

DISEÑO PRELIMINAR DE UN DISPOSITIVO PARA ESTIMAR LA COMPACTACIÓN DE SUELOS AGRÍCOLAS

**Luis P. Ramirez^a, Gustavo M. Flores^a, Rogelio L. Hecker^{ab},
Federico Masch^b, Diego Vicente^a**

^a*Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Pampa, Calle 110 esq. 9, General Pico (6360),
La Pampa, Argentina, pabloremirez@ing.unlpam.edu.ar, gmflores@ing.unlpam.edu.ar
vicente@ing.unlpam.edu.ar <http://www.ing.unlpam.edu.ar>*

^b*CONICET, hecker@ing.unlpam.edu.ar, fedemasch@hotmail.com*

Palabras claves: Agricultura de precisión, Compactación del suelo, Medición de fuerza, Strainingauges.

Resumen. La agricultura de precisión busca la optimización de los recursos de siembra en función de características observables del terreno con el objeto de lograr mayor rendimiento y predictibilidad de los cultivos. La compactación del suelo es uno de los factores que afectan negativamente al rendimiento de los mismos. Además varía con la profundidad y a lo largo del lote de producción. El conocimiento de esta distribución espacial permitirá mejorar la toma de decisiones de manejo en sitio específico de suelo.

En este trabajo se presenta el diseño de una herramienta en forma de cuchilla que permitirá estimar el nivel de compactación del suelo en cuatro profundidades distintas, en tiempo real y en forma continua con el avance de la máquina de labranza. A diferencia de trabajos similares se busca que la herramienta sea robusta, de geometría sencilla y sin elementos móviles. Para estimar la compactación se medirá la resistencia al avance de la cuchilla a partir de la deformación de orificios circulares practicados en su frente. Estos orificios junto con ranuras convenientemente realizadas forman estructuras tipo anillo rectangular que permiten localizar las zonas de deformación. Se propone la implementación de vínculos flexibles que permitan desacoplar las deformaciones y un desacople matemático de las mediciones. Se presenta el diseño de la cuchilla utilizando herramientas de cálculo y simulación por elementos finitos. A partir de la aplicación de perfiles de presión reales se cuantifica el error de medición siendo estos menor al 1%, logrando un buen desacople, independizando las mediciones con la profundidad.

1 INTRODUCCIÓN

La compactación de los suelos agrícolas afecta el desarrollo radicular de las plantas, disminuye el intercambio gaseoso y la capacidad de infiltración de agua en el suelo, contribuyendo de esta manera a la degradación de la calidad de los suelos destinados a la producción de alimentos. Por lo tanto, esta es una variable que se desea conocer al momento de diseñar una estrategia de Agricultura de Precisión. Esto impulsa el desarrollo de sensores sobre-la-marcha (on-the-go) para determinar el grado de compactación de los suelos, así como otras propiedades físicas y químicas, de forma continua, georreferenciada y en tiempo real.

El desarrollo de sensores sobre-la-marcha para determinar el grado de compactación se ha centrado principalmente en sensores mecánicos. Dichos sensores son diseñados bajo la premisa de que la resistencia mecánica, la cual el suelo ofrece al movimiento de una cuchilla plana, es un método indirecto que permite la determinación del grado de compactación.

Los primeros sensores desarrollados estuvieron destinados a medir la resistencia mecánica total del suelo y a la visualización de la dinámica de fractura de la interacción suelo-herramienta. Dichos diseños consisten en la utilización de una celda única de carga para la medición de resistencia mecánica total, dando solo la capacidad de determinar la variabilidad horizontal de dicha resistencia mecánica (Herrera, M.S., Coronel, C.I., Coba, D.L, Cueto, O.G., Bravo, E.L., 2011; Adamchuk, V.I, Morgan, M.T., & Sumali, H., 2001; Adamchuk, V.I, Ingram, T.J., Sudduth, K.A., Chung, S.O. 2008).

Otros investigadores, plantearon conceptos de desarrollo diferentes ante la necesidad de detectar la variabilidad vertical de la resistencia mecánica resultante de la interacción suelo-herramienta. Uno de estos conceptos consiste en una cuchilla plana, a la cual se le instala un conjunto de galgas extensiométricas distribuidas en su geometría. En función de las deformaciones localizadas medidas por estas galgas se estima el perfil de presión en el frente de ataque de la cuchilla generado por la interacción suelo-herramienta (Adamchuk, V.I., Christenson, P.T., 2007; Chung, S.O., Sudduth, K.A., Hummel, J.W., 2006; Gilandeh, Y.A., 2009).

