

## Ensayos

# Pruebas de doblado

## a láminas metálicas recubiertas por triboadhesión

### Resumen

Este artículo muestra los resultados numéricos y experimentales de los límites de resistencia al doblado de láminas metálicas AISI 1018 y AISI 304 recubiertas con fierro silicio por la técnica de triboadhesión. También se describe el proceso de triboadhesión. El análisis se realizó mediante micrografías tomadas a la zona de doblado y simulaciones del proceso de doblado por elementos finitos. Los límites de doblado se indican mediante el ángulo y el radio que deben doblarse las láminas recubiertas. Además, se muestra que el recubrimiento realizado por la técnica de triboadhesión tiene una excelente adhesión, ya que no se desprende aun cuando comienza a fracturarse el material base.

### Abstract

This paper shows the numeric and experimental results from the resistance limits to the bent of metallic sheets AISI 1018 and AISI 304 coated with iron silice by the triboadhesion technique. It also described the process of triboadhesion. The analysis was carried out by means of micrographics taken to the area of having bent and simulations of the process of having bent by finite elements. The limits of having bent are indicated by means of the angle and the radius to which it should bend the coated sheets. Also, it is shown that the coat carried out by the triboadhesion technique has an excellent adhesion, since it doesn't come off even when it begins to fracture

### Abstrait

Cet article montre les résultats numériques et expérimentaux des limites de résistance à la torsion de plaques métalliques AISI 1018 et AISI 304 recouvertes de fer silicium avec la technique de "triboadhésion". On y décrit aussi le processus de "triboadhésion". L'analyse a été réalisée grâce à des micrographies prises sur la zone de pliage et à des simulations du processus de torsion par des éléments finis. Les limites de torsion sont indiquées en fonction de l'angle et du rayon selon lesquels doivent se plier les plaques recouvertes. De plus, on montre que le recouvrement réalisé avec la technique de "triboadhésion" permet une excellente adhésion, puisqu'elle ne se détache pas, même quand le matériel de base commence à se fracturer.

PALABRAS CLAVE: Doblado, Triboadhesión, Grieta.

### INTRODUCCIÓN

Los estudios experimentales, analíticos y numéricos preliminares al diseño y construcción de nuevos productos, requieren de pruebas que determinen las propiedades de los materiales que se utilizan..

Sin embargo, un aspecto distinto de los materiales de construcción auxiliares, tales como los recubrimientos y materiales de uso específico, requieren de cualidades o propiedades particulares, cuya determinación se realiza mediante ensayos especiales.

Las pruebas de doblado se conducen para determinar la calidad de los recubrimientos y del material base. Esta calidad se evalúa al especificar la magnitud del radio más pequeño al cual un espécimen puede ser doblado sin que se agrieten las fibras exteriores o sin que se desprege el recubrimiento. De esta forma, el límite de doblado es comúnmente llamado el radio de doblez, y se expresa en múltiplos

\* Omar Olvera Tapia  
\*\* J. M. Rodríguez Lelis,  
\*\* J. Colín Ocampo,  
\*\* J. Porcayo Calderón

\* Profesor Investigador de la Universidad del Papaloapan  
\*\* Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico  
Departamento de Ingeniería Mecánica

del espesor  $t$ . Por lo que, un material con un radio de doblez mínimo de  $3t$ , puede ser doblado sin agrietarse, con un radio de tres veces el espesor del espécimen [1].

La mayor parte de las aplicaciones de recubrimientos tienen el propósito de aumentar la vida útil del material base, a través de modificar las propiedades de la superficie del material, independientemente de las propiedades del material base, sin embargo, es extremadamente importante que los recubrimientos se adhieran sin degradar el material base [2].

Los resultados de las pruebas que se presentan en este artículo, caracterizan los recubrimientos realizados mediante la técnica triboadhesión, palabra que proviene del griego *tribos* que significa frotamiento y de *adherir* del latín *ad*, y *herere* que significa estar unido.

