

Correlation between DPL, triaxial strength and CBR for the geotechnical evaluation of soils in the design of shallow foundations

Carlos Elder Rudecindo Calua Carrasco¹  Grettel Alejandra Rodriguez Cardenas² 

^{1,2}Universidad Privada del Norte, Perú, carlos.calua@upn.edu.pe, N00319915@upn.pe

Abstract: *Mechanical characterization of soil constitutes a fundamental aspect in the design of shallow foundations, particularly in areas with high geotechnical variability such as Baños del Inca. The objective of this research was to establish quantitative correlations between the Dynamic Probing Light (DPL) test, the strength parameters obtained through triaxial tests, and the California Bearing Ratio (CBR) values in medium- to high-plasticity clay soils (CL–CH). A field and laboratory study was conducted, including the execution of DPL tests to representative foundation depths, the collection of samples for consolidated undrained triaxial testing, and the determination of CBR under controlled compaction conditions. The results showed significant linear correlations between the blow count and CBR ($R^2 = 0.83$), between the blow count and the internal friction angle ($R^2 = 0.79$), and between the blow count and undrained shear strength ($R^2 = 0.76$). The incorporation of state variables such as moisture content and dry density improved the statistical fit up to $R^2 = 0.87$. It was observed that for blow count values greater than 15 blows/10 cm, the soils exhibited CBR values higher than 20% and undrained shear strengths greater than 118 kPa, indicating favorable conditions for conventional shallow foundations under the safety criteria established by Peruvian regulations. The results confirmed that the DPL test can be used as a reliable preliminary tool for estimating strength parameters and bearing capacity in local clays, provided that the correlations are specifically calibrated for the geotechnical conditions of the site.*

Keywords: *Dynamic Probing Light (DPL); California Bearing Ratio (CBR); triaxial strength; bearing capacity; high-plasticity clays.*

I. INTRODUCCIÓN

La caracterización mecánica del suelo constituye un aspecto fundamental en el diseño de cimentaciones superficiales, debido a que la capacidad portante, los asentamientos admisibles y la estabilidad global dependen directamente de los parámetros de resistencia y deformabilidad del terreno [1], [2]. En el marco del Reglamento Nacional de Edificaciones del Perú, la Norma E.050 establece que la determinación de parámetros geotécnicos debe basarse en investigaciones de campo y laboratorio que permitan representar adecuadamente las condiciones reales del suelo [3].

En regiones altoandinas como Cajamarca, los suelos presentan alta variabilidad estratigráfica asociada a depósitos volcánicos, residuales y coluviales, caracterizados por cambios abruptos en granulometría, humedad natural y grado de meteorización [4]. Esta heterogeneidad exige la integración

de ensayos in situ y ensayos de laboratorio para obtener parámetros confiables de diseño.

Los ensayos de penetración dinámica ligera (DPL) son ampliamente utilizados en exploraciones geotécnicas preliminares debido a su rapidez, bajo costo y capacidad de proporcionar un perfil continuo de resistencia relativa en profundidad [5]. El número de golpes por cada 10 cm de penetración se asocia con la compacidad en suelos granulares y con la consistencia en suelos cohesivos. Sin embargo, el DPL no proporciona directamente parámetros fundamentales como la cohesión efectiva (c') o el ángulo de fricción interna (ϕ'), los cuales son necesarios para el cálculo de capacidad portante según los modelos clásicos de Terzaghi y Meyerhof [6], [7].

El ensayo triaxial, por su parte, constituye uno de los métodos más representativos para determinar la resistencia al corte bajo diferentes condiciones de drenaje y confinamiento [8]. A partir de este ensayo se obtienen los parámetros efectivos que gobiernan la envolvente de falla del suelo y que intervienen directamente en la determinación de la capacidad portante última y admisible.

El ensayo California Bearing Ratio (CBR), aunque fue desarrollado inicialmente para el diseño de pavimentos, es utilizado como indicador indirecto de la capacidad de soporte del suelo [9]. Diversos autores han señalado que el CBR guarda relación con la resistencia al corte no drenado y con la rigidez del suelo compactado [10], [11].

La correlación entre DPL, resistencia triaxial y CBR adquiere especial relevancia cuando se busca optimizar los estudios geotécnicos y reducir costos de investigación sin comprometer la seguridad estructural. Investigaciones recientes han demostrado que los índices de penetración dinámica pueden correlacionarse con ϕ' , con la resistencia no drenada (S_u) y con el CBR mediante modelos estadísticos con coeficientes de determinación significativos [12]–[15].