Otro concepto de desarrollo, avanza en la necesidad de determinar también la variabilidad vertical de resistencia mecánica, mediante la adopción de métodos de medición directa en el frente de ataque de la cuchilla (Sudduth, K.A., Chung, S.O., Sanchez, P., Upadhyaya, S.K., 2008; Sharifi, A., Mohsenimanesh, A., 2012; Karabay, Sedat, 2007; Matias D. Jaliff Perez, Rogelio L. Hecker, Gustavo M. Flores, 2010). El método de medición directa, posee la característica de poder obtener un conjunto de lecturas de resistencia mecánica a distintas profundidades del suelo. Estos sensores, cabe mencionar, en contraposición a los ya citados anteriormente, poseen en general una mayor complejidad constructiva y conjunto de piezas mayor, lo cual deriva en un diseño menos robusto que los ya citados.

En el contexto donde los sensores mecánicos se desenvuelven, existen factores propios al suelo (humedad, fricción, piedras, vegetales, rastrojos, raíces), factores climáticos (precipitaciones, temperatura, viento), factores de implementación (maquinarias de tracción, implementos y métodos de clavado) y factores de humanos (concentración, metodologías de trabajo, etc.) que exigen un diseño con un grado de robustez adecuado a dicho contexto. Esta necesidad se suma a la ya mencionada necesidad de determinar la variabilidad horizontal y vertical de la resistencia mecánica del suelo. Por lo tanto, el sensor mecánico debe reunir las cualidades de: poseer un método constructivo simple el cual minimice la cantidad de piezas mecánicas. Un grado de robustez necesario para que el mismo se desarrolle de forma óptima en condiciones de campo y la capacidad de realizar mediciones directas de la resistencia mecánica del suelo en la interacción suelo-herramienta generada en el frente de la cuchilla.

En la presente publicación, se presenta el diseño de un sensor mecánico, el cual consiste en una cuchilla construida en una sola pieza y bajo el concepto de flexurestage, el cual permite la creación de zonas de medición independientes para determinar la resistencia mecánica del suelo a diversos rangos de profundidad.

Primero se muestra un análisis del acople de las presiones sobre la cuchilla, en las que se simularon presiones con un perfil constante. Luego se muestran los cálculos de las constantes de proporcionalidad entre presiones y deformaciones, las que permiten hacer lectura de las presiones medias aplicadas mediante la medición de las deformaciones. Por último, se muestran los resultados de las simulaciones para diferentes perfiles de presión y se determinan los errores con que el diseño de la cuchilla es capaz de seguir.

2 DISEÑO PRELIMINAR DE UN DISPOSITIVO PARA ESTIMAR LA COMPACTACIÓN DE SUELOS

En este trabajo se propone el diseño de una herramienta, en forma de cuchilla vertical que al desplazarse dentro del terreno, permita estimar la compactación de la tierra. Como se mencionó, las características exigidas es que sea robusta, de geometría sencilla y que permita estimar el perfil de compactación con la profundidad. Para ello se medirá la resistencia al avance de la cuchilla, a distintas alturas, a partir de la deformación captada en elementos particulares practicados en su frente. Dado el conocido y bien estudiado comportamiento de los anillos circulares sometidos a esfuerzos (Herrera, M.S., Coronel, C.I., Coba, D.L, Cueto, O.G., Bravo, E.L., 2011), se plantea la implementación de una variante de esta geometría denominada anillo rectangular Figura 1 (a). En este caso la geometría estaría dada por un rectángulo con un círculo en su interior. Al igual que para el anillo circular la aplicación de una fuerza radial vertical produce en el anillo rectangular deformaciones localizadas a $\pm 90^\circ$ de la dirección de aplicación. Claramente esta geometría es fácil de practicar en el frente de la cuchilla mediante la creación de un orificio circular y ranuras por encima y por debajo del mismo, Figura 1 (b). Puesto que esta configuración produce una disminución de la rigidez en la dirección perpendicular al plano del anillo, se propone que la ranura no sea completa y adopte la forma de la Figura 1 (c). Esta configuración de la ranura forma un vínculo tipo viga, de longitud L_1 y espesor t_1 , entre el anillo y el cuerpo de la cuchilla. Una alta relación entre L y t disminuye la interferencia de este vínculo con la medición de la fuerza captada por el anillo rectangular.

