



ASOCIACION ARGENTINA  
DE MATERIALES

# Revista SAM

[www.materiales-sam.org.ar](http://www.materiales-sam.org.ar)

Registro N° ISSN 1668-4788

Volumen 3 Diciembre 2017

## *Premios*

# SABATO

2014-2016



Dr. Rubén Ambrusi



Ing. Diego López



Ing. Rodrigo Taboada



Recordatorio del Dr. Gustavo  
Sánchez Sarmiento



## DISEÑO DE LA TOPOGRAFÍA DE UNA HERRAMIENTA AGRÍCOLA CON PROPIEDADES FUNCIONALES NO-ADHERENTES INSPIRADO EN LA FAUNA DEL SUELO

Rodrigo E. Taboada<sup>1,2</sup>, Adrian Canzian<sup>2</sup>, Omar Tesouro<sup>3</sup>, Eduardo Favret<sup>4,5</sup>

<sup>1</sup> Instituto Sabato, UNSAM - CNEA, rdgtaboada@gmail.com

<sup>2</sup> Universidad Tecnológica Nacional Regional General Pacheco

<sup>3</sup> Instituto de Ingeniería Rural, INTA

<sup>4</sup> Instituto de Suelos, INTA

<sup>5</sup> CONICET



Ing. Rodrigo Taboada

Ingeniero en Materiales y Especialista en Ensayos no destructivos, graduado del Instituto Sabato. Realizó su trabajo de grado en conjunto con el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria de Castelar, la Universidad Tecnológica Nacional de General Pacheco y el Centro Atómico Constituyentes de la Comisión Nacional de Energía Atómica. Actualmente se desempeña en el División de Metalografía y Ensayos Termomecánicos, de la Gerencia de Materiales de dicho centro atómico. El presente artículo es un resumen del trabajo galardonado en los Premios Instituto Sabato 2014-2016, en la categoría: "Trabajo Final de Grado en el Campo de la Ciencia y Tecnología de Materiales".

### RESUMEN

*En el presente trabajo se analiza la modificación de la topografía de una púa escarificadora (SAE 1045) inspirada en la cutícula del bicho toro (*Diloboderus abderus*), con el objetivo de reducir la adherencia del suelo a la misma. Por tal motivo, se reportan los resultados experimentales de diferentes pruebas de campo, que corresponden a púas con distintas distribuciones geométricas de cavidades en su superficie. Asimismo, se investigó la evolución de la mojabilidad con el tiempo de ataque químico, con la finalidad de generar distintas jerarquías de rugosidades, imitando el efecto lotus*

### ABSTRACT

*The present work analyses the modification of the topography of a plowshare (SAE 1045) inspired in the cuticle of a beetle called *Diloboderus abderus*, with the objective of reducing soil adhesion. Therefore, experimental results of different field tests corresponding to several plowshares with different geometric distributions of cavities are reported. Also, the evolution of wettability with time of etching was investigated, in order to generate different scales of roughness, mimicking the lotus effect.*



## INTRODUCCIÓN

### Biomimética, su origen.

La naturaleza ha evolucionado a lo largo de 3800 millones de años. Dicha evolución ha involucrado un desarrollo a multiescala y funcional. De hecho, la naturaleza debe responder a un sinnúmero de estímulos y sollicitaciones (Bhushan, 2009). Tal como lo indicó Charles Darwin en Origen de las Especies: **“No es el más fuerte de las especies el que sobrevive, tampoco es el más inteligente el que sobrevive. Es aquel que es más adaptable al cambio.”**

Esta perfección alcanzada por la naturaleza le permitió establecer cuál es el mejor sistema para evolucionar a lo largo de los años. Es por eso que desde los comienzos de la raza humana, hace aproximadamente 7 millones de años, se ha tratado de imitarla. La naturaleza ofrece modelos efectivos y eficientes para el desarrollo de herramientas mecánicas, algoritmos computacionales y nuevos materiales, además permite aprender nuevos procesos de producción sin polución ni residuos tóxicos. Recién alrededor del 1500 D.C. se tienen evidencias claras de este fenómeno. El pintor, pensador e inventor Leonardo Da Vinci, ideó todos sus diseños basándose en la naturaleza. Tal es el caso del Ornitóptero, inspirado en el vuelo de pájaros.

