

# The effect of strain hardening on the behavior of the AISI 304 stainless steels alloys under dry friction

**Rigoberto Reinoza y Alexo Guillén**

*Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes. Mérida 5101, Venezuela. Teléfono: 0274-2402932. Fax:0274-2402806. reinoza@ing.ula.ve*

## Abstract

The effect of strain hardening on the behavior of austenitic stainless steel AISI 304 under dry friction wear, has been studied. The martensitic microstructure behavior of stainless steel AISI 420 has been used as a comparative pattern with austenitic microstructure. Both microstructures were subjected to three different loads during five different contact times and to a constant turn speed. The wear in the sample type disks of each one of the microstructures was determined by means of the weight lost. Tests result analysis based on weight lost and the hardness changes on austenitic microstructure show that strain hardening effect improves the wear strength of this microstructure.

**Key words:** Wear, friction, microstructure, stainless steel.

## Efecto del endurecimiento por deformación en la fricción seca del acero inoxidable AISI 304

### Resumen

En el presente trabajo se realiza un estudio del efecto del endurecimiento por deformación en el comportamiento del desgaste por fricción seca del acero inoxidable austenítico AISI 304. El comportamiento de la microestructura martensítica del acero inoxidable AISI 420 se usó como patrón de comparación con la microestructura austenítica. Las dos microestructuras fueron sometidas a tres diferentes cargas durante cinco diferentes tiempos de contacto y a una velocidad de giro constante. El desgaste en las muestras tipo disco de cada una de las microestructuras fue determinado por medio de la pérdida de peso. El análisis de los resultados, basándose en la pérdida de peso de los materiales ensayados y el cambio de la microdureza ocurrido en la microestructura austenítica, señalan que el efecto del endurecimiento contribuye a mejorar su resistencia al desgaste.

**Palabras clave:** Desgaste, fricción, microestructura, acero inoxidable.

### Introducción

En el presente trabajo se realiza un estudio del efecto del endurecimiento por deformación en el comportamiento del acero inoxidable austenítico, cuando es sometido al efecto del desgaste por fricción seca. El desgaste ocurre en diferentes situaciones, tales como: equipos en movimiento, arados, bombas, cojinetes de bolas y de deslizamiento, anillos de pistones, engranajes, equipos

médicos y de la industria alimenticia, así como en los equipos de la industria petroquímica. En estos casos una gran cantidad de condiciones pueden causar el desgaste. Los mecanismos del desgaste describen las interacciones energéticas y del material entre los diferentes elementos del sistema tribológico. Además, el tipo de movimiento relativo entre dos cuerpos en contacto puede ser usado para clasificar los diferentes procesos de desgaste [1]. El desgaste deslizante

puede ser caracterizado por el movimiento relativo entre dos superficies sólidas en contacto bajo la acción de una carga, donde el daño superficial durante el deslizamiento no ocurre por el crecimiento de profundos surcos generados por la penetración de asperezas o partículas extrañas. Entre los diferentes parámetros fundamentales de un sistema tribológico que pueden influenciar de alguna manera en la fricción y el desgaste de pares tribológicos se encuentran: la rugosidad superficial y la textura, la carga aplicada, la velocidad de deslizamiento, la forma y dimensiones de los sólidos en contacto, las propiedades químicas tribológicas de las superficies en contacto y finalmente las propiedades metalúrgicas [2].

El desgaste por deslizamiento está fuertemente influenciado por la carga, la velocidad y las condiciones del medio, la temperatura y la humedad. Dependiendo de estos parámetros los valores de la intensidad del desgaste pueden diferir en varios órdenes de magnitud. Se ha demostrado que la intensidad del desgaste de los aceros en contacto deslizante seco puede pasar de suave a severo con el incremento de la carga aplicada, lo cual es causado por un cambio de la estructura del óxido de la superficie deslizante o por la rotura de la película protectora de óxido. Iniciando el deslizamiento a una carga baja y a una velocidad dada, el desgaste suave debido a la remoción de las partículas de óxido cambia a desgaste severo. Por encima de esta transición, con el aumento de la carga la intensidad del desgaste crece casi linealmente hasta una segunda transición, la cual muestra una caída rápida de la intensidad del desgaste debido a la formación de una nueva película de óxido [3].