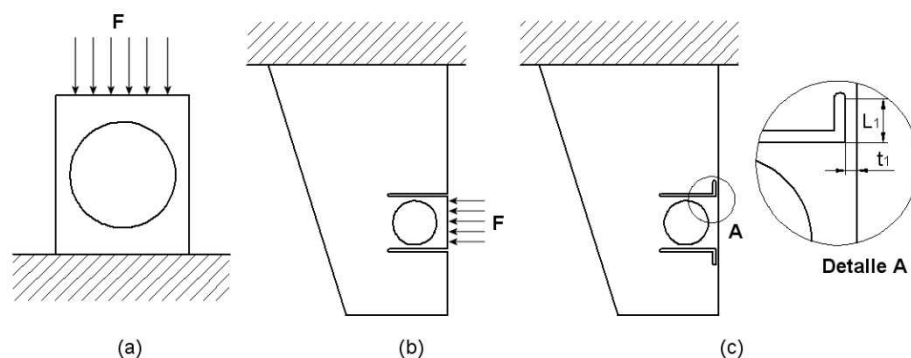


Fig. 1. Diseño cuchilla: (a) Anillo rectangular, (b) Implementación de anillo rectangular en la cuchilla, (c) Aumento de la rigidez transversal del anillo.

Dado que se plantea estimar el perfil de compactación del suelo con la profundidad, es

necesario medir la resistencia al avance a distintas alturas de la cuchilla. Esto implica implementar tantos anillos rectangulares como puntos de medición se quieran realizar. Ahora bien, como la cuchilla se comporta como una viga en voladizo se generará una distribución de tensiones que producirán deformaciones sobre los anillos ubicados por encima de la fuerza aplicada. Esto claramente inducirá lecturas erróneas de resistencia en los anillos superiores. Por lo tanto es necesario lograr un desacople en la lectura de cada uno de los anillos. Esto se logra practicando ranuras sobre el frente de la cuchilla como muestra la Figura 2. Esta configuración de ranuras genera un nuevo vínculo tipo viga, de longitud L_2 y espesor t_2 .

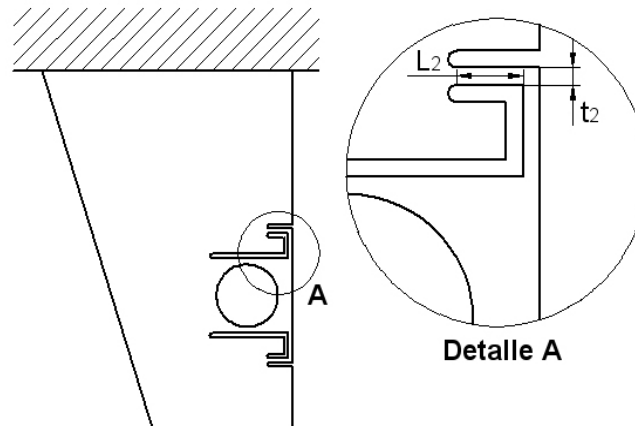


Fig. 2. Detalle de la implementación del anillo rectangular en la cuchilla.

Teniendo en cuenta lo planteado se presenta en la Figura 3 el modelo de una cuchilla para medir la resistencia al avance en cuatro profundidades distintas, a partir de la deformación captada en los anillos rectangulares. Luego este valor se puede utilizar para estimar el nivel de compactación. Es de destacar que para facilitar los estudios realizados se utilizó un modelo simplificado de la cuchilla que no cuenta con un ángulo en el borde de ataque para romper el suelo.

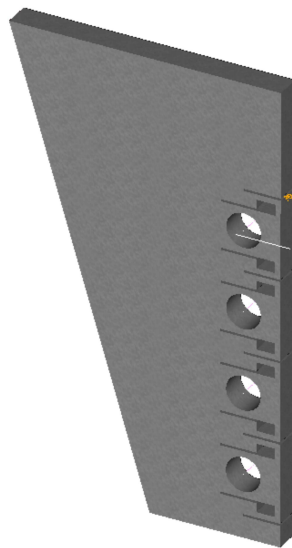


Fig. 3. Modelo de la cuchilla.

2.1 Dimensionado de los anillos rectangulares

Para determinar las dimensiones de los anillos rectangular se utilizaron relaciones obtenidas a partir del estudio de anillos circulares sometidos a esfuerzo (Karabay, Sedat, 2007). Además se tuvo en cuenta las características del equipamiento disponible para medir las deformaciones utilizando straingauges (SG) y el valor máximo esperado de compactación de suelos agrícolas.

