

ANALYSE COMPARATIVE DES METHODES D'EVALUATION DE LA RESISTANCE A LA PENETRATION DYNAMIQUE DES SABLES

COMPARATIVE ANALYSIS OF METHODS FOR ASSESSING THE DYNAMIC PENETRATION RESISTANCE OF SANDS

Sebastian López Retamales¹, Jean-Claude Dupla², Jean Canou³, Miguel Benz⁴

¹ Ecole des Ponts ParisTech, Laboratoire NAVIER, France

² Laboratoire Navier – IFSTTAR, CNRS : UMR8205, Ecole des Ponts ParisTech (ENPC), Université Paris Est (UPE) – France

³ Laboratoire Navier (NAVIER) – IFSTTAR, CNRS : UMR8205, Ecole des Ponts ParisTech (ENPC), Université Paris Est (UPE), France

⁴ Sol Solution – Bureau d'études Géotechniques et Géophysiques – Riom, France

RÉSUMÉ – Les pénétromètres dynamiques sont des équipements de caractérisation du sous-sol, largement utilisés dans la pratique géotechnique. L'évaluation de la résistance en pointe est l'un des paramètres les plus importants pour la caractérisation de la réponse du sol. L'objectif de cet article est de comparer différentes méthodologies d'évaluation de la résistance en pointe en utilisant un pénétromètre dynamique léger. Des essais de pénétration ont été réalisés avec ce pénétromètre, instrumenté avec des jauges de déformation et un accéléromètre, sur des massifs de sable d'Hostun HN31 reconstituée dans une chambre d'étalonnage K_0 . Les résultats montrent que les méthodes basées sur l'analyse de l'équation d'onde et la technique de découplage et de reconstruction des signaux à l'interface pointe-sol présentent des avantages par rapport aux méthodes basées sur des équations théoriques-empiriques.

ABSTRACT – Dynamic penetrometers are subsoil characterization equipments, widely used in geotechnical practice. The evaluation of the peak strength is one of the most important parameters for the characterization of the soil response. The objective of this paper is to compare different methodologies for peak strength evaluation using a lightweight dynamic penetrometer. Penetration tests were performed with this penetrometer, instrumented with strain gauges and an accelerometer, on HN31 Hostun sand mass reconstructed in a K_0 calibration chamber. The results show that methods based on wave equation analysis and the technique of decoupling and reconstructing signals at the tip-soil interface have advantages over methods based on theoretical-empirical equations.

1 INTRODUCTION

Les essais de pénétration dynamique sont des essais rapides et peu coûteux qui permettent d'évaluer la réponse dynamique du sol à la pénétration d'une pointe conique ou d'un échantillonneur. Cependant, l'évaluation des résultats des essais peut être abordée en utilisant différentes techniques et approches.

Les approches les plus couramment employées sont basées sur l'utilisation d'équations de conduite dynamique, de corrélations empiriques et l'application de l'équation des ondes. Ces trois approches sont basées sur des hypothèses de calcul différentes qui ne permettent pas une homogénéisation dans l'évaluation des résultats.

L'objectif de cet article est de présenter une analyse comparative de deux méthodes de calcul de la résistance à la pénétration dynamique q_d et de la résistance à la pénétration statique q_c . Les méthodes de calcul de la résistance dynamique utilisées sont l'application de l'équation des ondes et la formule de conduite dynamique néerlandaise.

Cet article présente les méthodes de calcul de la résistance à la pénétration dynamique utilisées et décrit leur mode d'application au pénétromètre dynamique à énergie variable (PANDA). L'équipement de pénétration dynamique et les éléments associés à la calibration de la chambre sont décrits. Enfin, une analyse comparative et les conclusions des résultats obtenus sont présentées.