Diferentes procesos físicos ocurren durante el desgaste deslizante, uniones soldadas se forman durante la adhesión entre las superficies en contacto. Como resultado del movimiento relativo el material es desprendido o transferido, lo que puede causar la eliminación de las asperezas más blandas por el material endurecido transferido y una vez que la transferencia se ha realizado el próximo contacto entre ambas superficies sería entre dos materiales originales, originándose una adhesión más fuerte, dando como resultado una mayor cantidad de transferencia de material. Esta transferencia representa una forma de desgaste, en la mayoría de los casos formación de

partículas sueltas o residuos de desgaste. En la etapa severa, no es posible predecir exactamente que espesor alcanza el material transferido. Cocks [4] y Antler [5] observaron que las protuberancias en las superficies metálicas sometidas a desgaste severo pueden ser el resultado del crecimiento de un flujo de borde inicial en una sola pasada. Hay evidencias experimentales [6], que señalan que cuando ambas superficies participan en el proceso de desgaste, los restos están constituidos por material de ambas superficies, esta característica indica que las partículas fueron generadas por la transferencia mutua y por un proceso de crecimiento. La interrupción del desarrollo de las protuberancias en una de las superficies y permitir a los restos escapar de la zona de contacto, reduciría la separación en condiciones de desgaste severo. Este proceso puede evitar la transformación de las partículas de desgaste en capas superficiales protectoras, incorporándolas como óxidos lubricantes.

El proceso de desarrollar desgaste suave a partir del desgaste severo ha sido observado tanto en los aceros inoxidable [7], como en aleaciones de base hierro [8]. Hay una gran tendencia en los aceros inoxidable austeníticos por la adhesión o formación de surcos, aun cuando ellos desarrollan muy rápido, en aire, una película protectora dura de óxido, pero su baja dureza, permite que esta película sea fracturada con facilidad y se produzca el contacto metal a metal. Debido a su bajo contenido de carbono, para una excelente resistencia estática a la corrosión y a la no presencia de carburos, poseen una baja resistencia al desgaste en comparación a los aceros de alto contenido de carbono [9].

A pesar de su baja resistencia a la abrasión, los aceros inoxidable de microestructura austenítica poseen una resistencia mayor al desgaste que los aceros inoxidable de microestructura martensítica [10]. Fonareu y Jhonson [11], con el objeto de determinar el valor de la presión específica a la cual no se observa la aparición de surcos o adhesión, estudiaron el comportamiento del acero inoxidable austenítico (GOST 1X18H9T) y los aceros inoxidable martensíticos (GOST 3X18 y GOST X18) en fricción seca, mediante ensayos de fricción tipo disco zapata a dos velocidades de trabajo (0.03 m/s y 0.06 m/s) y para diferentes conformaciones de los pares (pares de materiales

idénticos, disco de material de dureza superior a la dureza del material de la zapata, disco de material de dureza inferior a la dureza del material de la zapata). Los autores observaron que la adhesión o formación de surcos ocurría cuando el momento de fricción cambiaba su magnitud bruscamente. Por otra parte, los autores indican, que para presiones específicas determinadas en la superficie de contacto de cada par, después de 5 a 10 minutos del inicio del ensayo observaron la formación de una película de color gris oscuro, la cual provocó un aumento del coeficiente de fricción (0.55-0.70) con la presencia de la película, de dos veces en relación al coeficiente de fricción (0.30-0.40) en ausencia de la película, pero señalan que a aunque se produjo un aumento del momento de fricción no observaron la formación de surcos o adhesión y concluyeron que la película trabajó como un lubricante sólido.

