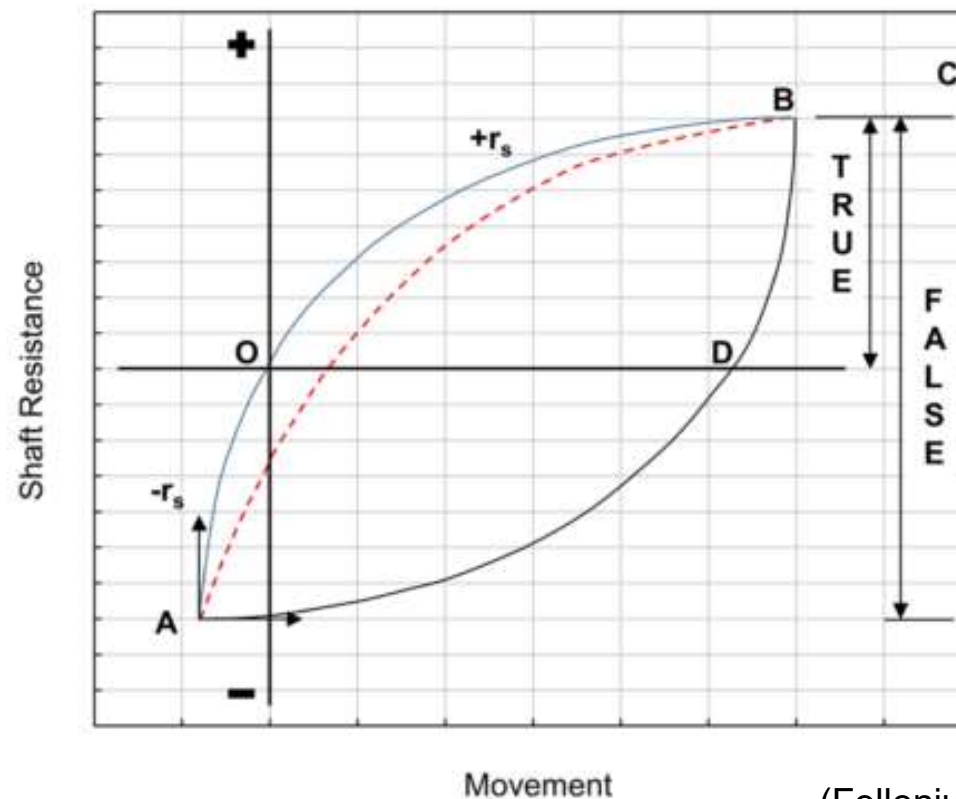
Durante la hincia pueden desarrollarse tensiones residuales en un pilote que no produce un rechazo frente a un golpe. Esto sucede en pilotes flexibles, pilotes con resistencia de fuste elevadas y quake de punta elevados. Si bien no se afecta la resistencia nominal, se alteran las resistencias individuales.





Sobrestimación de la resistencia de fuste

Durante un ensayo la resistencia iría por la rama O-B. Al haber tensiones residuales que recorrieron la rama D-A, la rama aparente pasa a ser A-O-B, siendo esta una resistencia del doble de la real