Les résultats montrent que les méthodes de calcul de la résistance dynamique utilisant la formule Néerlandais sont un moyen rapide et cohérent de calculer la résistance à la pénétration dynamique. D'autre part, lorsqu'on les compare aux résultats de la pénétration statique, les résultats de la résistance dynamique obtenus à l'aide de l'équation des ondes sont cohérents avec les autres valeurs présentées dans la littérature (Benz, 2009; Cassan, 1978).

2 ÉVALUATION DE LA RÉSISTANCE DE LA POINTE

2.1 *Dynamic Penetrometer Test (DPT)*

Un pénétromètre dynamique PANDA 3® (AFNOR, 2000) (Figure 1) a été utilisé pour évaluer la résistance à la pénétration dynamique (Benz Navarrete, 2009; Escobar et al., 2016; Escobar Valencia, 2015; López & Benz, 2019; López et al., 2018; Navarrete et al., 2018).

Le DPT est un pénétromètre à énergie variable instrumenté avec des capteurs d'accélération et de déformation. Cette caractéristique permet l'évaluation de la résistance de pointe par l'application d'équations semi-empiriques de calcul de la résistance de pointe et en plus de l'application de méthodes basées sur l'évaluation de l'équation d'onde et l'application de techniques de reconstruction d'onde (Benz Navarrete, 2009), ce qui permet d'évaluer les signaux en tout point du pénétromètre si les caractéristiques du pénétromètre sont connues (Benz et al., 2013; Benz Navarrete, 2009; Escobar Valencia, 2015).

Pour l'évaluation de la résistance à la pénétration dynamique basée sur une approche newtonienne, l'équation de conduite dynamique néerlandaise a été utilisée (Frazer, 1971). Il est possible de trouver de multiples équations semi-empiriques développées pour calculer la résistance à la pénétration dynamique d'un sol (Frazer, 1971; Likins et al., 2012; Mosley & International, 1970; Querelli & Massad, 2017; Salgado et al., 2016; Selamat & Ng, 2011; Tokhi et al., 2011).

Dans cette recherche, l'équation hollandaise a été adoptée pour l'évaluation de la résistance dynamique de la pointe (Eq. 1).

$$q_d = \frac{1}{A} \cdot \frac{E}{e} \cdot \frac{1}{1 + \frac{P}{M}} \quad (\text{Eq. 1})$$

Avec:

e = Pénétration de la pointe.

A = Surface de la pointe.

M = Masse du marteau.

P = Masse de l'ensemble entraîné (pénétromètre : pointe, tige et tête).

E = Énergie d'impact.

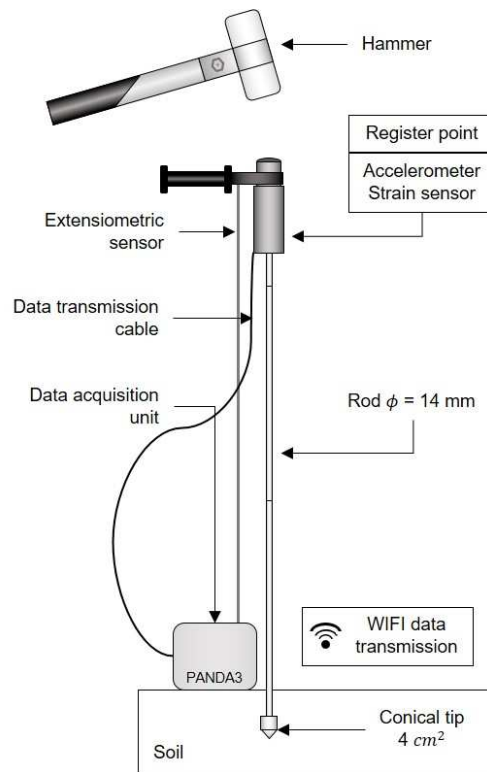


Figure 1-PANDA 3® Dynamic Penetrometer Schematic Diagram

Pour l'approche basée sur l'analyse des ondes, il a été employé la méthode proposée par Benz (2009), qui, au moyen d'un processus itératif de reconstruction du signal de force et de vitesse des ondes, permet d'obtenir la résistance dynamique à l'interface sol-pointe. La méthode consiste à obtenir des enregistrements de force et de vitesse (Figure 2a), au moyen de l'intégration du signal d'accélération. Ensuite, si les caractéristiques du pénétromètre sont connues, il est possible d'appliquer une méthode de découplage des ondes incidentes et réfléchies pour reconstruire les signaux (Figure 2b), et obtenir le registre de force à l'interface sol-pointe.