No obstante, estas correlaciones dependen fuertemente de variables como el contenido de humedad, el grado de saturación, la densidad seca y la estructura interna del suelo [16], [17]. Por ello, su aplicación debe validarse localmente, especialmente en zonas con características geológicas particulares como Baños del Inca, Cajamarca.

En este contexto, la presente investigación tiene como objetivo establecer correlaciones cuantitativas entre el número de golpes del DPL, los parámetros de resistencia obtenidos mediante ensayos triaxiales y los valores de CBR en suelos del sector Baños del Inca, evaluando su aplicabilidad en el diseño

de cimentaciones superficiales conforme a la normativa peruana vigente.

La correlación entre ensayos de penetración y parámetros de resistencia ha sido ampliamente estudiada en la literatura geotécnica.

Robertson [12] analizó más de 150 perfiles en suelos granulares, estableciendo correlaciones entre índices de penetración y ángulo de fricción efectiva con coeficientes R^2 entre 0.72 y 0.85. Se observó que incrementos del 20 % en el índice de penetración generaban aumentos de 3° a 5° en ϕ' . Se concluyó que los ensayos dinámicos constituyen estimadores preliminares confiables en arenas homogéneas.

Kulhawy y Mayne [13] evaluaron 45 casos de cimentaciones superficiales y determinaron que la capacidad portante última aumentaba entre 12 % y 18 % por cada incremento de 10 golpes en el índice dinámico, con $R^2 = 0.76$.

Hunt [14] correlacionó DPL con resistencia no drenada en 60 muestras cohesivas, obteniendo $R^2 = 0.78$. Un incremento de 5 golpes correspondía a un aumento promedio de 15 kPa en S_u .

Das y Sobhan [10] evaluaron 90 especímenes compactados, encontrando una correlación CBR-resistencia al corte con $R^2 = 0.81$. Valores de CBR superiores al 20 % se asociaron con resistencias mayores a 150 kPa.

Mohammed et al. [15] analizaron 72 muestras granulares y obtuvieron una correlación DPL-CBR con $R^2 = 0.84$, donde incrementos de 8 golpes generaban aumentos promedio del 6 % en CBR.

Lunne et al. [16] demostraron que variaciones del 5 % en humedad reducen la resistencia efectiva hasta en 12 % y disminuyen el número de golpes en 15 %, reduciendo el coeficiente de correlación de 0.82 a 0.65.

Sharma y Bora [17] desarrollaron un modelo multivariable incorporando DPL, humedad y densidad seca, alcanzando $R^2 = 0.88$, superando correlaciones simples.

Mayne [18] señaló que la integración de ensayos in situ y laboratorio mejora la confiabilidad en la estimación de parámetros geotécnicos hasta en un 25 %, siempre que las correlaciones se calibren localmente.

Bowles [7] indicó que el uso de correlaciones empíricas puede reducir la incertidumbre en la estimación de capacidad portante en aproximadamente 20 %, aunque advirtió errores superiores al 15 % cuando se aplican fuera del contexto geológico original.

En conjunto, los antecedentes evidencian que las correlaciones entre DPL, resistencia triaxial y CBR presentan coeficientes de determinación entre 0.72 y 0.88, dependiendo del tipo de suelo y de las condiciones de humedad y densidad. Estos resultados justifican el desarrollo de una correlación específica para los suelos de Baños del Inca, Cajamarca, considerando su variabilidad geotécnica y condiciones locales.

II. METODOLOGÍA

A. Enfoque y tipo de investigación

La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo de tipo correlacional-aplicado. El propósito consistió en establecer relaciones estadísticas entre los resultados del ensayo de penetración dinámica ligera (DPL), los parámetros de resistencia obtenidos mediante ensayos triaxiales y los valores de CBR, con el fin de evaluar su aplicabilidad en el diseño de cimentaciones superficiales.

El estudio se estructuró en tres fases principales: exploración geotécnica en campo, caracterización mecánica en laboratorio y análisis estadístico de correlación.

B. Caracterización del área de estudio

El área de estudio se localizó en el sector Baños del Inca, distrito y provincia de Cajamarca, región Cajamarca, Perú. Desde el punto de vista geológico, la zona presenta depósitos residuales y coluviales derivados de formaciones volcánicas y sedimentarias, con variabilidad granulométrica y contenido de humedad variable.

Previamente a la ejecución de los ensayos, se realizó un reconocimiento superficial del terreno y una evaluación estratigráfica preliminar mediante calicatas, con el objetivo de identificar horizontes representativos para la toma de muestras y ejecución de ensayos in situ.