Se puede citar otro ejemplo, como el Velcro (VELours-CROchet). Este famoso invento fue patentado por el suizo George de Mestral en el año 1950, cuyo desarrollo surgió de analizar la adherencia del abrojo de la flor de cardo. Este sistema de cierre se denomina “Hook-loop” (Favret, 2009). En la misma época el estadounidense Jack Steel y el alemán Otto Schmitt, establecieron los conceptos de **Biónica** y **Biomimetismo**, respectivamente (Bhushan, 2009) (Bar-Cohen, 2006). Dichos términos se propusieron para describir una nueva ciencia interdisciplinaria que englobaba el estudio de sistemas biológicos con la ingeniería para el desarrollo de nuevas tecnologías. El **biomimetismo/biónica** se puede resumir como el diseño, construcción, evaluación y mantenimiento de sistemas artificiales que se inspiren en sistemas vivos.

Si bien, desde siempre la humanidad ha intentado copiar y adaptar los diseños para su

beneficio, sólo en años recientes, gracias a los avances tecnológicos y el desarrollo alcanzado con las diversas técnicas de caracterización, es que se ha podido desentrañar e ingeniar estos nuevos diseños. En efecto, durante 2005 y 2008 se estimó que los ingresos generados a partir de desarrollos biomiméticos fueron de 1,5 mil millones de dólares.

### Nueva generación de herramientas agrícolas.

El laboreo del suelo requiere de un gran consumo de combustible, según investigaciones recientes, el 50% de la energía se pierde debido a la adherencia del suelo a la herramienta. En efecto, el herramental agrícola debe, por un lado, generar un surco y/o remover el suelo, y por otro lado, debe arrastrar el suelo que se adhiere a la superficie de la misma. Recientemente, se ha reportado que la modificación de la topografía de un arado inspirada en la cutícula de un escarabajo (*Copris ochus Motschulsky*), permite reducir en, aproximadamente, un 30% el consumo de energía. Disminuir la adhesión de la tierra en el herramental tiene un gran impacto no solo ecológico sino también económico, ya que permitiría ahorrar combustible y los tiempos de labranza serían menores. Por lo tanto resulta importante encontrar una alternativa que permita mejorar el proceso.

### Técnicas biomiméticas para modificación topográfica superficial.

Es importante destacar que no existe una única técnica que permita reducir la adhesión de suelo al herramental (Lu-Quan Ren, 2001) (Muhammad Azam Khan, 2010).

### Inspiración en insectos del suelo.

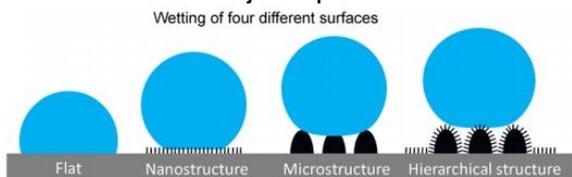
Algunos autores introducen diseños topográficos de la superficie de herramientas agrícolas inspirándose en la distribución de protuberancias de la cutícula de algunos insectos. Chirende *et al.* (Chirende B., 2009) y Ren *et al.* (Lu-Quan Ren, 2001), presentaron patrones de distribución de domos convexos, inspirados en el *Copris ochus Motschulsky*.

Además siguiendo con el análisis de la superficie del insecto, Chirende *et al.* (Chirende B., 2009) exponen que la cutícula posee ciertas características hidrofóbicas.

Adicionalmente, Tong *et al.* (Tong, 2005) investigaron la mojabilidad de la cutícula del escarabajo *Copris ochus Motschulsky* hembra, donde realizaron un análisis del ángulo de contacto estático de la cabeza. Determinaron características hidrofóbicas, con ángulos de contacto entre  $91^\circ$  y  $106,5^\circ$ .

### Otra inspiración, el efecto lotus.

La hoja de loto (*Nelumbo nucifera*) es una planta acuática de origen asiático. En efecto cuando se moja con agua, se forman gotas perfectamente esféricas que con la menor inclinación ruedan por la superficie de la hoja atrapando, de esta manera, las partículas de suciedad que se encuentran sobre la misma. De esta manera la hoja siempre se mantiene limpia (Favret, 2009) (Bhushan, 2011). En el año 1998, los biólogos Barthlott y Neinhuis patentan el llamado efecto loto, con la denominación "Lotus- Effect" (Eur. Pat., EP 0772514, 1998). Dicho efecto permitiría que cualquier agente externo no quede adherido a la superficie, evitando así su deterioro posterior. La superficie de la hoja de loto presenta dos niveles estructurales de rugosidad, el primero micro, debido a las papilas y el segundo nano, formado por cera epicuticular. La estructura jerárquica provee la formación de intersticios de aire, que le permiten reducir el área de contacto, es decir la adherencia. Esto permite que cuando se inclina la hoja de loto, las gotas puedan rodar libremente, atrapando cualquier partícula que se encuentre en su trayectoria. Esta característica es importante de alcanzar en superficies artificiales para, de esta manera, reducir la adherencia de cualquier sustancia sobre la misma. En la Figura 1, se presenta la mojabilidad de cuatro superficies, para poder entender mejor la importancia de la estructura jerárquica.