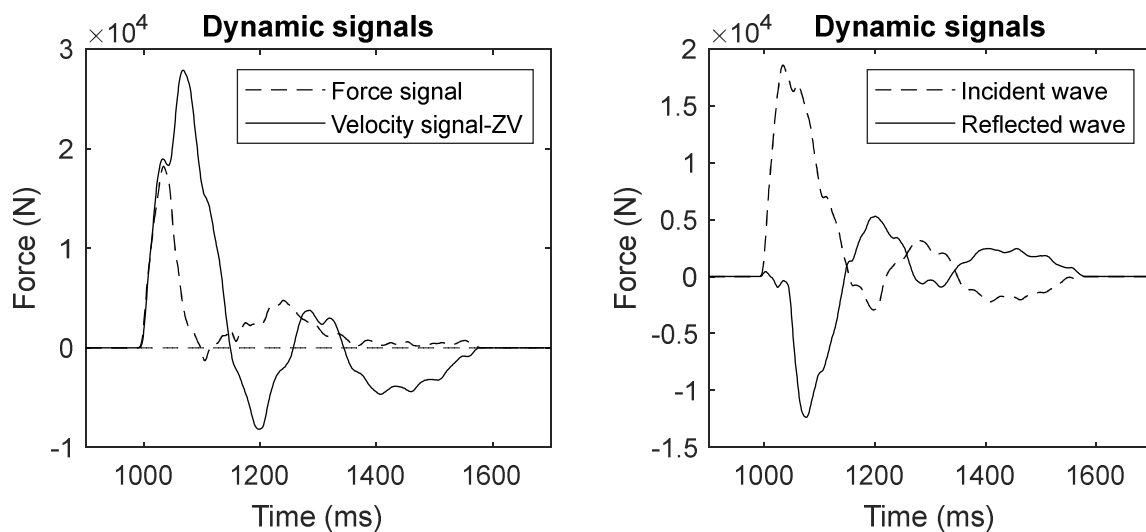


Figure 2- (a) Signaux de force et de vitesse enregistrés au niveau de la tête de frappe. (b) Les ondes incidentes et réfléchies sont découplées.

Le signal de force reconstruit à la pointe conique permet d'obtenir la réponse dynamique de résistance du sol, aussi, il est possible d'obtenir la vitesse à l'interface pointe-sol, qui par intégration représente les déplacements à l'interface pointe-sol. Si la résistance et les déplacements sont disponibles, il est possible de construire une courbe de contrainte-déformation dynamique (Figure 3). La courbe dynamique contrainte-déformation représente la réponse dynamique du sol. La résistance maximale est considérée comme la valeur maximale obtenue à partir de la courbe.

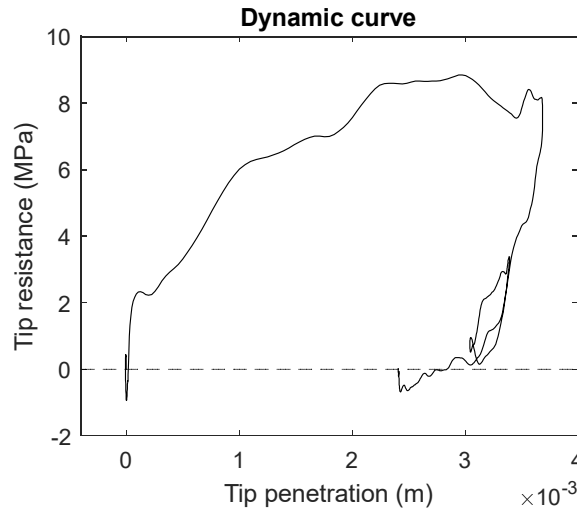


Figure 3-Courbe de résistance à la pénétration dynamique PANDA3®.