### Procedimiento Experimental

Los materiales empleados en el presente trabajo fueron aceros inoxidables de microestructura austenítica y microestructura martensítica, AISI 304 y AISI 420 respectivamente, tratados térmicamente. El acero de microestructura austenítica fue calentado hasta 1050°C, con permanencia de una hora en el horno y enfriado en aire. El acero de microestructura martensítica se sometió a un temple en aceite con calentamiento a 1000°C y permanencia de media hora en el horno y posterior revenido por una hora a 280°C y enfriado en aire. Después del tratamiento térmico, la microestructura del acero austenítico mostró un contenido de 100% de austenita con un tamaño de grano ASTM 4.3628. El acero martensítico tratado térmicamente mostró una microestructura formada por 92.272% de martensita y 7.728% de austenita retenida. La composición química en porcentaje en peso, las propieda-

des mecánicas a tracción, esfuerzo a la fluencia  $\sigma_y$  y resistencia a la tracción  $\sigma_u$ , y la microdureza de los dos aceros inoxidables empleados son mostradas en la Tabla 1.

Los experimentos fueron realizados en aire en una máquina de ensayos de fricción universal marca Usler, usando dos discos del mismo material que giran en sentido contrario y entran en contacto por la acción de una fuerza normal aplicada. Durante el proceso de contacto ocurre la fricción de los discos y se mide el desgaste de las muestras. La medición del desgaste se realiza en forma gravimétrica en una balanza Nettle Toledo modelo AB 204-S, de apreciación 0.001 g, a diferentes intervalos de tiempo, hasta alcanzar el tiempo total de ensayo planificado. Las cargas de trabajo fueron 200 N, 600 N y 1000 N. Los tiempos de desgaste empleados fueron 60, 120, 180, 240 y 360 minutos. Para cada uno de los tiempos de fricción se ensayaron tres muestras de cada material a una velocidad de deslizamiento de 0.3 m/s y a una frecuencia de 163.8 min<sup>-1</sup>. Posteriormente con un microescleroscopio Leitz a una carga de 100 g y penetrador Vickers se tomaron 25 medidas de microdureza, a profundidades de 50, 100, 150, 200 y 250 micras de la superficie de contacto, a lo largo de la sección transversal de las muestras del acero inoxidable austenítico y del martensítico. Los valores de la microdureza del acero inoxidable AISI 420 no mostraron variación con la distancia de la superficie de contacto.

### Análisis de Resultados

Los resultados de los experimentos de fricción realizados en aire en cada uno de los tipos de aleaciones representativas de las familias de los aceros inoxidables austeníticos y martensíticos son mostrados en las Figuras 1a, 1b y 1c. En estas figuras se observa que al aumentar la carga, la pérdida de material causado por desgaste au-

Tabla 1  
Composición (% en peso), propiedades mecánicas a tracción y microdureza de los materiales empleados

Material	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	$\sigma_u$ (MPa)	$\sigma_y$ (MPa)	Micro-du reza
AISI 304	0.06	0.45	1.39	0.035	0.10	18.34	8.25	235	574	205
AISI 420	0.385	0.66	0.49	0.0202	0.60	15.32	0.0234	907	1411	606