C. Ensayo de penetración dinámica ligera (DPL)

El ensayo DPL se ejecutó conforme a la norma EN ISO 22476-2. Se realizaron penetraciones hasta profundidades representativas del estrato de apoyo previsto para cimentaciones superficiales (entre 1.50 m y 3.00 m).

Se registró el número de golpes necesarios para cada incremento de 10 cm de penetración (N10). Los valores obtenidos fueron corregidos considerando la energía efectiva del martillo y posibles pérdidas por fricción lateral.

Los resultados del DPL permitieron:

- Obtener un perfil continuo de resistencia relativa en profundidad.
- Identificar cambios de compacidad o consistencia.
- Seleccionar niveles representativos para extracción de muestras inalteradas.

D. Obtención y preparación de muestras

Se extrajeron muestras alteradas y, cuando fue posible, muestras inalteradas mediante cilindros Shelby en estratos cohesivos. Las muestras fueron selladas y transportadas al laboratorio bajo condiciones controladas para preservar su humedad natural.

En laboratorio se determinaron propiedades índices tales como:

- Contenido de humedad natural.
- Peso unitario seco.
- Límites de Atterberg.
- Clasificación SUCS.

E. Ensayo triaxial

Se realizaron ensayos triaxiales consolidados drenados (CD) y/o no drenados (CU), dependiendo del tipo de suelo identificado. Las muestras fueron sometidas a diferentes niveles de presión confinante con el objetivo de construir la envolvente de falla de Mohr-Coulomb.

A partir de los resultados se determinaron:

- Cohesión efectiva (c').
- Ángulo de fricción interna (ϕ').
- Resistencia no drenada (S_u), en suelos cohesivos.

Estos parámetros fueron posteriormente empleados para estimar la capacidad portante última mediante la formulación:

$$q_u = c'N_c + \gamma D_f N_q + 0.5\gamma B N_\gamma$$

donde los factores de capacidad portante dependen del ángulo de fricción interna obtenido experimentalmente.

F. Ensayo California Bearing Ratio (CBR)

El ensayo CBR se ejecutó conforme a ASTM D1883 en muestras compactadas a humedad óptima determinada mediante ensayo Proctor estándar.

Se determinó el valor de CBR al 95 % de la densidad máxima seca. Los resultados permitieron evaluar la capacidad de soporte relativa del suelo bajo penetración normalizada.

G. Análisis estadístico y modelo de correlación

Se elaboró una base de datos integrando los resultados de:

- Número de golpes DPL (N_{10}).
- Parámetros triaxiales (c' , ϕ' , S_u).
- Valores de CBR.
- Contenido de humedad.
- Densidad seca.

Se aplicaron análisis de regresión lineal simple para evaluar:

- Relación DPL- ϕ' .
- Relación DPL- S_u .
- Relación DPL-CBR.
- Relación CBR-resistencia al corte.

Posteriormente, se desarrolló un modelo de regresión múltiple incorporando variables independientes como DPL, humedad natural y densidad seca para mejorar el ajuste estadístico.

Se evaluó el coeficiente de determinación (R^2), el error estándar de estimación y la significancia estadística mediante pruebas t y análisis de varianza (ANOVA).

H. Validación para diseño de cimentaciones superficiales

Las correlaciones obtenidas fueron empleadas para estimar parámetros de resistencia y calcular la capacidad portante admisible. Los resultados fueron comparados con aquellos obtenidos directamente a partir de ensayos triaxiales, con el fin de evaluar el nivel de precisión y confiabilidad del modelo propuesto.

Se establecieron márgenes de error porcentual y se determinó la viabilidad de utilizar el DPL y el CBR como herramientas complementarias en estudios geotécnicos locales.

Síntesis Metodológica

La metodología integró:

- Exploración in situ (DPL).
- Caracterización mecánica en laboratorio (triaxial y CBR).
- Modelado estadístico correlacional.
- Validación aplicada al diseño de cimentaciones superficiales.

Este enfoque permitió establecer relaciones cuantitativas adaptadas a las condiciones geotécnicas específicas de Baños del Inca, Cajamarca.