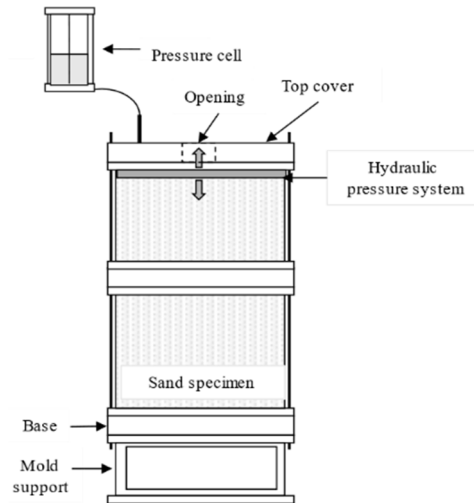
2.2 Essais en laboratoire

Une chambre de calibration K_0 a été utilisée pour les tests en laboratoire. La chambre se compose d'une base cylindrique avec deux cylindres supplémentaires et un couvercle supérieur qui permettent la construction d'un échantillon de sol de 730 mm de hauteur et 550 mm de diamètre. Le système est fermé et serré avec des tiges filetées qui sont fixées en haut et en bas par des écrous. Sous le couvercle supérieur et sur le dessus de l'échantillon, un système de pression hydraulique est installé qui consiste en une membrane en caoutchouc avec la possibilité de se dilater pour exercer une contrainte de consolidation verticale. Le contrôle de la pression de consolidation verticale est généré par une cellule de charge, comme le montre la figure 4.

Pour analyser la réponse du sol, des essais ont été réalisés sur des spécimens reconstitués de sables de Fontainebleau NE34, à un indice de densité de 0,3, 0,6 et 0,9. Des niveaux de surcharge effectifs de 10 kPa à 400 kPa ont été appliqués à chacun des spécimens reconstitués (tableau 1).

Tabla 1- Configuration de l'essai de pénétration dynamique dans la chambre d'étalonnage K_0 .

Nombre de essais	I_d	Contrainte de consolidation verticale (kPa)
essais 1	0.3	10 - 25 - 50 - 75 - 100 - 200 - 300 - 400
essais 2	0.6	
essais 3	0.9	