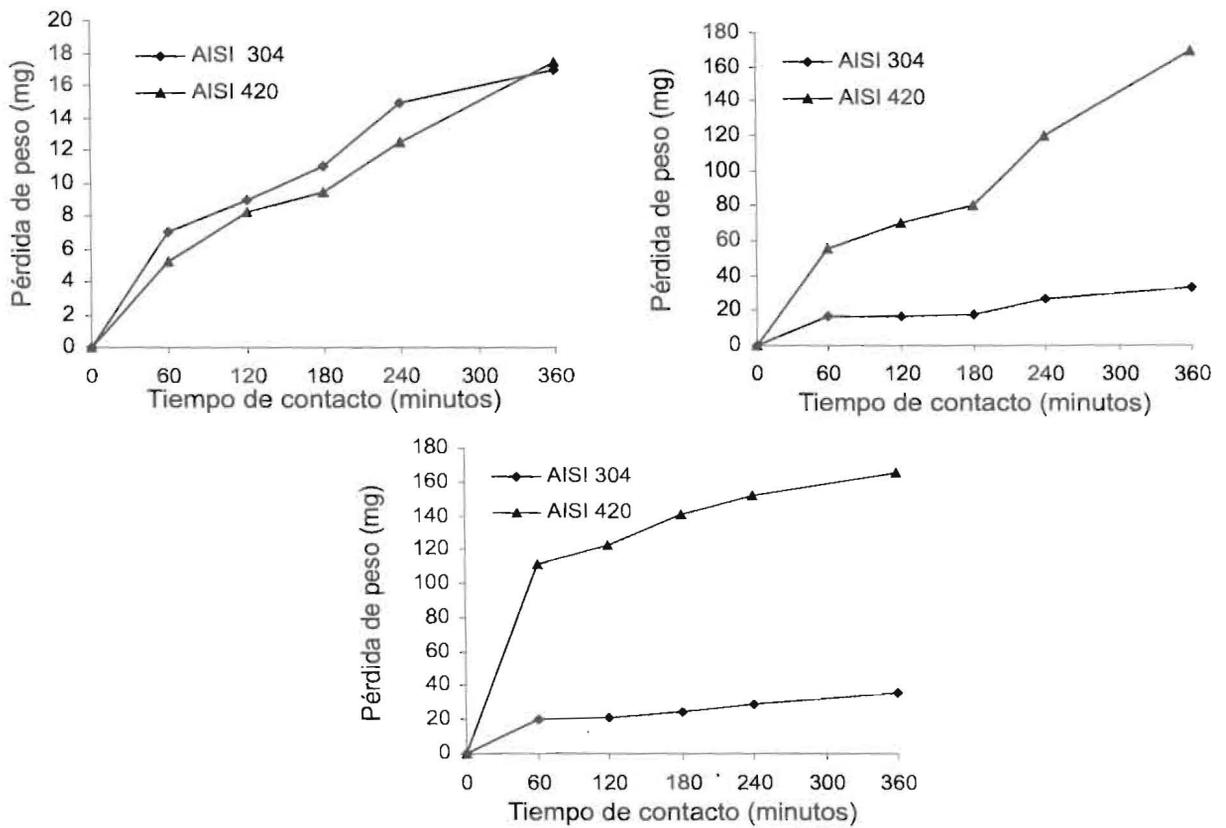


Figura 1. Pérdida de peso en función del tiempo de contacto: (a) para una carga de 200 N, (b) para una carga de 600 N, (c) para una carga de 1000 N.

menta tanto en la microestructura martensítica como en la microestructura austenítica, siendo el aumento en menor grado en esta última microestructura. A la carga  $P = 200$  N y para cualquier tiempo de contacto la pérdida de material causado por la fricción, tanto en la microestructura austenítica como en la microestructura martensítica muestra valores casi iguales. Por otra parte a este mismo valor de carga, se observan los tres periodos de desgaste. El periodo inicial de asentamiento, en el que la pérdida de peso es alta, periodo de estado estable en que la pérdida de peso es constante y un periodo final donde aumenta la pérdida de peso. Al aumentar la carga de contacto hasta 600 N y 1000 N se observa en las Figuras 1b y 1c, que la pérdida de peso en el acero inoxidable de microestructura martensítica aumenta considerablemente con respecto al cambio ocurrido en la pérdida de peso de la microestructura austenítica.

De los materiales estudiados, el acero martensítico es el material de mayor microdureza

(606 HV) y de mayor resistencia a la fluencia a tracción ( $\sigma_y = 907$  MPa), lo que puede indicar que esta microestructura debería mostrar la menor pérdida de peso, pero la menor pérdida de peso la muestra el material de menor microdureza y resistencia a la fluencia como es el acero austenítico (205 HV,  $\sigma_y = 235$  MPa). La dureza del material es un factor importante en el comportamiento de los materiales sometidos a fricción seca, pero no determinante, no es posible asegurar que a mayor dureza menor intensidad de desgaste, ya que él también está influenciado por los procesos de deformación plástica y elástica que ocurren en el material [12].