Esta tecnología de aplicación de recubrimientos a base de diamante por medio de fricción seca o triboadhesión, la dio a conocer el físico Erns Nagy [3] en 1993, cuyo costo es inferior a los trabajos existentes, particularmente comparada con las tecnologías de deposición química de vapor, para recubrimientos del mismo tipo.

Rodríguez [4] desarrolló el proceso de deposición en superficies metálicas por medio de triboadhesión, para la formación de recubrimientos protectores. De inicio la deposición se realizó al utilizar como material de aporte pintura para cemento en polvo y como material base lámina galvanizada. Posteriormente, se realizaron recubrimientos sobre acero para rodamientos, cobre y acero inoxidable AISI 304; utilizando diamante y fierro-silicio [5] con material de aporte. Así mismo, se llevó a cabo la evaluación de dureza y desgaste [6].

Más tarde Rodríguez [7] continuó con estudios de triboadhesión; y desarrolló un modelo para la evaluación teórica de temperaturas interfaciales inducidas por el proceso de triboadhesión, en donde estableció que el comportamiento de las temperaturas está determinado por la velocidad de deslizamiento, el trabajo de adhesión y el área de contacto real.

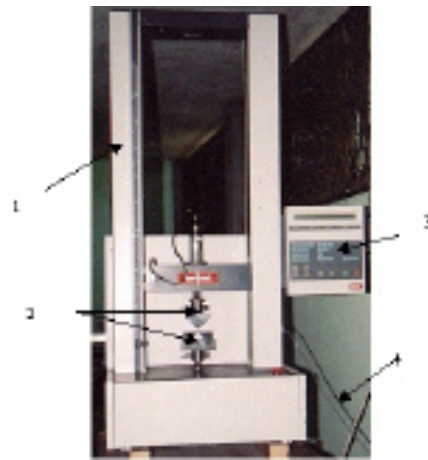
Para caracterizar los recubrimientos, Olvera [8], realizó pruebas de doblado y simulaciones del proceso para determinar los límites en el que el recubrimiento y el material base se puedan doblar obteniendo resultados que se dan a conocer en el presente artículo.

## Proceso de Doblado

El proceso de doblado de láminas metálicas es una operación que consiste en flexionar una porción de la lámina hasta obtener una curva determinada [9]. Generalmente,

las pruebas se realizan al aplicar una fuerza transversal al espécimen en el que se hace el doblado, frecuentemente a la mitad de la longitud [10].

Con el fin de lograr uniformidad, eficiencia, calidad, y de poder medir adecuadamente una propiedad que sea suficientemente básica y representativa para utilizarse directamente en el diseño, el proceso del diseño del doblado se sustentó en los siguientes estándares: Standard Terminology Relating to Methods of Mechanical Testing [11], Standard Test Method for Semi-Guided Bend Test for Ductility of Metallic Materials [10], Standard Test Methods for Adhesion of Metallic Coating [12], Standard Test Methods for Mandrel Bend Test of Attached Organic Coating [13].



Fotografía 1. (1) Máquina universal modelo LR50K Ibertest. (2) Dispositivo de doblado. (3) Consola de control manual, (4) Puerto de comunicación con PC

En la fotografía 1 se muestra el dispositivo de doblado junto con la máquina universal que se utiliza para controlar y registrar la fuerza, velocidad y desplazamiento.

## Deposición

El proceso consiste en hacer girar un disco de algodón a altas velocidades sobre la superficie del material base, de tal forma que el recubrimiento en polvo se deposita por fricción y difusión sobre la superficie del sustrato.

En la fotografía 2 se muestra el dispositivo de deposición por triboadhesión. El disco de algodón (1) es impulsado por un motor (2) que gira a una velocidad máxima de 25000 rpm, que se controla por un variador de voltaje (3), al mismo tiempo un sistema de alimentación del material de aporte (4) suministra el recubrimiento en forma de polvo entre el material base (5) y el disco. La fuerza de contacto se obtiene mediante un sensor de carga (6) y un adquisidor de datos.