La Eq. (1) permite determinar la magnitud de la deformación ε que se produce a 90° de la dirección de aplicación de una fuerza F radial, aplicada a un anillo circular, donde t es el espesor del anillo, b es el ancho (en este caso coincidente con el espesor de la cuchilla), r_e es el radio y E es el módulo de elasticidad del material.

$$\varepsilon = 1,09 \cdot \frac{F \cdot r}{E \cdot b \cdot t^2} \quad (1)$$

La Figura 4 presenta la aproximación entre el anillo circular y el rectangular, los parámetros mencionados y la ubicación de los straingauges sobre la superficie de los agujeros.

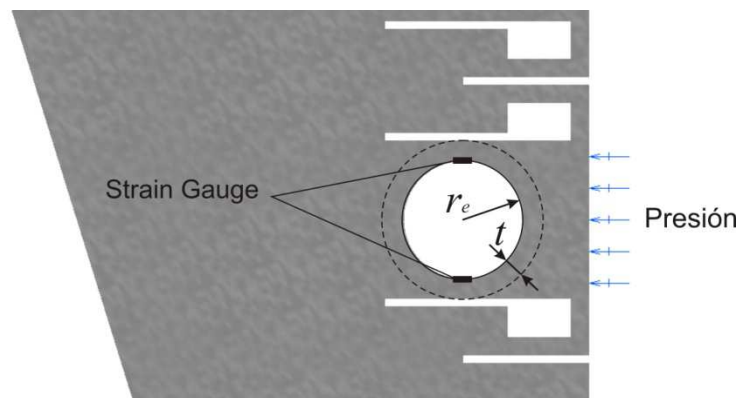


Fig. 4. Aproximación a la geometría del anillo circular.

De acuerdo al equipamiento disponible (Matias D. Jaliff Perez, Rogelio L. Hecker, Gustavo M. Flores, 2010), los valores medibles de deformación para el caso de un puente de Wheatstone con dos Strain Gauges (SG) son $\varepsilon_{max}=1,47E^{-3}$ y $\varepsilon_{min}=1,79E^{-7}$. Considerando un valor intermedio de $\varepsilon = 6,3E^{-4}$, que permitirá trabajar en una zona segura del SG, que un radio $r=16mm$ para el agujero permite un correcto pegado de los straingauges y una presión máxima esperada de $3MPa$ (Sudduth, K.A., Chung, S.O., Sanchez, P., Upadhyaya, 2008), se obtiene de la Eq. (1) un valor de $t=5,5mm$ para el espesor del anillo.

2.2 Dimensionado de los vínculos flexibles

Para determinar las dimensiones del primer vínculo flexible tipo viga, se busca que la rigidez del mismo en la dirección de aplicación de la fuerza, C_1 , sea despreciable frente a la rigidez del anillo rectangular, pero que sea alta en la dirección perpendicular al plano de la cuchilla, C_2 . Considerando al vínculo como una viga en voladizo de sección rectangular, de altura t_1 y ancho b (espesor de la cuchilla), de longitud L_1 y fuerza aplicada en su extremo, se tiene que el valor de rigidez C_1 , estará dado por la Eq. (2). Mientras que en la dirección perpendicular la rigidez, C_2 , estará dada por la Eq. (3). Luego haciendo $t_1 = b/m$, se tiene que la rigidez en la dirección transversal será $C_2 = m^2 * C_1$. Dado que el espesor de la cuchilla se fijó en $25 mm$, tomando $m=5$ se tiene que $t_1=5mm$ y la rigidez C_2 será 25 veces mayor que C_1 .

$$C_1 = \frac{E \cdot b \cdot t_1^3}{4 \cdot L_1^3} \quad (2)$$

$$C_2 = \frac{E \cdot t_1 \cdot b^3}{4 \cdot L_1^3} \quad (3)$$

El largo L_1 del vínculo flexible quedó definido por las dimensiones de la cuchilla, el espacio disponible y las dimensiones fijadas para el anillo rectangular, quedando $L_1=15,25mm$. Con este valor, la rigidez en la dirección del avance queda en $C_1=45,55 N/\mu m$ lo cual es lo suficientemente bajo comparado con la rigidez del anillo en esa dirección, aproximadamente de $935 N/\mu m$. Mientras que en la dirección perpendicular la rigidez del vínculo queda en $C_2=1138,75 N/\mu m$.

Finalmente para el segundo vínculo flexible se adoptó $t_2=t_1$ y la longitud L_2 se ajustó mediante simulación por elementos finitos al menor valor posible, que lograra un desacople apreciable en la lectura de las deformaciones de los anillos ubicados por encima de la fuerza aplicada. Quedando este valor en $L_2=17,5mm$.