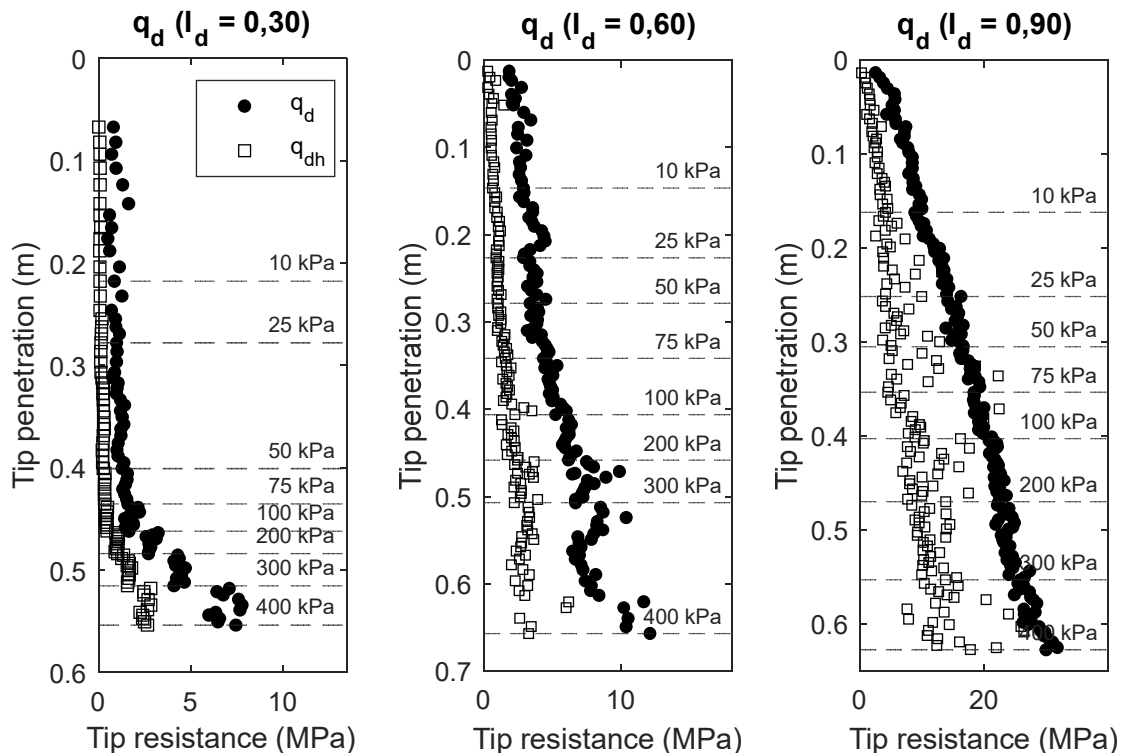
Figure 4- K_0 Calibration chamber scheme

3 RÉSULTATS ET DISCUSSION

La figure 5 montre les pénérogrammes de la résistance de la pointe à la pénétration dynamique q_d obtenus par l'analyse des ondes (q_d) et par l'application de l'équation Néerlandais (q_{dh}), à partir d'essais réalisés dans une chambre d'étalonnage K_0 .

Les résultats montrent une résistance à la pénétration dynamique inférieure lorsqu'on applique l'équation Néerlandais. La sous-estimation est d'autant plus importante que la valeur de la pression verticale effective appliquée sur l'éprouvette est élevée.

Dans le cas des valeurs de résistance obtenues à l'aide de l'équation des ondes, les résultats montrent une plus grande sensibilité à l'application de la contrainte verticale effective, qui est plus perceptible pour des valeurs d'indice de densité plus élevées.

Figure 5- Pénétragrammes des essais dans la chambre d'étalonnage K_0

Il est important de noter que les valeurs de résistance ne varient pas de manière significative sous des pressions verticales effectives de recouvrement inférieures à 50 kPa dans des spécimens de densité faible à moyenne. Au-dessus de 50 kPa, les valeurs de résistance dynamique montrent une augmentation soutenue et graduelle qui est facilement perceptible.

La figure 6 montre les relations entre la résistance à la pointe obtenue par l'analyse de la forme d'onde et l'application de la formule Néerlandais. Dans les trois niveaux de densité, on observe une relation qui peut être décrite au moyen d'une fonction linéaire, dans laquelle les valeurs de résistance obtenues au moyen de la formule Néerlandais correspondent à environ 70% de la grandeur de résistance obtenue au moyen de l'analyse basée sur l'équation des ondes. D'autre part, une bonne corrélation est observée entre les valeurs obtenues avec les deux méthodes de calcul, présentant des valeurs de dispersion plus élevées dans l'essai réalisé à densité moyenne (I_D 0,6). La dispersion observée peut être associée à la méthode de reconstruction du spécimen.