**Figura 1:** Esquema del mojado de cuatro superficies (Bhushan, 2011). La estructura jerárquica presenta el mayor ángulo de contacto.

Diferentes autores proponen la obtención de una superficie hidrofóbica, por medio del aumento de la rugosidad, lo que genera que la misma se pueda autolimpiarse, tenga baja adherencia y reduzca el arrastre (Mamdouh E. Abdelsalam, 2005) (Qian B., 2005) (Yu, 2010) (Bhushan, 2011) (Alonso Frank, 2014) (Yost FG., 1995) (Shibuichi S., 1996) (Semal S., 1999) (Erbil HY., 2003).

Pero para lograr mejorar la condición de hidrofobicidad o superhidrofobicidad se debe realizar un recubrimiento polimérico (Qian B., 2005) (Yu, 2010) (Alonso Frank, 2014).

Recientemente, investigadores del MIT (Massachusetts Institute of Technology) realizaron una investigación acerca de coatings hidrofóbicos, logrando obtener superficies cerámicas hidrofóbicas duraderas (MIT, 2014). Como se sabe, los cerámicos pueden resistir altas temperaturas y además son más duros que otros materiales utilizados en la industria. Por otro lado, en el Fraunhofer IWN (Institute for Mechanics of Materials), implementaron un recubrimiento de Diamond-Like Carbon (DLC), sobre una púa escarificadora, que mejoró su durabilidad (DLC, 2014).

Teniendo en consideración las técnicas biomiméticas presentadas anteriormente, el trabajo se enfocó en el estudio y el diseño de la topografía de la superficie de varias púas escarificadoras, logrando reducir la adhesión del suelo, y en consecuencia disminuir el consumo de combustible que se emplea en la labranza agrícola. Por otro lado, considerando que la adherencia y la hidrofobicidad están ligadas, tal como puso en manifiesto Tong *et al.* (Tong, 2005), nos propusimos mejorar la condición hidrofóbica de la superficie de la púa. Para ello nos inspiramos en la fauna nativa de nuestro suelo, en particular en el bicho toro (*Diloboderus abderus*) hembra. Para esto, se caracterizó la cutícula de dicho insecto y a partir de allí se diseñó la topografía superficial de la púa. Por último, se realizaron distintas pruebas de campo donde se midió el esfuerzo de tracción, el cual está directamente relacionado con la potencia del equipo motriz.

## DESARROLLO

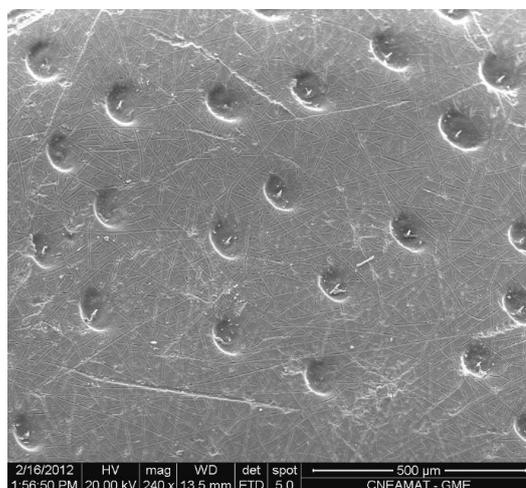
### Análisis del Bicho Toro.

Analizando los insectos que habitan en el suelo de nuestra región, se observa que el bicho toro (*Diloboderus abderus*) hembra (Figura 2), luego de escarbar bajo el suelo, emerge a la superficie sin suelo adherido a su cutícula. Esta es la funcionalidad biomimética que se está buscando. Por este motivo se realizaron observaciones de la cabeza y del tórax, puesto que son las partes del insecto que interactúan más fuertemente con el suelo. Para ello se empleó microscopía electrónica de barrido (SEM FEI Quanta 200), a partir de la cual se determinaron dos escalas de rugosidades, las cuales presentan un orden jerárquico. Utilizando un programa de uso libre (GIMP 2.8) se caracterizó el diámetro y las distancias entre los centros de las cavidades. En la figura Figura 3, se muestra las cavidades correspondientes al tórax del *Diloboderus abderus* hembra. Dichas cavidades representan la primera escala de rugosidad, la segunda es el pelo que aparece en el centro de la cavidad.