La Figura 2 muestra los valores de la microdureza obtenidos a lo largo de la sección transversal de las muestras de microestructura austenítica sometidas a fricción en aire a las cargas de 200, 600 y 1000 N respectivamente. En esta figura se puede observar que a medida que se aumenta la carga de contacto aumenta la dureza del material y además se puede apreciar que a medi-

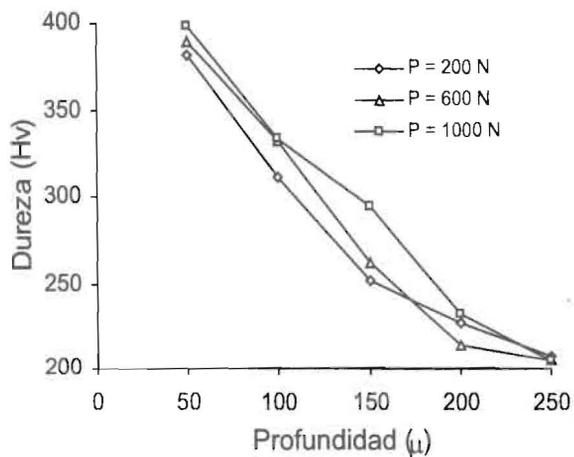


Figura 2. Dureza en función de la profundidad en cada una de las muestras sometidas a fricción.

da que se mueve hacia el interior de la muestra la dureza disminuye, indicando este comportamiento que las capas superficiales están más endurecidas que las internas. La Figura 2, además, indica que el comportamiento mostrado por el acero AISI 304 en las Figuras 1a, 1b y 1c, se debe a su tendencia a endurecerse por deformación en frío. A las cargas de 600 N y 1000 N esta estructura está sometida a una presión máxima de contacto de 407.37 MPa y 525.92 MPa, respectivamente [12], esfuerzos mayores que el esfuerzo de fluencia en tracción ( $\sigma_y = 235$  MPa) del material y en consecuencia a un estado de deformación plástica que estaría generando un aumento de su resistencia al desgaste ocasionado por el endurecimiento por deformación de la estructura austenítica, tal como se muestra en la Figura 2. El mejor comportamiento de la microestructura austenítica puede ser debido, aunque aumenta su microdureza en las capas superficiales que puede generar desgaste por microagrietamiento, a que mantiene en las capas más internas condiciones de alta deformación que le permiten absorber energía de deformación y mantener el proceso de desgaste predominante en la condición de formación de surcos o adhesión.

En las Figuras 3 y 4 se observan las superficies de desgaste de cada uno de los materiales usados. La Figura 3 muestra que el proceso determinante en el desgaste de la microestructura austenítica es la formación de surcos, característico de los materiales dúctiles generado por la de-

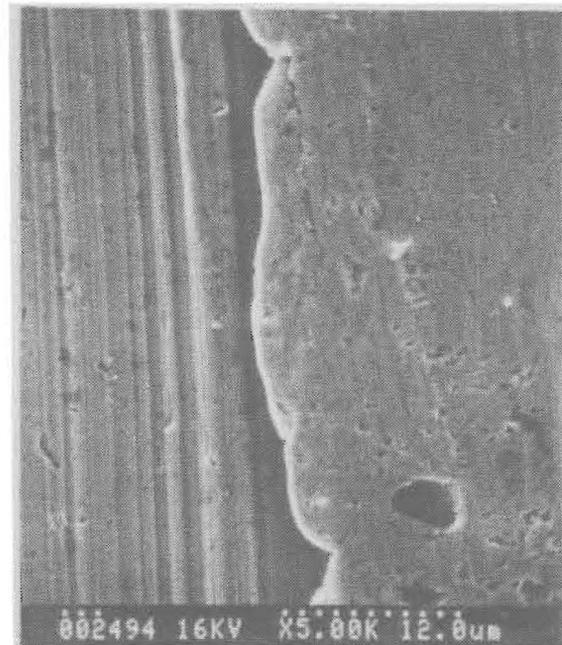


Figura 3. Superficie de desgaste del acero inoxidable AISI 304. Para una carga de 600 N y un tiempo de 360 min. 5000X.



Figura 4. Superficie de desgaste del acero inoxidable AISI 420. Para una carga de 600 N y un tiempo de 360 min. 5000X.

formación plástica presente [13]. Los surcos se observan a la izquierda de la figura y una gran deformación se observa en el centro de la misma. Por otra parte, las zonas más oscuras de forma irregular presentes en toda la superficie de desgaste mostrada en la Figura 3, son indicativas de la pérdida de material de desgaste por desgarramiento, pero manteniendo la condición de ductilidad en las capas internas a pesar del endurecimiento de la capa superficial de la superficie de desgaste.