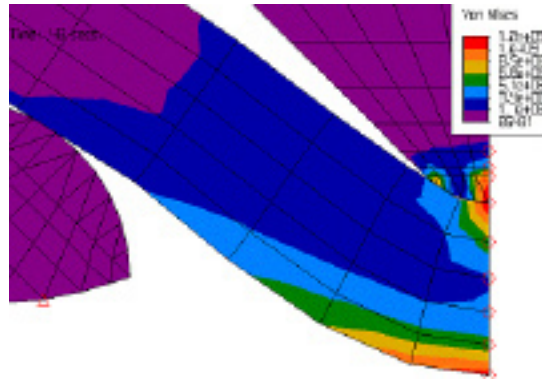


Figura 2. Simulación del doblado de la lámina de acero AISI 304 a 90° y con un radio de 0.45 mm. 80% del proceso de simulación. La tabla muestra los esfuerzos en Pa.

## Resultados experimentales

El análisis experimental de esfuerzos se efectúa al doblar la probeta recubierta a un ángulo y radio determinado; y al evaluar si ocurre la fractura, ó con el tamaño de grieta encontrada en la superficie de tensión del espécimen, después del doblado [10][12]. Se considera grieta a la fisura observable a 150X. Esta se presenta en forma perpendicular al esfuerzo de tensión.

En función de las normas mencionadas, se utilizó un microscopio de barrido electrónico para observar grietas a 150X en la superficie de los especímenes doblados. Los resultados experimentales se resumen en la tabla 1

Tabla 1. Resumen de resultados experimentales. Inspección a 150X a través del microscopio de barrido electrónico.

R <sub>i</sub> (mm)	Especímen sin recubrir		Especímen recubierto de fierro-silicio	
	$\sigma_{1018}$ (Grieta)	$\sigma_{304}$ (Grieta)	$\sigma_{1018}$ (Grieta)	$\sigma_{304}$ (Grieta)
0.25	No	Si	No	No
0.45	No	Si	No	No
0.91	No	No	No	No

En la tabla 1. se muestra que los especímenes doblados del acero AISI 1018 no presenta grietas en la superficie, tanto recubiertos de fierro-silicio como sin recubrimiento.

En el doblado de los especímenes del acero AISI 304 sin recubrir, presentan grietas al doblarse con un radio de 0.25 mm y 0.45 mm a un ángulo de 90°; mientras que con un radio de 0.91 mm y con el mismo ángulo no presenta grietas. En contraste los especímenes recubiertos no presentan grietas con los radios especificados.

Para el análisis experimental de esfuerzos en las láminas de acero AISI 304 sin recubrir y recubiertas de fierro-silicio,

se presentan los siguientes resultados:

En las micrografías 1 y 2 se muestran las superficies sin recubrimiento y con recubrimiento respectivamente, antes de someterlas al proceso de doblado. El número de aumentos es de 150X.



Micrografía 1. Superficie sin recubrir y sin doblar

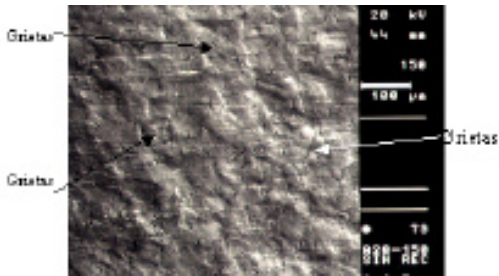


Micrografía 2. superficie recubierta y sin doblar

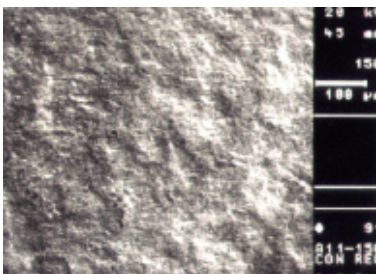
Se observa en la micrografía 1 el desbaste de la lija en forma de surcos. Posterior al proceso de deposición, en la micrografía 2 se muestra la misma superficie con un recubrimiento uniformemente distribuido

Las micrografías 3 y 4 muestran las superficies del acero AISI 304 sometidas al proceso de doblado sin recubrimiento y con recubrimiento respectivamente. El doblado se realizó con el dado émbolo de un radio de 0.25 mm y un ángulo de 90°.