**Figura 2:** Bicho toro, *Diloboderus abderus*, hembra.

Una vez finalizado el análisis de las imágenes, en la UTN Regional Grl. Pacheco, se fabricaron púas con distintas densidades y distribuciones de cavidades, manteniendo constante el diámetro y profundidad de las mismas. Por otro lado, una de las púas fue fabricada con protuberancias, ya que en muchos trabajos se reportó la utilización de ellas para reducir la adherencia (Lu-Quan Ren, 2001) (Chirende B., 2009).



**Figura 3:** Imagen SEM de las cavidades del tórax del Bicho Toro.

### Pruebas de campo.

Todos los ensayos de campo fueron realizados en INTA-Castelar, en un terreno de aproximadamente 2 hectáreas, empleando cuatro sitios con morfología homogénea y un apareamiento aleatorio de púas.

Para poder tomar los datos de la fuerza de tracción requerida por la púa se utilizó un instrumento de captura de fuerza triaxial (Figura 4), diseñado y desarrollado en el laboratorio de Terramecánica e Implantación de Cultivos (IIR-INTA Castelar-Argentina). Dicho equipo fue diseñado como parte del proyecto INTA PE AEAI 1703 "Mejoramiento de la implantación de los principales cultivos". El dispositivo permite medir las reacciones del suelo en los órganos activos (púas) probados en las direcciones axial, vertical y transversal en relación con la dirección del movimiento, además de la velocidad de avance instantánea y la profundidad de trabajo.



**Figura 4:** Instrumento de captura de fuerza triaxial.



Todos los ensayos fueron realizados bajo la misma condición, donde los órganos activos se los hacía recorrer una trayectoria de aproximadamente 100 metros, siendo la velocidad efectiva de 1,5 m/s. La púa se ubicaba a una profundidad media de 150 mm, siendo su surco la unidad experimental. El equipo posee cinco celdas de carga que toman toda la información a lo largo del proceso. En particular nos centraremos en la información provista por la celda de carga denominada F1, la cual nos provee el esfuerzo de tracción del equipo motriz debido a la interacción del órgano activo y el suelo. Todo el proceso fue almacenado de forma digital, por una computadora ubicada en el tractor. En todos los ensayos se midieron los parámetros del suelo a fin de caracterizar su humedad gravimétrica porcentual.

### **Análisis de la mojabilidad.**

Tal como fue mencionado anteriormente, la mayoría de los trabajos, para mejorar las características hidrofóbicas o superhidrofóbicas en materiales metálicos, constan de dos etapas. En la primera, se modifica la topografía de la superficie y en la segunda etapa se recurre a un recubrimiento, en general un polímero. Pero como ya lo anticipamos, este último podría desprenderse ante la acción abrasiva del medio, como en este caso el suelo. Por ello se decidió llevar adelante un estudio prospectivo de dichas etapas, pero a nivel de laboratorio y con probetas del acero SAE 1045, dado los límites de tiempo que se disponían.

De esta manera, para la primera etapa se analizó la evolución de la mojabilidad con el tiempo de ataque químico. Desde el punto de vista metalográfico existen diferentes soluciones que se pueden utilizar (Petzow, 1999) (Vander Voort, 2004). En este trabajo se priorizaron aquellas que: a) provocaran un daño superficial considerable y b) que sean aplicables a escala industrial. Por ello se decidió emplear persulfato de amonio y Nital 10%. Asimismo, en función del trabajo de Alonso Frank *et al.* (Alonso Frank, 2014), se investigó la modificación de una superficie mediante un granallado o arenado. Para la segunda etapa se decidió emplear un recubrimiento por plasma de carburo de silicio (SiC).

En nuestro caso contamos con dos partidas de un SAE 1045, provistas por la Cía. Panamericana. La primera de ellas, denominada P2012, se encontraba laminada con enfriamiento controlado, en cambio la segunda, denominada P2014, solo estaba laminada. En ambos casos se midió el tamaño de grano, según la norma ASTM E112, y la dureza. Se obtuvieron 61 probetas de P2012 y 25 de P2014, de tamaño 10 x 13 x 5 mm.