En el caso del acero inoxidable de microestructura martensítica, que está sometido a un esfuerzo de corte inferior al esfuerzo de corte a la fluencia para cada una de las cargas de ensayo (82.37 MPa, 142.67 MPa y 184.20 Mpa, respectivamente) pero su pérdida de peso es superior a la microestructura austenítica, lo cual puede explicarse porque el proceso de desgaste ocurre por microagrietamiento de la superficie de contacto como se muestra en la Figura 4, donde se observa la presencia de microgrietas y material desprendido por fractura de la superficie debido a la propagación de estas microgrietas, lo cual trae como resultado un aumento de pérdida de material por desgaste en comparación con los procesos donde esta presente la deformación plástica [9].

### Conclusiones

La microestructura austenítica tiene la tendencia a endurecerse por deformación y por lo tanto las capas superficiales de la superficie se endurecen en mayor grado que las capas más internas, creando un sustrato dúctil que durante el proceso de desgaste va generando capas superficiales duras que aumentan la resistencia al desgaste de la microestructura, dando como resultado un mejor comportamiento que una microestructura originalmente más dura pero que no sufre ningún cambio de dureza en el proceso de desgaste.

Los resultados de los ensayos de microdureza en la microestructura austenítica indican que el proceso de endurecimiento es el responsable del mejor comportamiento del acero inoxidable de microestructura austenítica en comparación con el acero de microestructura martensítica.

### Agradecimiento

Los autores dan las gracias al CDCHT de La Universidad de Los Andes por el financiamiento dado a través del Proyecto I – 674-00-02-F.

### Referencias Bibliográficas

1. Jahanmir, S., "Future Directions in Tribology Research", Transaction ASME, Journal Tribology, 109, 2, 207-214, 1987.
2. Gandhi, O.P. and Agrawi, V.P: "A Diagraph Approach to System Wear Evaluation and Analysis", Transaction ASME, Journal Tribology, 116, 2 (1994), 268-274.
3. Zum Gahr, K. H.: "Microstructure and Wear of Materials", Tribology Series, 10, Elseviere, Ámsterdam, 1987
4. Cocks, M., "Sharing of junction between Metal Surface", Wear, 9, 320-328, 1966.
5. Antler, M., "Processes of Metal Transfer and Wear", Wear, 7, 181-202, 1964.
6. Mishina, H. and Sasada, T.: "Observation of Micro-structure in Seized portion and Mechanism of Seizure", Transaction ASME, Journal Tribology, 108, 1 (1986), 128-133.
7. Newman, P.T. and Skinner, J.: "The High Temperature Sliding wear of Stainless Steels in CO<sub>2</sub> Atmosphere- The Effect of Adding low Concentration of Oxygen", Wear, 291, 112 (1986), 291-325.
8. Stott, F. H., Gascott, J. And Wood, G. C.: "Factors affecting the Progressive Development of Wear-Protective Oxides in Iron-Base alloys during Slides at Elevated Temperatures", Wear, 97 (1984), 93-196.
9. Glaeser, W.A.: "Materials for Tribology", Tribology Series, 20, Elseviere, Amsterdam, 1992
10. Blaun, P.J.: "Friction, Lubrication and Wear Technology", ASM HANDBOOK, 18, ASMT International, USA, 1992.
11. Fonareu, S.F. y Jhonson, V. A.: "Propiedades Anti Fricción de los Aceros Inoxidables que trabajan sin Lubricación ", Trenye e Iznos (1981), 5-15, (Ruso).

12. Reinoza, R.: "Comportamiento de los Aceros Inoxidables Ante Solicitudes Combinadas Mecánico-Corrosivas", Tesis Dr. Ciencias Técnicas, (2001), I.S.P.J.A.E, La Habana, Cuba.
13. Heilmann, P., Clark, W. A. T. and Rigney, D. A.: "Orientation Determination of Surface Cells Generate by Sliding", Acta Metallurgical, 31, (1983), 1293-1305.

Recibido el 29 de Marzo de 2004

En forma revisada el 29 de Mayo de 2006