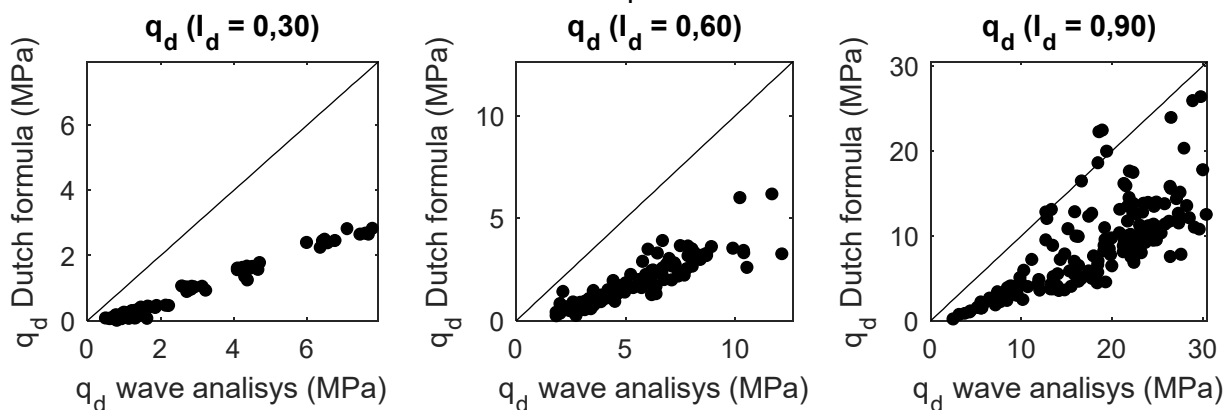


Figure 6- Relations entre la résistance et la pénétration dynamique (formule Néerlandais et équation de la vague).

Le bon ajustement des valeurs de résistance dynamique est lié à la méthodologie d'application des calculs. Dans les deux cas, l'origine des enregistrements est la même. Pour l'équation néerlandaise, les valeurs d'énergie sont calculées directement à partir des enregistrements dynamiques en appliquant la méthode EFV. Les mêmes enregistrements dynamiques sont utilisés pour le découplage et la reconstruction des signaux de force et de vitesse dans la pointe conique.

4 CONCLUSIONS

Sur la base des résultats et des comparaisons établis, il est possible de conclure ce qui suit :

- Les méthodes d'évaluation de la résistance à la pénétration dynamique sont cohérentes entre elles, cependant, l'application de l'équation Néerlandais donne des valeurs de résistance plus faibles.
- Bien que l'équation Néerlandais fournisse des valeurs de résistance plus faibles, sa mise en œuvre rapide par rapport à l'application de l'équation des ondes en fait un outil utile pour l'analyse de la réponse dynamique du sol à la pénétration. Cependant, il est nécessaire de prendre en compte la sous-estimation des valeurs de résistance et d'appliquer des mesures correctives telles que des facteurs de sécurité.

- Bien que les trois méthodes puissent donner des valeurs de résistance différentes, toutes les trois sont capables de décrire la variabilité stratigraphique du sol, cependant, les méthodes de calcul de la résistance dynamique peuvent être plus affectées par la présence de clastes plus grands, ce qui se traduit par l'apparition de pics de résistance maximale locaux.
- La caractérisation du sol au moyen d'essais de pénétration est une technique rapide et économique, cependant, l'évaluation des résultats doit être effectuée rationnellement et en considérant les caractéristiques des méthodes utilisées dans l'évaluation de la résistance à la pénétration. Dans le cas du CPT, la résistance statique est un résultat fiable car il s'agit d'un enregistrement direct de la réponse du sol, dans le cas de l'évaluation par équation d'onde, les résultats décrivent correctement la réponse dynamique du sol car ils sont basés sur un enregistrement dynamique obtenu directement dans un pénétromètre. Dans le cas de l'application de l'équation hollandaise, les résultats peuvent présenter un degré d'imprécision plus élevé car ils sont basés sur des concepts théoriques-empiriques, cependant, l'utilisation d'enregistrements dynamiques obtenus directement dans le pénétromètre et pour chaque impact réduit l'incertitude associée aux aspects théoriques de l'équation hollandaise.
- En général, la résistance à la pénétration statique q_c et la résistance à la pénétration dynamique q_d obtenues à partir de l'équation des ondes présentent des valeurs approximativement égales, ce qui est cohérent avec les données présentées dans la littérature disponible (Benz Navarrete, 2009 ; Cassan, 1978). Dans le cas de la formule néerlandaise, dans tous les cas évalués, la résistance était d'une magnitude inférieure.
- Finalement, les méthodes d'évaluation de la résistance à la pénétration considérées sont fiables si le mode de mise en œuvre est effectué de manière rationnelle et en considérant les caractéristiques intrinsèques de chaque méthode.