3 MODELADO POR ELEMENTOS FINITOS

Con el objeto de estudiar el comportamiento de la cuchilla se efectuaron simulaciones con el software IDEAS NX 11 que utiliza el método de cálculo por elementos finitos. Mediante simulación se obtienen las constantes de proporcionalidad entre las presiones aplicadas y las deformaciones captadas en cada anillo. Además se plantea un desacople de las mediciones de presión de cada anillo con el objeto de independizar la lectura de cada uno de ellos. Luego se presentan resultados de simulación aplicando diferentes perfiles reales de presión con la profundidad, hallados de manera experimental (Sudduth, K.A., Chung, S.O., Sanchez, P., Upadhyaya, 2008), entre los cuales se tienen aproximaciones lineales, cuadráticas y polinómicas. Las condiciones de contorno que se definen en el software presentan un modelo simplificado de las condiciones reales de trabajo de la cuchilla en los cuales se obviaron los efectos producidos por las fuerzas de rozamiento. Se utilizó un material de características mecánicas similares a las del acero, con módulo de elasticidad de $2e^6 MPa$ y un coeficiente de Poisson de 0,29. En cuanto al mallado, se utilizaron elementos del tipo sólido parabólico tetrahédricos. Se definieron tamaños de elementos de manera local para tener una mayor densidad de elementos en las zonas de interés como en las zonas de pegado de los strain gauges o en zonas de mayor concentración de tensiones como ranuras.

3.1 Descripción del modelo

La cuchilla se diseñó para determinar perfiles de presión de la tierra hasta una profundidad de 300mm, la Figura 5 muestra las principales dimensiones del diseño. Está compuesta por cuatro anillos rectangulares que abarcan la profundidad a medir. Cada anillo posee un orificio de 32mm de diámetro y está unido al cuerpo de la cuchilla mediante vínculos flexibles para mejorar su estabilidad mecánica. El ancho de la cuchilla es de 25mm.

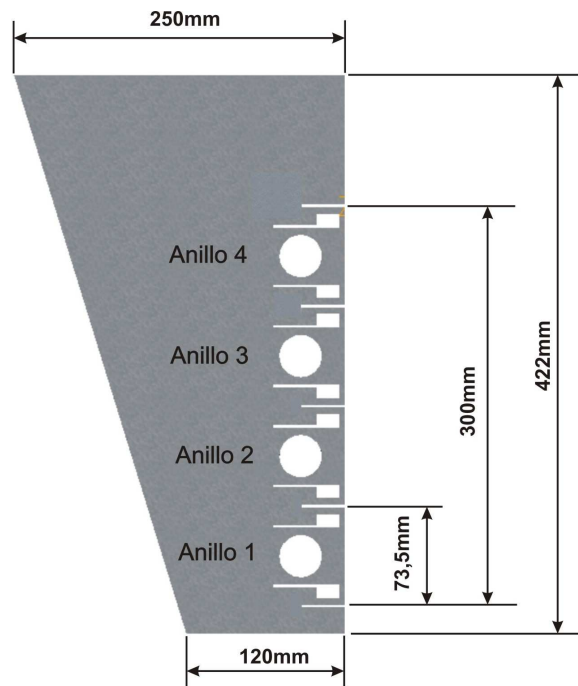


Fig. 5. Principales cotas de la cuchilla.

Para obtener los valores de presión sobre cada anillo, es necesario hallar las constantes que relacionan las deformaciones captadas con las presiones aplicadas sobre cada uno de ellos, tal como indica la Eq. 4.

$$P_i = k_i \cdot \varepsilon_i \quad (4)$$

Donde P_i es la presión media aplicada, k_i es la constante de proporcionalidad y ε_i es la deformación medida en el anillo i . Para obtener el valor de estas constantes se aplicaron distintos valores de presiones de manera independiente sobre cada anillo y se tomaron las deformaciones respectivas como ilustra la Figura 6.

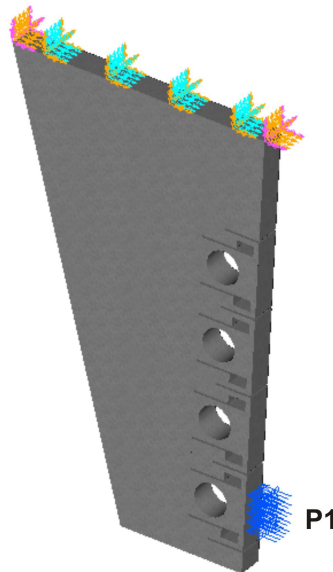


Fig. 6. Presión constante aplicada sobre el anillo 1 y empotramiento.