Un conjunto de muestras de la partida P2014 se destinaron a la prueba de granallado, empleando una granalladora con un compresor Pecinelec, donde la granalla utilizada era de malla 80 (media). Las variables del proceso fueron la presión y el tiempo, por lo cual se armaron dos grupos de dos probetas, donde en uno se mantuvo la presión constante y se varió el tiempo y en el segundo se modificó la presión pero se mantuvo el tiempo constante. Cabe aclarar que no se pudo controlar el ángulo de incidencia de la granalla, ya que el equipo no lo permitía.

Para caracterizar la mojabilidad de la superficie se recurrió a la medición del ángulo de contacto estático. Para ello se empleó una micropipeta que depositaba una gota de agua destilada de 5  $\mu$ l (Huagei 5G). Para las probetas P2012 se utilizó un medidor de perfiles de la UTN Regional de Grl. Pacheco, mientras que para las probetas P2014 se construyó un equipo para tal fin, que constaba de un soporte y de un microscopio digital; las imágenes obtenidas por dicho microscopio fueron analizadas con el programa GIMP 2.8.

## **RESULTADOS**

### **Análisis del Bicho Toro. Variables características.**

Las imágenes SEM permitieron obtener la densidad de cavidades. Por otro lado, dado que las cavidades no tienen una forma circular perfecta se decidió medir distintos diámetros y efectuar el promedio entre ellos. Otra dimensión característica importante es la distancia entre las cavidades. A continuación se detallan los valores obtenidos de las variables características:

- Densidad media de cavidades:  $12,97 \pm 4,19$  Cavidades/mm<sup>2</sup>.

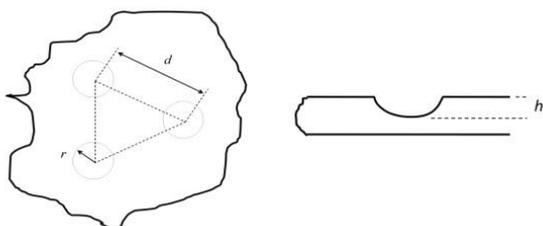
- Diámetro medio de las cavidades del bicho toro ( $\bar{D}_{CBT}$ ):  $70,76 \pm 11,36 \mu\text{m}$ .
- Distancia entre cavidades ( $\bar{L}_{CBT}$ ): Aprox.  $300 \mu\text{m}$ .

### Diseño de la púa.

Diseñar la superficie de la púa exactamente igual a la cutícula del bicho toro resulta imposible, más si se la desea fabricar de manera industrial. Por lo tanto se necesitan realizar algunos supuestos o aproximaciones para lograr un acercamiento a la funcionalidad que se está buscando. A raíz de lo anterior, se supuso:

1. Todas las cavidades son círculos del mismo diámetro ( $2r$ ) y profundidad ( $h$ ).
2. Las distancias entre cavidades es la misma ( $d$ ).
3. Las cavidades se distribuyen de acuerdo a los vértices de un triángulo equilátero.

La Figura 5, resume todas las consideraciones anteriores.



**Figura 5:** Relación entre el radio y la distancia entre cavidades.

El siguiente paso consistió en definir un factor de escala ( $F_e$ ) que relacione una dimensión característica del bicho toro y de la púa. En nuestro caso tomamos el diámetro de una cavidad del tórax ( $70,76 \mu\text{m}$ ), como dimensión característica del insecto y consideramos como característica de la púa, un diámetro de cavidad de  $2 \text{ mm}$ .

Por lo tanto:

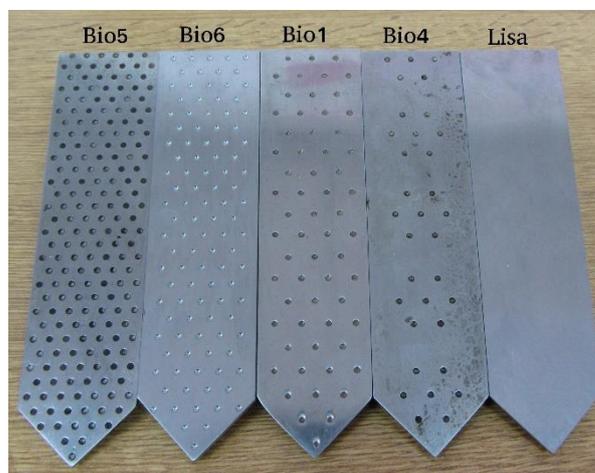
$$F_e = \frac{D_{Herramienta}}{D_{Insecto}} \cong 30 \quad (1)$$

A partir de la ec. 1 y de las suposiciones anteriores se llega a:

$$r = \frac{\bar{D}_{CBT} 30}{2} \cong 1 \text{ mm} \quad (2)$$

$$d = \bar{L}_{CBT} 30 \cong 10 \text{ mm} \quad (3)$$

En función de lo anterior se diseñaron diferentes púas, variando la distribución de cavidades y densidad de las mismas en la superficie de la púa, pero siempre manteniendo los mismos valores de referencia anteriormente establecidos. En la Figura 6, se pueden observar algunas de las púas fabricadas, además se destaca que el arreglo de cavidades mantiene una distribución hexagonal. Dicho patrón es observado en gran variedad de especies en la naturaleza, por lo que se adoptó para el diseño de las mismas.