5 RÉFÉRENCES

- XP P 94-105 Contrôle de la qualité du compactage, 36 (2000).
- Benz, M. (2009). Mesures dynamiques lors du battage du penetrometre panda 2. Université Blaise Pascal Clermont II.
- Benz, M. A., Escobar, E., Haddani, Y., Breul, P., & Bacconnet, C. (2013). Charge-Enfoncement Dynamique En Pointe Penetration Curve. Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 499–502.
- Benz Navarrete, M. A. (2009). Mesures dynamiques lors du battage du pénétromètre Panda 2. Phd thesis of Université Blaise Pascal, Clermont II (Clermont Ferrand, France).
- Benz Navarrete, M. A., Escobar Valencia, E. J., Gourvès, R., Haddani, Y., Breul, P., & Bacconnet, C. (2013). Mesures dynamiques lors du battage pénétrométrique – Détermination de la courbe charge-enfoncement dynamique en pointe. Proceedings of the 18th International Conférence on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 499–502.
- Cassan, M. (1978). Les essais in-situ en mécanique de sols. Tome 1 réalisation et interpretation.
- Escobar, E., Navarrete, M. B., Gourvès, R., Breul, P., & Chevalier, B. (2016). Dynamic Characterization of the Supporting Layers in Railway Tracks using the Dynamic Penetrometer Panda 3 ®. International Conference on Transportation Geotechnics (ICTG 2016), 143(Ictg), 1024–1033.
- Escobar Valencia, E. J. (2015). Mise au point et exploitation d'une nouvelle technique pour la reconnaissance des sols: le PANDA 3. Université Blaise Pascal.
- Frazer, B. (1971). Formulas de hinca dinámica. Revista de Obras Pública, 977–990.

Likins, G., Fellenius, B. H., & Holtz, R. D. (2012). Pile Driving Formulas: Past and Present Garland. GeoCongress 2012, 737–753.

López, S., & Benz, M. (2019). Comparación de los ensayos de penetrómetro de cono dinámico de energía variable PANDA® ensayo de placa de carga estática y dinámica. XVI Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering.

López, S., Benz, M., Navarro, J., & Zamora, D. (2018). Control geotécnico de obras viales mediante penetrómetro dinámico ligero de energía Variable PANDA 2. X Congreso Chileno de Geotecnia.

Mosley, E. T., & International, R. (1970). Pile-Driving Formulas. 49th Annual Meeting of the Highway Research Board, 23–32.

Navarrete, B., Moustang, P., Haddani, Y., Breul, P., & Villavicencio A, G. (2018). The PANDA, Variable Energy Lightweight Dynamic Cone Penetrometer : a quick state of art.

Querelli, A., & Massad, F. (2017). Simplified Hiley's formula calibration for precast concrete piles in duque de caxias. March.

Salgado, R., Zhang, Y., Abou-jaoude, G., Loukidis, D., & Bisht, V. (2016). Pile driving formulas based on pile wave equation analyses. Computers and Geotechnics, 81, 307–321.

Selamat, M. M. A. M. R., & Ng, S. S. Y. W. K. (2011). On the Study of Pile Driving Formula Based on Blow Counts. 351–361.

Tokhi, H., Ren, G., & Xie, Y. M. (2011). Improving the Predictability of Hiley Pile Driving Formula in the Quality Control of the Pile Foundation. 263, 1292–1296.