En la micrografía 3 se puede apreciar una superficie con grietas. Mientras que en la micrografía 4 se observa la superficie sin grietas.

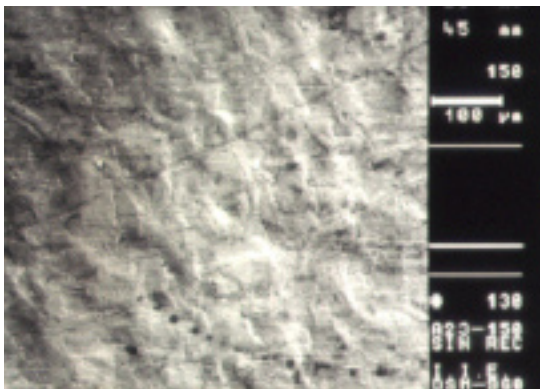


Micrografía 3. Superficie sin recubrir, acero AISI 304, radio de 0.25 mm y a ángulo de 90°.

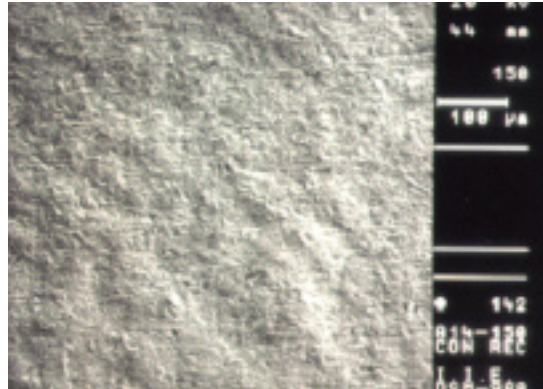


Micrografía 4. Superficie recubierta de FeSi, acero AISI 304, radio de 0.25 mm y a ángulo de 90°

Nuevamente, en las micrografías 5 y 6 muestran las superficies del acero AISI 304 sometidas al proceso de doblado sin recubrimiento y con recubrimiento respectivamente, sin embargo, para este caso, el doblado se realizó con el dado émbolo C de un radio de 0.91 mm y un ángulo de 90°. Se puede apreciar que ambas superficies se muestran sin grietas



Micrografía 5. Superficie sin recubrir, acero AISI 304, radio de 0.91 mm y a ángulo de 90°.

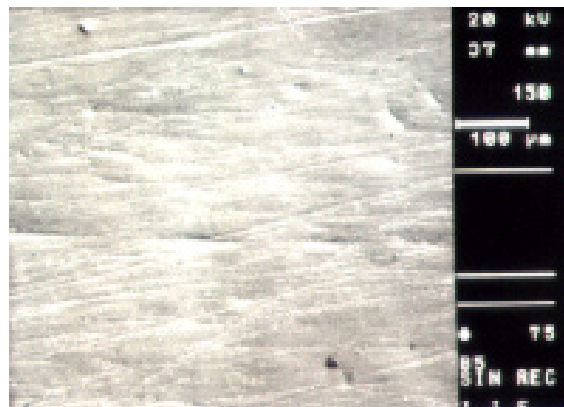


Micrografía 6. Superficie recubierta de FeSi, acero AISI 304, radio de 0.91 mm y a ángulo de 90°.