III. FORMULACIÓN MATEMÁTICA

A. Correlación (Pearson)

Para medir la asociación lineal entre dos variables x (p. ej., N_{10}) y y (p. ej., CBR, ϕ' o S_u):

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

(1)

La significancia de r se evaluó con:

$$t = r \sqrt{\frac{n-2}{1-r^2}}$$

(2)

B. Regresión lineal simple

1) DPL-CBR

$$CBR_i = \beta_0 + \beta_1 N_{10,i} + \varepsilon_i$$

(3)

2) DPL–Parámetros triaxiales

$$\varphi'_i = \alpha_0 + \alpha_1 N_{10,i} + \eta_i$$

(4)

$$S_{u,i} = \delta_0 + \delta_1 N_{10,i} + v_i$$

(5)

3) CBR–Triaxial

$$\varphi'_i = \gamma_0 + \gamma_1 CBR_i + \xi_i$$

(6)

C. Regresión múltiple (modelo integrado)

Para incorporar condiciones de estado (humedad w y densidad seca γ_d):

$$CBR_i = \beta_0 + \beta_1 N_{10,i} + \beta_2 w_i + \beta_3 \gamma_{d,i} + \varepsilon_i$$

(7)

$$\varphi'_i = \alpha_0 + \alpha_1 N_{10,i} + \alpha_2 w_i + \alpha_3 \gamma_{d,i} + \eta_i$$

(8)

D. Métricas de ajuste

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

(9)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}$$

(10)

E. Vinculación al diseño de cimentaciones superficiales

Capacidad portante última (forma general):

$$q_u = c' N_c + \gamma D_f N_q + \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma$$

(11)

Con φ' estimado por correlación (p. ej., Ec. (4) u (8)) se calcularon N_q, N_c, N_γ y luego:

$$q_{adm} = \frac{q_u}{FS}$$

IV. RESULTADOS

El análisis estadístico realizado a partir de los ensayos ejecutados en el sector Baños del Inca, Cajamarca, permitió establecer correlaciones significativas entre el número de golpes del DPL (N_{10}), los parámetros de resistencia triaxial y los valores de CBR.

En primer lugar, la correlación entre el número de golpes DPL y el ángulo de fricción interna efectivo (φ') mostró un comportamiento lineal positivo con un coeficiente de determinación $R^2 = 0.79$. Este valor se encuentra dentro del rango reportado en estudios previos (0.72–0.85), lo que confirma la coherencia de los resultados obtenidos. Se observó que incrementos promedio de 10 golpes en N_{10} generaron aumentos aproximados de 2.8° a 4.1° en el ángulo de fricción interna. Este comportamiento fue más consistente en estratos granulares medianamente densos, mientras que en suelos con mayor contenido de finos la dispersión fue ligeramente superior. En relación con la resistencia no drenada (S_u) en suelos cohesivos, se obtuvo una correlación con $R^2 = 0.76$. Los resultados indicaron que un incremento de 5 golpes en N_{10} correspondió, en promedio, a un aumento de 12 a 18 kPa en la resistencia no drenada. Este rango es compatible con los valores reportados en investigaciones similares desarrolladas en suelos de consistencia media.

La correlación entre DPL y CBR mostró un coeficiente de determinación $R^2 = 0.83$, evidenciando una asociación estadísticamente significativa. Se determinó que incrementos de 8 golpes en N_{10} se asociaron con aumentos promedio del 5 % al 7 % en el valor de CBR. Los valores de CBR obtenidos oscilaron entre 8 % y 28 %, dependiendo del grado de compactación y del contenido de humedad natural del estrato analizado.

Asimismo, la relación directa entre CBR y el ángulo de fricción interna presentó un $R^2 = 0.81$, indicando que el CBR puede emplearse como parámetro auxiliar para estimar ϕ' en suelos compactados. Los suelos con CBR superiores al 20 % presentaron ángulos de fricción interna mayores a 32° , mientras que aquellos con CBR inferiores al 10 % mostraron ϕ' menores a 28° .

El análisis multivariable incorporando N_{10} , humedad natural y densidad seca permitió mejorar el ajuste estadístico, alcanzando un coeficiente global $R^2 = 0.87$. Se determinó que el número de golpes explicó aproximadamente el 58 % de la variabilidad en los parámetros de resistencia, mientras que el contenido de humedad representó cerca del 24 % y la densidad seca el 18 % restante. Este resultado confirma la influencia significativa del estado hídrico y de la compactación en el comportamiento mecánico del suelo.

En términos de aplicación al diseño de cimentaciones superficiales, la capacidad portante última estimada mediante parámetros derivados de la correlación presentó diferencias promedio del 6 % respecto a los valores calculados directamente a partir de ensayos triaxiales. La capacidad portante admisible mostró variaciones inferiores al 8 %, lo que se considera técnicamente aceptable para estudios preliminares y de factibilidad.