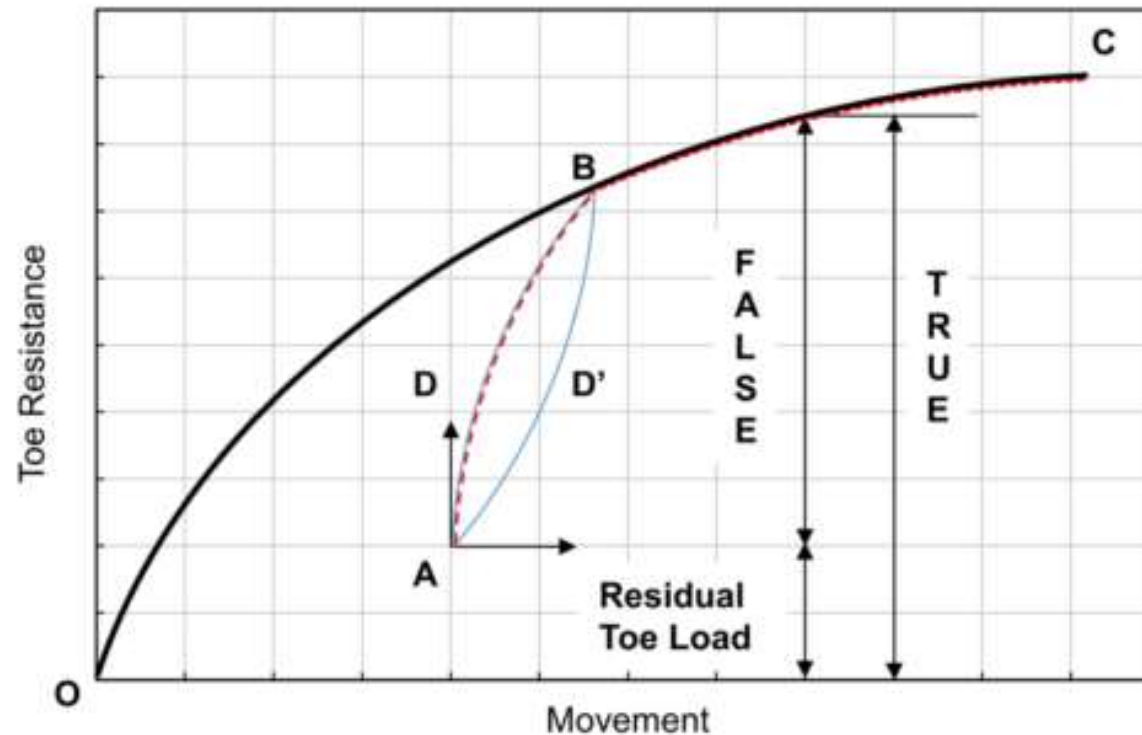


(Fellenius 2014)



Subestimación de la resistencia de punta

Durante un ensayo la resistencia iría por la rama O-B-C. Al haber tensiones la curva es A-D-B-C. Como se desarrolla resistencia previa, la real es mayor que la medida.



(Fellenius 2014)

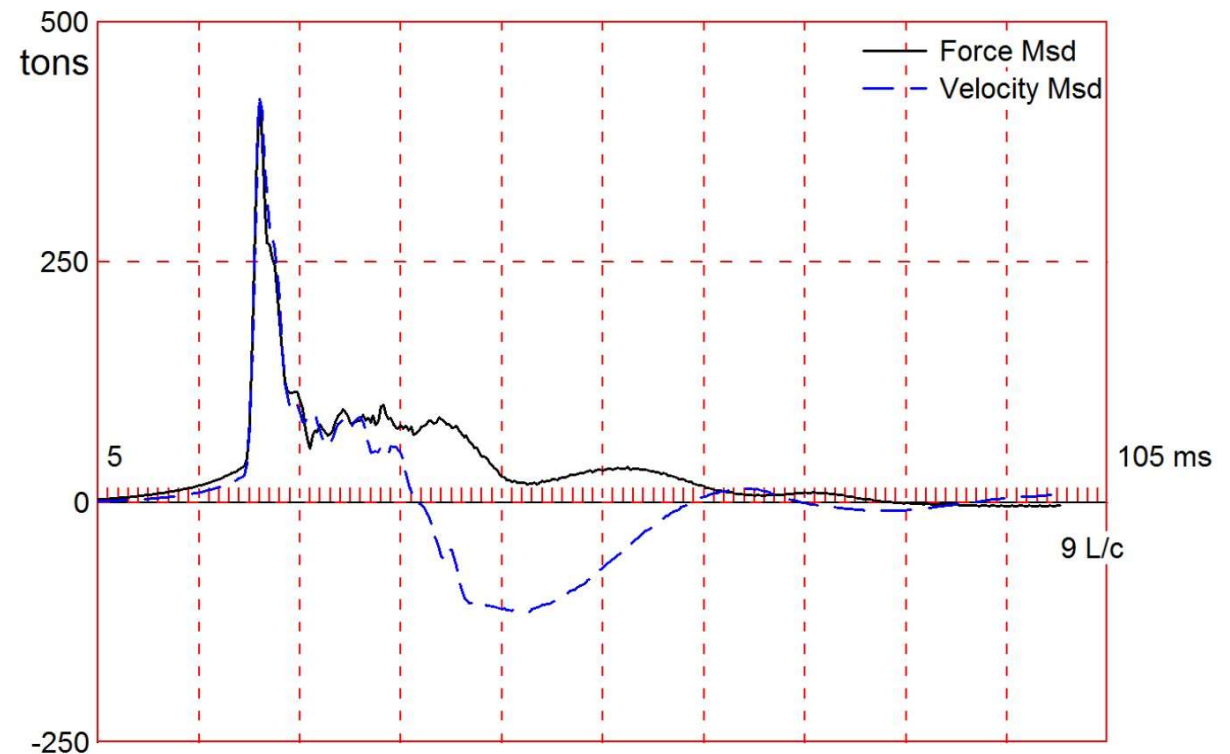


Ejercicio del práctico: Método CASE

Estimar la resistencia nominal del suelo mediante el método RSP y RMX en base a las curvas de fuerza y velocidad medidas en el extremo del pilote durante un ensayo dinámico. Considerar el factor de amortiguamiento de acuerdo al perfil del estudio de suelos.

Pilote:

- $L = 35 \text{ m}$
- $A = 1296 \text{ cm}^2$
- $\gamma = 24 \text{ kN/m}^3$
- $E = 39.2 \text{ GPa}$





Ejercicio del práctico: Método CASE