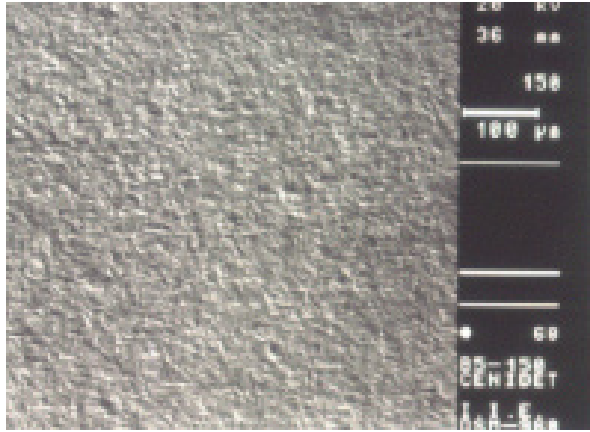
Por tanto, de lo anterior se concluye que los límites de resistencia al doblado de lámina de acero AISI 304 sin recubrimiento es un radio de 0.91 mm ó el espesor equivalente de la lámina, para un ángulo de 90°. Mientras que las láminas recubiertas por triboadhesión con hierro-silicio no presentan límites bajo las condiciones enunciadas en este trabajo.

Del análisis experimental de esfuerzos correspondiente al acero AISI 1018 recubierto con hierro-silicio se presentan los resultados siguientes:

En las micrografías 7 y 8 se muestran las superficies sin recubrimiento y con recubrimiento respectivamente, antes de someterlas al proceso de doblado



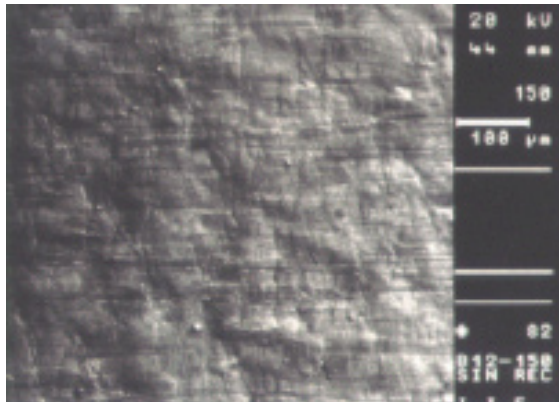
Micrografía 7. Superficie sin recubrir y sin doblar, acero AISI 1018.



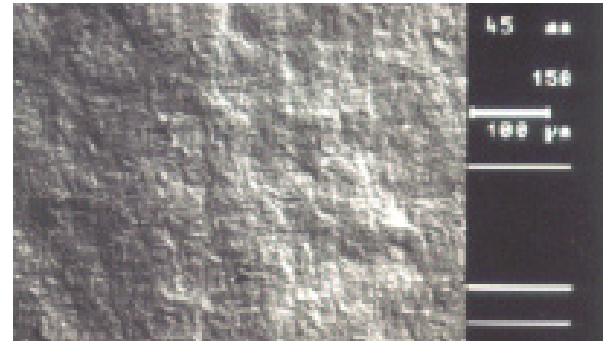
Micrografía 8. Superficie recubierta de FeSi y sin doblar, acero AISI 1018.

Nótese en la micrografía 7 el desbaste de la lija en forma de surcos, posterior al proceso de deposición, la micrografía 8 presenta una superficie con un recubrimiento uniformemente distribuido.

Por otra parte, en las micrografías 9 y 10 se muestran las superficies de las láminas sin recubrir y con recubrimiento respectivamente, sometidas al doblado con el dado émbolo de radio 0.25 mm., ambas se observan sin grietas, aún cuando en la micrografía 9 se observa material aglomerado, sin embargo, no se considera como grieta de acuerdo a lo establecido.



Micrografía 9. Superficie sin recubrir, acero AISI 1018, radio de 0.25 mm y a ángulo de 90°.



Micrografía 10. Superficie recubierta de FeSi, acero AISI 1018, radio de 0.25 mm y a ángulo de 90°.

De lo anterior se concluye que el acero AISI 1018 no presenta límites de doblado bajo las condiciones mencionadas en este trabajo, principalmente en las láminas recubiertas con fierro-silicio.

Con respecto a la adhesión, es considerada de buena calidad, ya que no presenta falla cohesiva ni adhesiva.

## Conclusiones


Los límites de resistencia al doblado de láminas metálicas recubiertas por triboadhesión y sin recubrir se especifican con el radio y ángulo de doblado mínimo, en el que un espécimen puede ser doblado sin que se presenten grietas en la superficie o se desprenda material.