**Figura 6:** Imagen de algunas de las púas fabricadas.

### Pruebas de campo.

En total se realizaron cuatro pruebas de campo, donde se probaron distintos diseños de púa. En cada caso se contrastó contra una púa lisa, que se tomó como púa testigo. En la TABLA I, se presentan los valores obtenidos de la fuerza de tracción  $F_1$  para cada ensayo.

**TABLA I:** Resultados de las pruebas de campo.

Prueba N°	Púas	Fuerza de Tracción (kg)
1	Lisa	109,68 ± 2,25
	Bio1	101,97 ± 2,00
2	Lisa	126,44 ± 1,93
	Bio1	122,58 ± 1,94
	Bio2	140,63 ± 2,00
3	Lisa	145,19 ± 2,46
	Bio1	141,43 ± 2,48
	Bio3	148,52 ± 2,54
4	Lisa	100,19 ± 2,00
	Bio1	96,24 ± 1,52
	Bio4	96,16 ± 1,58
	Bio5	98,04 ± 1,60

Para los cuatro ensayos de campo se obtuvo que la púa Bio1 siempre presentó la menor fuerza de tracción respecto de la púa lisa o patrón. Ahora bien, esta fuerza está directamente relacionada con la que tiene que ejercer el propio tractor y por lo tanto está vinculada con el consumo de combustible. Por otra parte se observa que no necesariamente cualquier modificación de la topografía de la superficie de la púa provoca una menor fuerza de tracción respecto de la lisa. Todo lo anterior nos llevó a definir un rango de densidad de cavidades. Para ello se definió una densidad planar corregida ( $PD_C$ ) que tiene en cuenta que, en el diseño de la unidad morfológica (Figura 5), se debe considerar las cavidades parciales o incompletas que son las que se ubican en los bordes de la herramienta.

$$PD_C = \frac{\pi r^2/2}{\frac{\sqrt{3}d^2 N + \sum n_i}{4}} = \frac{2\pi}{\sqrt{3}} \left(\frac{r}{d}\right)^2 \frac{N}{N + \sum n_i} \quad (4)$$

Donde N corresponde al número de las cavidades reales y  $n_i$  a la fracción de cavidades en el borde del herramental. Por lo tanto se tiene que:

$$0,016 < PD_C < 0,0945$$

Pero el resultado anterior, además, demuestra que existe una relación entre el radio de la cavidad (r) y la distancia entre ellas (d) que cumple:

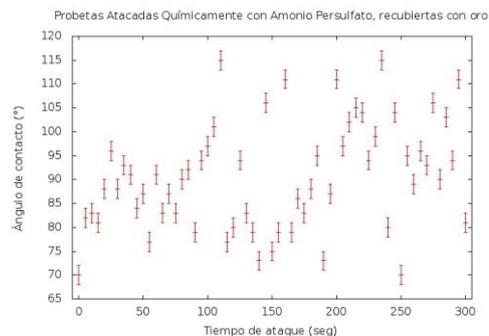
$$0,016 < r/d < 0,0945 \quad (5)$$

Si consideremos las dimensiones obtenidas para el bicho toro, encontramos que  $r/d=0,03564 \text{ mm}/0,3 \text{ mm}=0,1188$  y como se puede apreciar cumple con la relación establecida en la ecuación (5). Se puede concluir que esta última ecuación nos da un rango de valores para generar patrones de densidades de cavidades sobre una púa escarificadora.