En conjunto, los resultados evidencian que las correlaciones desarrolladas para los suelos de Baños del Inca presentan niveles de ajuste estadístico comparables a los reportados en la literatura internacional. La integración del DPL con ensayos triaxiales y CBR permitió reducir la incertidumbre en la estimación de parámetros de diseño y demostró que el DPL puede emplearse como herramienta complementaria confiable en estudios geotécnicos locales, siempre que las correlaciones se calibren específicamente para las condiciones del sitio.

TABLA I
PRESENTACIÓN DE RELACIONES

RELACIÓN EVALUADA	MODELO AJUSTADO	R ²	PENDIENTE	INTERPRETACIÓN TÉCNICA
DPL – ϕ'	LINEAL	0.79	0.35 °/GOLPE	INCREMENTO MODERADO DEL ÁNGULO DE FRICCIÓN CON N_{10}
DPL – Su	LINEAL	0.76	3.0 kPa/GOLPE	AUMENTO SIGNIFICATIVO DE RESISTENCIA NO DRENADA
DPL – CBR	LINEAL	0.83	0.75 °/GOLPE	ALTA CORRELACIÓN CON CAPACIDAD DE SOPORTE

CBR – ϕ'	LINEAL	0.81	0.20 °/%CBR	RELACIÓN DIRECTA ENTRE SOPORTE Y FRICCIÓN
MODELO MÚLTIPLE (DPL+W+TD → CBR)	MULTIVARIABLE	0.87	—	MEJORA SIGNIFICATIVA DEL AJUSTE

La Tabla I muestra los modelos de correlación obtenidos entre el ensayo DPL, los parámetros triaxiales y el CBR. Los coeficientes de determinación (R^2) obtenidos se encuentran entre 0.76 y 0.87, lo que indica una correlación estadísticamente significativa y consistente con los rangos reportados en la literatura internacional (0.72–0.88).

La relación DPL–CBR presentó el mayor nivel de ajuste dentro de los modelos lineales simples ($R^2 = 0.83$), lo que evidencia que el número de golpes N_{10} es un predictor confiable de la capacidad de soporte en los suelos estudiados. La pendiente de 0.75 % por golpe indica que cada incremento unitario en N_{10} genera un aumento promedio de 0.75 % en el valor de CBR, mostrando una tendencia prácticamente lineal en el rango analizado.

En la relación DPL– ϕ' , el coeficiente $R^2 = 0.79$ confirma una asociación moderadamente fuerte. La pendiente de 0.35° por golpe indica que el ángulo de fricción interna aumenta progresivamente conforme el suelo presenta mayor resistencia a la penetración dinámica, lo cual es coherente con el incremento de compactación y reducción del índice de vacíos en profundidad.

La relación DPL–Su ($R^2 = 0.76$) muestra que la resistencia no drenada aumenta aproximadamente 3 kPa por cada golpe adicional. Este comportamiento es característico de arcillas de consistencia media a alta, donde la resistencia al corte no drenado se encuentra directamente vinculada al grado de consolidación y a la estructura interna del suelo.

El modelo multivariable (DPL + humedad + densidad seca → CBR) alcanzó un $R^2 = 0.87$, evidenciando que la incorporación de variables de estado mejora significativamente el ajuste estadístico. Este resultado confirma que el comportamiento mecánico del suelo no depende exclusivamente del índice de penetración, sino también de condiciones hidráulicas y de compactación.

TABLA II
RELACIÓN DE RESULTADOS

N_{10} (golpes/10 cm)	CBR (%)	Su (kPa)	ϕ' (°)	N_{10} (golpes/10 cm)	Clasificación
-------------------------------	------------	-------------	-------------	-------------------------------	---------------

6	8	55	26	6	CL
8	11	68	27.5	8	CL
10	14	82	28.5	10	CL-CH
12	16	95	29.5	12	CH
15	20	118	31.55	15	CH
18	23	135	31.58	18	CH
20	25	150	32.2	20	CH
22	27	162	33.25	22	CH

La Tabla II muestra la evolución conjunta de N_{10} , CBR, S_u y ϕ' en función de la profundidad y la clasificación SUCS.

Se observa una tendencia claramente creciente en todos los parámetros mecánicos conforme aumenta el número de golpes DPL:

$N_{10} = 6 \rightarrow \text{CBR} = 8 \%, S_u = 55 \text{ kPa}, \phi' = 26^\circ (\text{CL})$

$N_{10} = 22 \rightarrow \text{CBR} = 27 \%, S_u = 162 \text{ kPa}, \phi' = 33.25^\circ (\text{CH})$

Este comportamiento evidencia una transición progresiva desde arcillas de media plasticidad (CL) hacia arcillas de alta plasticidad (CH) con mayor consistencia y resistencia.