Dado que la cuchilla se comporta como una viga en voladizo, los esfuerzos que se

producen en los anillos ubicados a mayor profundidad afecten la lectura de los anillos superiores. Si bien la configuración planteada de vínculos flexibles permite mitigar este efecto, aún es apreciable. Para disminuir este acople de las mediciones se propone cancelar, en cada anillo, el efecto que produce una fuerza ubicada por debajo del mismo mediante el sistema de ecuaciones Eq. 5.

$$\begin{aligned}
 P1 &= k_1 \cdot \varepsilon_1 \\
 P2 &= k_2 \cdot (\varepsilon_2 - \varepsilon_{2|P1}) \quad \varepsilon_{2|P1} = \frac{1}{k_{12}} \cdot P1 \\
 P3 &= k_3 \cdot (\varepsilon_3 - \varepsilon_{3|P1} - \varepsilon_{3|P2}) \quad \varepsilon_{3|P1} = \frac{1}{k_{13}} \cdot P1 \quad \varepsilon_{3|P2} = \frac{1}{k_{23}} \cdot P2 \\
 P4 &= k_4 \cdot (\varepsilon_4 - \varepsilon_{4|P1} - \varepsilon_{4|P2} - \varepsilon_{4|P3}) \quad \varepsilon_{4|P1} = \frac{1}{k_{14}} \cdot P1 \quad \varepsilon_{4|P2} = \frac{1}{k_{24}} \cdot P2 \quad \varepsilon_{4|P3} = \frac{1}{k_{34}} \cdot P3
 \end{aligned} \tag{5}$$

En este sistema de ecuaciones P_i es la presión aplicada en cada anillo, ε_i es la deformación medida en el anillo i y $\varepsilon_{i|Pj}$ es la deformación producida en el anillo i debido a la presión P_j (con $j < i$). Además, k_i es la constante obtenida de la Eq.4 y k_{ij} es la constante de proporcionalidad entre la deformación en el anillo i producto de la presión P_j ($j < i$)

La Tabla 1 muestra los valores de deformación obtenidos en cada anillo cuando se aplica una presión de 2MPa sobre uno de ellos. Además se observa que la deformación es aún menor sobre los anillos que están por debajo de la presión aplicada, lo que indica que este efecto se puede despreciar.

Deformaciones	Presión 1	Presión 2	Presión 3	Presión 4
Anillo 1	-1,15E-04	-7,86E-07	-1,41E-08	3,11E-09
Anillo 2	-3,83E-06	-1,17E-04	-7,52E-07	-9,40E-09
Anillo 3	-2,61E-06	-1,84E-06	-1,13E-04	-7,76E-07
Anillo 4	-2,56E-06	-1,70E-06	-1,72E-06	-1,12E-04

Tabla 1: Deformaciones para presiones constantes de 2MPa en cada tramo de la cuchilla.

A partir de los resultados presentados en la Tabla 1, se calculan las constantes k_{ij} de las ecuaciones Eq.5. Luego expresando las presiones en función de las deformaciones ε_i , y reemplazando las constantes, se puede expresar el sistema de ecuaciones Eq.5 en forma matricial, Eq. 6. Esta ecuación permite obtener el valor de la presión aplicada en cada tramo de la cuchilla a partir de la deformación captada en cada anillo, cuyas presiones están expresadas en MPa.

$$\begin{bmatrix} P1 \\ P2 \\ P3 \\ P4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -17369,49 & 0 & 0 & 0 \\ 571,61 & -17173,94 & 0 & 0 \\ 394,38 & 280,11 & -17769,17 & 0 \\ 381,94 & 256,52 & 272,51 & -17876,66 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \end{bmatrix} \tag{6}$$

Para verificar la cancelación del acople de las mediciones se aplicó un perfil escalonado de presiones y se obtuvo la presión en cada anillo a partir del valor de su deformación. La medida de la presión se obtiene a partir de la Eq.4 para el caso en que se presenta acople de las mediciones. Mientras que la aplicación de la Eq.6 permite desacoplar la lectura de las presiones medidas. El perfil aplicado es escalonado con valores de $P_1=2MPa$, $P_2=1,5MPa$, $P_3=1MPa$ y $P_4=0,5MPa$, Figura 7.