### Análisis de la mojabilidad.

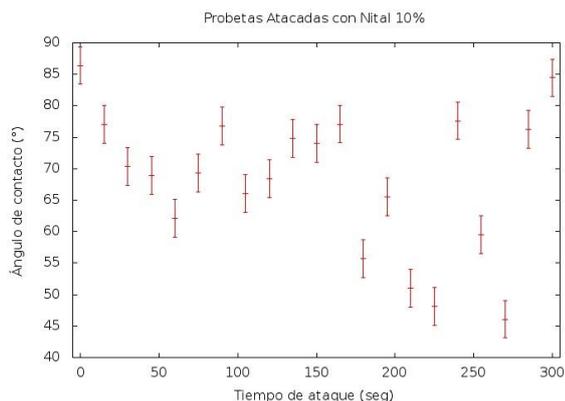
#### Probetas atacadas químicamente.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se presentan los resultados obtenidos para la partida P2012, la cual fue atacada químicamente con Persulfato de Amonio. Se aprecia que los ángulos de contacto varían alternando máximos y mínimos. Además se observa que el ataque empleado presenta, en algunos casos, una mejora en la condición de no mojabilidad, pues se vuelven más hidrofóbicas. El máximo valor se obtiene para un tiempo de ataque de 110 segundos con un ángulo de  $115,61 \pm 2^\circ$ . En otras palabras se observa, aproximadamente, un aumento del 65% con respecto a la probeta sin tratar. Se evidencia, además, que para ataques por debajo de los 100 segundos, los ángulos oscilan entre  $80^\circ$  y  $100^\circ$ , en cambio por encima oscilan entre los  $70^\circ$  y  $120^\circ$ .



**Figura 7:** Ángulos de contacto de las probetas atacadas con una solución de persulfato de amonio y agua.

Para la partida P2014 se utilizó Nital 10% (Figura 8). Para este ataque se observa que la condición de mojabilidad mejora con el tiempo, a diferencia de lo observado anteriormente (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Además se puede apreciar que hasta tiempos de 150 segundos de ataque, la dispersión de ángulos es baja promediando un ángulo de 70°. En cambio para valores mayores la dispersión aumenta. Posteriormente, algunas probetas de esta partida fueron recubiertas por plasma con SiC. Mediante este procedimiento se logró una disminución del 6,5% en la condición de mojabilidad, con respecto a las probetas sin recubrimiento, sin embargo, no alcanzó los valores indicados para el otro ataque químico.



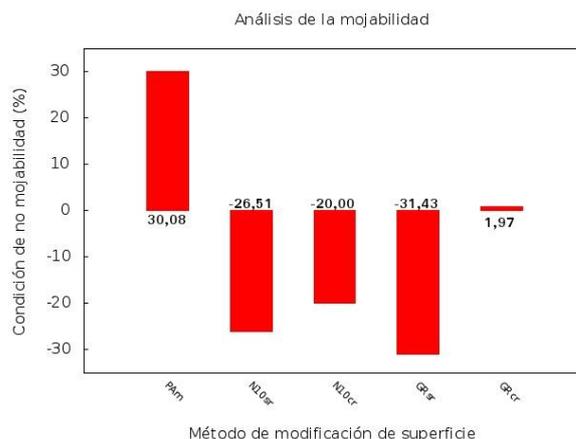
**Figura 8:** Ángulos de contacto de las probetas atacadas con una Nital 10%, previas a ser recubiertas.

### Probetas granalladas.

En este caso se encontró un ángulo de contacto promedio de 57°, siendo el inicial de 85°. Lamentablemente se observa que luego del ataque, disminuye el ángulo de contacto respecto de la sin granallar. En cambio, luego de realizado un recubrimiento por plasma con SiC, se obtuvo una mejora notable en la condición de hidrofobicidad del orden del 30%.

A modo de resumen, en la Figura 9, se puede observar la variación de la mojabilidad del acero en función del método utilizado para obtener la estructura jerárquica. Se aprecia que al atacar las muestras con persulfato de amonio se obtiene el mayor descenso en la

mojabilidad. Por otro lado, para la partida P2014 se ve que tanto para el ataque como para el granallado, las probetas sin recubrir aumentaron su mojabilidad mientras que al recubrirlas aumentó el ángulo de contacto. Para las probetas granalladas se observa el mayor aumento.



**Figura 9:** Análisis de la mojabilidad. PAm corresponde a Persulfato de Amonio, N10 para Nital 10% y GR Granallas; sr y cr significa sin y con recubrimiento respectivamente.

### CONCLUSIONES

A partir de lo anterior podemos resumir las siguientes conclusiones:

Se demostró que se puede lograr un ahorro de combustible del orden de 7% si se modifica la topografía de la superficie de una púa. Más aún, encontramos un rango de valores para implementar una distribución de cavidades siguiendo, lo que denominamos una unidad morfológica, y tal que se cumpla  $0,067 < r/d < 0,161$ . Como punto a destacar, todas las pruebas fueron practicadas en campo, a diferencia de la mayoría de los trabajos relacionados, que informan resultados en condiciones ideales de trabajo (laboratorio).