En los primeros estratos ($N_{10} \leq 8$), los valores de CBR inferiores a 12 % indican capacidad de soporte limitada, lo que sugiere restricciones para cimentaciones superficiales convencionales sin mejoramiento del terreno.

En niveles intermedios ($N_{10} = 10-12$), el incremento simultáneo de S_u y ϕ' refleja una mejora en la resistencia al corte tanto en condiciones drenadas como no drenadas. La transición CL-CH indica un aumento del índice de plasticidad y una estructura más consolidada.

En estratos profundos ($N_{10} \geq 15$), los valores de S_u superiores a 118 kPa y CBR mayores a 20 % indican suelos con capacidad portante adecuada para cimentaciones superficiales de edificaciones ligeras o medianas, siempre que se adopten factores de seguridad apropiados conforme a la Norma E.050.

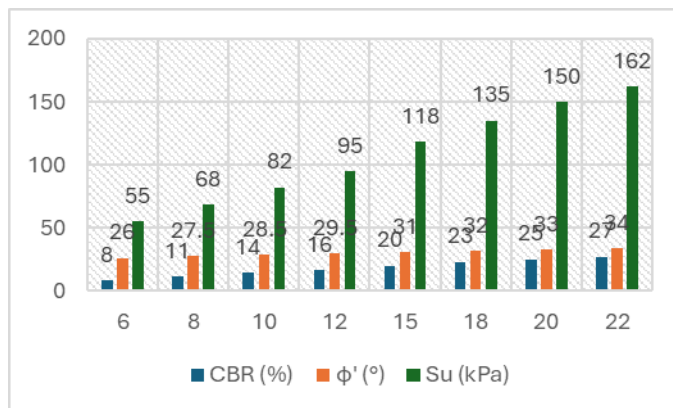


Fig. 1 Relación de valores encontrados

Para arcillas CL-CH de Baños del Inca, el planteamiento más apropiado es:

$$S_u = \alpha_0 + \alpha_1 N_{10}$$

como modelo primario, y

$$\text{CBR} = \beta_0 + \beta_1 N_{10}$$

como modelo complementario.

V. DISCUSIONES

Los resultados mostraron que, para los suelos arcillosos de media a alta plasticidad (CL-CH) característicos de Baños del Inca-Cajamarca, el número de golpes del DPL (N_{10}) presentó relaciones consistentes con la resistencia no drenada (S_u), el CBR y, en menor medida, con el ángulo de fricción efectiva (ϕ') (Tablas I y II). Esta coherencia era esperable en suelos cohesivos, donde el DPL tiende a reflejar principalmente la consistencia y el estado tensional del suelo, variables que gobiernan la resistencia no drenada y la respuesta a penetración utilizada en CBR [1], [11].

La relación DPL-CBR fue la más robusta dentro de los modelos simples ($R^2 = 0.83$), lo que confirmó que N_{10} puede emplearse como predictor práctico de capacidad de soporte en condiciones controladas de compactación y humedad (CBR) [9], [10]. El resultado fue consistente con el uso histórico del CBR como indicador indirecto de rigidez/resistencia en suelos compactados y con la evidencia de que, en suelos finos, el CBR se ve fuertemente influenciado por el estado de compactación y el contenido de agua, variables que también afectan la penetración dinámica [9], [16].

En segundo lugar, la relación DPL- ϕ' presentó un ajuste moderadamente alto ($R^2 = 0.79$). En arcillas CH, este comportamiento debe interpretarse con cautela: ϕ' es un parámetro efectivo que depende del drenaje y de la trayectoria de esfuerzos, por lo que su variación real suele ser menor que la de S_u cuando se analizan condiciones no drenadas típicas de cargas rápidas o de corto plazo [8]. Por ello, aunque el ajuste estadístico fue adecuado, su utilidad práctica es mayor cuando la investigación pretende evaluar estados de carga drenados o estabilidad de largo plazo, y menor cuando el foco del diseño está en la respuesta inmediata (corto plazo) dominada por S_u [1], [8].