Considerando que en este trabajo se designa como grietas, a aquellas perceptibles a 150X. De aquí, se observa y concluye:

- El límite de resistencia al doblado, de láminas de acero AISI 1018 con y sin recubrimiento de fierro-silicio es un radio de doblado menor a  $t/4$  para un ángulo de doblado de 90°.
- El límite de resistencia al doblado, de láminas de acero AISI 304 sin recubrir es un radio de doblado  $t$  para un ángulo de doblado de 90°.
- El límite de resistencia al doblado, de láminas de acero AISI 304 recubiertas de fierro-silicio, es un radio de doblado menor a  $t/4$  para un ángulo de doblado de 90°.
- Se determinó que el recubrimiento fierro-silicio aplicado mediante la técnica de triboadhesión, sobre acero AISI 304, mejora la ductilidad de este acero
- El fierro-silicio presenta una buena adhesión sobre el acero AISI 1018 y AISI 304 mediante la técnica de recubrimiento por triboadhesión.
- Se determinaron la magnitud y distribución de los esfuerzos, en el doblado de láminas de acero AISI 1018

y AISI 304, mediante el programa de elementos finitos Algor

## Referencias

- [1] MANDIGO F. N.  
1992 "Bending Ductility Test", ASM International, Handbook Mechanical Testing, Vol. 8, E.U. p 125-131.
- [2] GISSLER W AND JOHN H. A.  
1992 Advanced Techniques for Surface Engineering, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, p 31
- [3] DINGLEY D. J.  
1993 " The Nagy Coating Process", H. H. Wills Physics Laboratory of Bristol, United Kingdom, (Bristol BS8 1 TL)
- [4] RODRIGUEZ L. J. M., COLÍN O. J. WONG A., AGUILAR O.  
1998 "En la Realización de Recubrimientos en Superficies Metálicas por Triboadhesión", Congreso Nacional de Ingeniería Electromecánica, Instituto Tecnológico de Minatitlán, Memoria Técnica, Noviembre, pp 37-41.
- [5] ROBLES J. M.   
"Diseño y Construcción de un dispositivo para el recubrimiento de superficies curvas por fricción seca", (Tesis de Maestría, México, Cenidet, Octubre del 2000)
- [6] ANGULO B.  
2001 "Evaluación de Resistencia al desgaste de superficies planas con recubrimiento a base de fricción seca", (Tesis de maestría, México, Cenidet, Febrero).
- [7] RODRÍGUEZ L. J. M., SORIANO G. G., COLÍN O. J.  
2000 "Generación de Calor y el Proceso de Triboadhesión", VI Reunión Internacional de Ingeniería Mecánica, Instituto Tecnológico de San Luis Potosí, Octubre, pp 146-151.
- [8] OLVERA T. O.  
2001 "Determinación de los límites de resistencia al doblado de láminas metálicas recubiertas por triboadhesión", (Tesis de maestría, México, Cenidet, Julio).
- [9] SUCHY I.  
1988 Handbook of DIE Design, Unites States of America, Mc Graw Hill, p 8-1
- [10]  
1992 "Standard Test Method for Semi-Guided Bend Test for Ductility of Metallic Materials", ASTM E 290-92, Annual Book of ASTM Standars, Vol 03.01, ASTM, Philadelphia, p 432-435
- [11]  
1989 "Standard Terminology Relating to Methods of Mechanical Testing", ASTM E 6-89, Annual Book of ASTM Standards, Vol 03.01, ASTM, Philadelphia, p 93-102.
- [12]  
1991 "Standard Test Methods for Adhesion of Metallic Coating", ASTM B 571-91, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 02.05, ASTM, Philadelphia, p 300-302.
- [13]  
1992 "Standard Test Methods for Mandrel Bend Test of Attached Organic Coating", ASTM D-522-92, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 06.01, ASTM, Philadelphia, p 85-89.
- [14]  
1999 Tutorial Algor, "Nonlinear Static Stress Analysis Tutorial", Part Number 6700.420, April