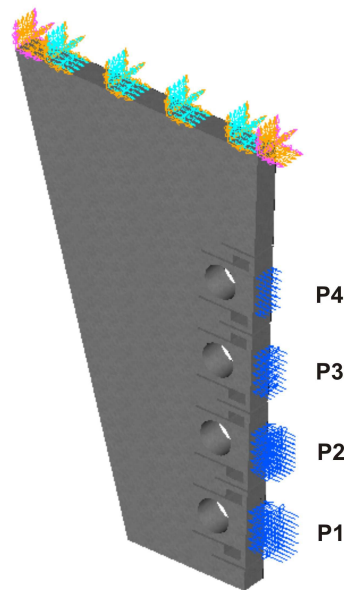


Fig. 7. Perfil de presiones escalonadas y empotramiento.

La Tabla 2 muestra los resultados obtenidos al aplicar el perfil mencionado y las ecuaciones Eq.4 y Eq.6 con los valores de deformación obtenidos mediante simulación. Se puede ver que el error de la medición sin la compensación llega al 17% para el caso más desfavorable (anillo superior) mientras que el error al cancelar el acople no superan el 0,6%. Esto indica que se logra independizar la lectura de la presión aplicada en cada tramo de la cuchilla.

	Presión Aplicada [MPa]	Presión medida sin desacople [MPa]	Error	Presión medida con desacople [MPa]	Error
P1	2,00	2,010	0,48%	2,010	0,48%
P2	1,50	1,573	4,88%	1,507	0,47%
P3	1,00	1,077	7,68%	1,006	0,55%
P4	0,50	0,585	16,91%	0,500	0,07%

Tabla 2: Errores teóricos de medición para una presión de perfil escalonado.

3.2 Resultados de simulaciones

A continuación se presenta el comportamiento de la cuchilla sometido a perfiles de presión reales hallados de manera experimental (Sudduth, K.A., Chung, S.O., Sanchez, P., Upadhyaya, 2008), los cuales tienen aproximaciones lineales, cuadráticas y polinómicas. La Figura 8 muestra los perfiles de presión lineal y cuadrático, aplicado y el empotramiento en la parte superior de la cuchilla.

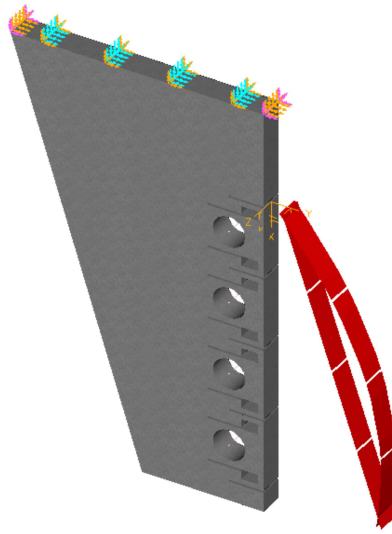


Fig. 8. Perfil de presiones lineal y cuadrático aplicado sobre la cuchilla y empotramiento.

En la Tabla 3 se presenta el error obtenido al comparar el valor medio de presión de la función en el tramo del anillo considerado y el medido a partir de las deformaciones obtenida con el software y luego de aplicar la Eq.6. La tabla muestra el error para los diferentes perfiles aplicados.

Error	Perfil Lineal	Perfil Cuadrático	Perfil Polinómico
Anillo 1	0,71%	0,51%	0,45%
Anillo 2	0,39%	0,56%	0,06%
Anillo 3	0,15%	0,31%	0,12%
Anillo 4	0,19%	-0,01%	-0,22%

Tabla 3: Errores teóricos de medición para presiones de perfil lineal, cuadrático y polinómico.

Se observa que los errores teóricos de medición para los diferentes perfiles son inferiores al 0,71% para todos los casos y en todos los anillos. La Figura 9 muestra el perfil polinómico aplicado y los valores de presión medidos.