Se analizaron técnicas para incrementar la hidrofobicidad de la superficie de un acero SAE 1045 con la finalidad de incorporarlas a la superficie de una púa biomimética. Por lo estudiado hasta ahora, la utilización de persulfato de amonio presenta un mayor porcentaje de aumento del ángulo de contacto.



Por último, y dado que la púa debe interactuar en un medio abrasivo se encontró que un recubrimiento por plasma (CVD) mejora en todos los casos la condición de no mojabilidad, al aumentar el ángulo de contacto.

## REFERENCIAS

- [1] F.M. Alonso, A.R. Boccaccini, S. Virtanen, "A facile and scalable method to produce superhydrophobic stainless steel surface", *Applied Surface Science*, 311 (2014), pp. 753–757.
- [2] Y. Bar-Cohen, "Biomimetics using nature inspire human innovation", *Inspiration & Biomimetics*, 1, 1 (2006), pp. 1–12.
- [3] B. Bhushan, "Biometrics: lessons from nature-an overview", *Philosophical Transactions*, 367 (1983), pp. 1445–1486.
- [4] B. Bhushan, Y.C. Jung, "Natural and biomimetic artificial surfaces for superhydrophobicity, self-cleaning, low adhesion, and drag reduction", *Progress in Materials Science*, 56, 1, (2011), pp. 1–108.
- [5] B. Chirende, L. Jianquiao, "Review on application of biomimetics in the design of agricultural implements", *Biotechnology and Molecular Biology Reviews*, 4, 2 (2009), pp. 42–48.
- [6] H.Y. Erbil, A.L. Demirel, Y. Avci, "Transformation of a simple plastic into a superhydrophobic surface", *Science*, 299, (2009), pp. 1377–1380.
- [7] E. A. Favret, "La biología inspira nuevos desarrollos tecnológicos en el campo de los materiales y a la ingeniería", *Revista de la Sociedad Argentina de Materiales*, 5, 1 (2009), pp. 2–13.
- [8] G. Vander Voort, "Metals Handbook, Metallography and Microstructures", *ASM International*, 9 (2004).
- [9] L.Q.R.J. Tong, J.Q. Li, B.C. Chen, "Soil Adhesion and Biomimetics or Soil-engaging Components: a Review, *Journal Agric. Eng. Res.*, 79, 3 (2001), pp. 239-263.
- [10] E. Mamdouh, P.N. Bartlett, T. Kelf, J. Baumberg, "Wetting of Regularly Structured Gold Surfaces", *School of Chemistry and School of physics and Astronomy, University of Southampton*, 21 (2005), pp. 1753–1757.
- [11] M. A.K.R. Qaisrani, L. J. Qiao, "The Techniques of Reducing Adhesion and Scouring Soil by Bionic-Review of Literature", *Advances in Natural Science*, 3, 2, (2010), pp. 41-50.
- [12] G. Petzow, "Metallographic Etching", *ASM International*, 2nd (1999).
- [13] Q. B. Shen, Z. Langmuir, "Fabrication of Superhydrophobic Surfaces by Dislocation-Selective Chemical Etching on Aluminum, Copper and Zinc Substrates", (2005), pp. 9007-9009.
- [14] S. Semal, T.D. Blake, V. Geskin, M. L. Ruijter, G. Castelein and J. De Coninck, "Influence of surface roughness on wetting dynamics", *Langmuir*, 15, (1999), pp. 8765–8770.
- [15] S. Shibuichi, T. Onda, N. Satoh and K. Tsujii, "Super-water-repellent surfaces resulting from fractal structure", *J. Phys. Chem.*, 100, (1996), pp.19512–19517.
- [16] J. Tong, J. Sun, D. Chen, S. Zhang, "Geometrical features and wettability of dung beetles and potential biomimetic engineering applications in tillage implements, *Soil and Tillage Research*, 80,1-2, (2005), pp.1-12.
- [17] G.G. Yost, J. R. Michael, E.T. Eisenmann, "Extensive wetting due to roughness", *Acta Metall. Mater.*, 45, (1995), pp. 299-305.
- [18] Z.Yu, Y. Yu., Y. Li, S. Song, S. Huo and X. Han, "Preparation and Characterization of Super-Hydrophobic surfaces on Aluminum and Stainless Steel Substrates", *Surface Review and Letters*, 17, 3, (2010), pp. 375-381.