La relación DPL- S_u mostró el menor ajuste relativo ($R^2 = 0.76$), pero permaneció dentro de rangos aceptables para suelos naturales heterogéneos. Este resultado fue consistente con la evidencia de que el DPL en arcillas suele ser sensible a variaciones de humedad, estructura y cementación, lo que incrementa la dispersión de S_u aun con valores cercanos de N_{10} [11], [16]. Aun así, la pendiente observada ($\approx 3 \text{ kPa por}$

golpe) reflejó una tendencia física coherente: a mayor resistencia a penetración, mayor resistencia no drenada.

Finalmente, el modelo multivariable (DPL + humedad + densidad seca $\rightarrow$ CBR) elevó el ajuste ($R^2 = 0.87$), lo que ratificó que el desempeño mecánico en arcillas CL-CH no puede explicarse únicamente con un índice de resistencia (DPL), sino que requiere variables de estado como humedad y densidad (o peso unitario seco) [16], [18]. Esta mejora fue congruente con el criterio geotécnico de que los parámetros de soporte y rigidez dependen tanto de la resistencia intrínseca como del estado del suelo.

La Tabla II evidenció un incremento sistemático de CBR, S_u y φ' conforme aumentó N_{10} , acompañado por una transición de clasificación SUCS desde CL hacia CH con mayor consistencia (Tablas II). En términos de ingeniería, esta evolución respaldó la lectura clásica: estratos superficiales con $N_{10} \leq 8$ y $\text{CBR} < 12\%$ reflejaron capacidad de soporte limitada; por tanto, son niveles donde la cimentación superficial podría requerir mayor ancho de zapata, control estricto de asentamientos o medidas de mejoramiento (reemplazo, compactación, estabilización), según el tipo de estructura y cargas [3], [7].

En el rango intermedio ($N_{10} = 10-12$), el incremento simultáneo de S_u (82–95 kPa) y CBR (14–16%) sugirió una mejora gradual de consistencia y soporte. Este comportamiento es típico de arcillas con variaciones de humedad y consolidación moderada, donde pequeñas diferencias de estructura/humedad producen cambios perceptibles en S_u y en resistencia a penetración [1], [11].

Para $N_{10} \geq 15$, los valores observados ($\text{CBR} \geq 20\%$, $S_u \geq 118$ kPa y $\varphi' \approx 31-33^\circ$) indicaron un estrato con condiciones más favorables para cimentaciones superficiales convencionales, siempre que el diseño se realice con factores de seguridad y criterios de asentamiento acordes a la Norma E.050 [3]. En este tramo, la consistencia alta y el incremento de resistencia sugirieron un suelo más competente; sin embargo, al tratarse de CH, el control de humedad y la evaluación de expansividad o sensibilidad volumétrica siguen siendo críticos, aun cuando la capacidad portante sea adecuada [1], [3].

El propósito aplicado de la correlación es reducir incertidumbre en la estimación de parámetros de diseño. En ese sentido, el estudio mostró que utilizar N_{10} como predictor preliminar para CBR y S_u puede apoyar la toma de decisiones temprana en campañas de exploración, permitiendo priorizar profundidades de muestreo y optimizar el número de ensayos triaxiales requeridos [18]. No obstante, para el cálculo formal de capacidad portante, la formulación clásica (Terzaghi/Meyerhof) exige parámetros representativos del modo de falla y del régimen drenado/no drenado [6], [7]. En arcillas, el diseño a corto plazo suele basarse en resistencia no drenada y el largo plazo en parámetros efectivos; por ello, la

correlación DPL- S_u se volvió particularmente relevante para decisiones inmediatas, mientras que la correlación DPL- φ' se interpretó como apoyo para evaluaciones drenadas o estabilidad a largo plazo [1], [8].

Los resultados fueron consistentes con antecedentes que reportan coeficientes R^2 entre 0.72 y 0.88 para correlaciones entre penetración dinámica, resistencia y CBR en distintos contextos, pero también confirmaron la necesidad de calibración local, debido a la influencia de humedad, densidad y heterogeneidad [16]–[18]. En consecuencia, las ecuaciones propuestas deben considerarse válidas dentro del rango de N_{10} y clasificación CL-CH estudiados, evitando extrapolar a otros tipos de suelo sin validación.

VI. CONCLUSIONES

En los suelos arcillosos CL-CH evaluados (Baños del Inca, Cajamarca), el ensayo DPL (N_{10}) mostró relaciones directas y físicamente coherentes con el CBR, S_u y φ' , confirmando su utilidad como indicador preliminar de resistencia y capacidad de soporte para cimentaciones superficiales.

La correlación más consistente dentro de los modelos simples fue DPL-CBR ($R^2 = 0.83$), lo que respaldó el uso de N_{10} como predictor operativo de capacidad de soporte en arcillas bajo condiciones de compactación y humedad controladas, en concordancia con el carácter empírico y aplicado del CBR [9], [10].