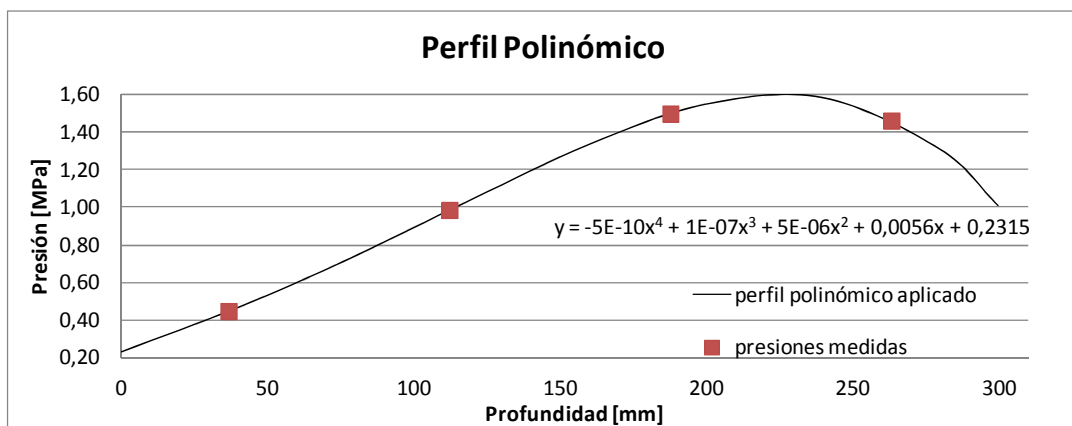


Fig. 9. Perfil de presiones polinómico aplicado y valores medidos.

Finalmente se calcula la presión mínima medible a partir del valor mínimo de deformación medible utilizando el equipamiento disponible y la Eq.6, resultando en una presión de

0,0031MPa. La presión máxima medible es de 25,53MPa, el cuál supera ampliamente el límite elástico del material. Hay que mencionar, que para los casos analizados, los cuales surgen de perfiles reales de presión, nunca se superó el límite elástico del material.

4 CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó el diseño preliminar de una cuchilla para estimar la compactación de los suelos a diferentes profundidades. La cuchilla consta de anillos rectangulares y ranuras convenientemente practicadas en su frente para medir la resistencia al avance. La deformación de estos anillos es captada con strain gauges. Mediante cálculo y simulación por elementos finitos se estableció la relación entre las deformaciones medidas y presiones aplicadas, representativas de la resistencia del suelo. Además se plantea el desacople de las mediciones con la profundidad. Mediante simulación se aplicaron perfiles de presión reales obtenidos experimentalmente, con aproximaciones lineales, cuadráticas y polinómicas. Los errores de las mediciones fueron inferiores al 0,71% para todos los perfiles en las diferentes profundidades. Esto indica un buen grado de desacople e independencia de las mediciones de presión con la profundidad. Además el diseño simple, consta de una sola pieza, posee el grado de robustez necesario para el trabajo en campo y la capacidad de realizar mediciones a diferentes profundidades con errores bajos.

REFERENCIAS

- Adamchuk, V.I., Christenson, P.T.: Development of an instrumented blade system for mapping soil mechanical resistance represented as a second-order polynomial. *Soil & Tillage Research*, 95(1-2), 76-83. (2007)
- Adamchuk, V.I, Ingram, T.J., Sudduth, K.A., Chung, S.O.: On-the-go Mapping of soil mechanical resistance using a linear depth effect model. 51(6), 1885-1894.(2008).
- Adamchuk, V.I, Morgan, M.T., & Sumali, H.: Application of a strain gauge array to estimate soil mechanic impedance on-the-go. *Transactions of the ASABE*, 44(6), 1377-1383. (2001).
- Chung, S.O., Sudduth, K.A., Hummel, J.W.: Design and validation of an on-the-go soil strength profile sensor. *American Society of Agricultural and Biological Engineers* , 49(1), 5-14. (2006).
- Gilandeh, Y.A.: On-the-go soil mechanical strength measurement at different soil depths. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 7, 696-699. (2009).
- Herrera, M.S., Coronel, C.I., Coba, D.L, Cueto, O.G., Bravo, E.L.: Development of a Sensor for Soil Continuous Compaction Measurement. 20(1). (2011)
- Karabay, Sedat. Design criteria for electro-mechanical transducers and arrangement for measurement of strains due to metal cutting forces acting on dynamometers. *Materials & Design*. Volumen 28, Issue 2, 2007, pag. 496 - 506.
- Matias D. Jaliff Perez, Rogelio L. Hecker, Gustavo M. Flores, Desarrollo de un Sistema de Monitoreo para el Proceso de Torneado. *Segundo Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica, II CAIM 2010*, San Juan, Argentina, 16 al 19 de noviembre de 2010.
- Sharifi, A., Mohsenimanesh, A.: Soil mechanical resistance measurement by an unique multi-cone tips horizontal sensor. *Institute of Agrophysics, Polish Academy of Sciences. International Agrophysics* (26), 61-64. (2012).
- Sudduth, K.A., Chung, S.O., Sanchez, P., Upadhyaya, S.K.: Field comparison of two prototype soil strength profile sensors. *Computers and Electronics in Agriculture*, 61(1), 20-31. (2008).