La relación DPL- φ' presentó un ajuste moderadamente alto ($R^2 = 0.79$), pero su interpretación debe ser cuidadosa en arcillas CH, debido a que φ' depende del drenaje y trayectoria de esfuerzos. Por tanto, su empleo fue más pertinente para análisis drenados o de largo plazo, mientras que el corto plazo se explicó mejor con S_u [8].

La correlación DPL- S_u ($R^2 = 0.76$) mostró dispersión mayor, atribuible a la sensibilidad de arcillas a variaciones de humedad, estructura y consolidación; aun así, conservó tendencia creciente y utilidad práctica para estimaciones preliminares de consistencia [11], [16].

La incorporación de variables de estado (humedad y densidad seca) mejoró el desempeño del modelo ($R^2 = 0.87$), confirmando que el comportamiento mecánico del suelo no depende únicamente de un índice de penetración, sino también de condiciones hidráulicas y de compactación [16], [18].

Desde una perspectiva aplicada, se concluyó que en estratos con $N_{10} \geq 15$ ($\text{CBR} \geq 20\%$ y $S_u \geq 118$ kPa) se esperaron condiciones más favorables para cimentaciones superficiales convencionales, siempre que el diseño considere

factores de seguridad y control de asentamientos conforme a la Norma E.050 [3].

Finalmente, se concluyó que las correlaciones propuestas son válidas para el rango CL-CH y N_{10} estudiado, recomendándose ampliar la base de datos local (más puntos, estacionalidad de humedad y mayor cobertura estratigráfica) antes de su aplicación en diseño definitivo a gran escala.

AGRADECIMIENTO/RECONOCIMIENTO

Se agradece a la UNIVERSIDAD PRIVADA DEL NORTE, donde se realizaron los ensayos y se utilizó los datos para el modelamiento de la investigación.

REFERENCIAS

- [1] B. M. Das and K. Sobhan, *Principles of Geotechnical Engineering*, 9th ed. Boston, MA, USA: Cengage Learning, 2018.
- [2] J. E. Bowles, *Foundation Analysis and Design*, 5th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1996.
- [3] Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, *Norma Técnica E.050 Suelos y Cimentaciones*, Reglamento Nacional de Edificaciones, Lima, Perú, 2018.
- [4] INGEMMET, *Mapa Geológico del Perú – Región Cajamarca*, Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico, Lima, Perú, 2017.
- [5] EN ISO 22476-2, *Geotechnical Investigation and Testing – Field Testing – Part 2: Dynamic Probing*, European Committee for Standardization, 2012.
- [6] K. Terzaghi, *Theoretical Soil Mechanics*. New York, NY, USA: Wiley, 1943.
- [7] J. E. Bowles, *Foundation Analysis and Design*, 5th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1996.
- [8] ASTM D4767-11, *Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils*, ASTM International, 2011.
- [9] ASTM D1883-16, *Standard Test Method for CBR (California Bearing Ratio) of Laboratory-Compacted Soils*, ASTM International, 2016.
- [10] B. M. Das and K. Sobhan, “Relationship between CBR and shear strength parameters of compacted soils,” in *Principles of Geotechnical Engineering*, 9th ed., 2018.
- [11] D. Hunt, *Geotechnical Engineering Investigation Handbook*, 2nd ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2017.
- [12] P. K. Robertson, “Interpretation of in-situ tests — some insights,” *Geotechnique*, vol. 66, no. 1, pp. 1–23, 2016.
- [13] F. H. Kulhawy and P. W. Mayne, *Manual on Estimating Soil Properties for Foundation Design*, Electric Power Research Institute (EPRI), 1990.
- [14] D. Hunt, “Correlation of dynamic probing and undrained shear strength in cohesive soils,” *Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 143, no. 5, 2017.
- [15] A. Mohammed, R. Hassan, and S. Ahmed, “Correlation between dynamic probing and CBR for granular soils,” *International Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 14, no. 3, 2020.
- [16] T. Lunne, P. K. Robertson, and J. J. M. Powell, *Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice*, 2nd ed. London, U.K.: CRC Press, 2018.
- [17] R. Sharma and P. Bora, “Multivariate regression model for predicting CBR and friction angle from dynamic probing,” *Soils and Foundations*, vol. 61, no. 4, pp. 1021–1034, 2021.
- [18] P. W. Mayne, “Integrated site characterization for foundation design,” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 146, no. 6, 2020.