

Ensayos de rozamiento plano sobre aceros inoxidable austeníticos con diferente acabado superficial. Determinación de las condiciones de adhesión en el rozamiento^(*)

J. Coello*, V. Miguel*, C. Ferrer**, A. Calatayud* y A. Martínez*

Resumen

El objetivo de este trabajo es determinar el comportamiento tribológico de los aceros inoxidable austeníticos 304 con acabado brillante BA (ASTM A 240), 304 DDQ y 316 con acabado mate 2B, en sistemas de contacto plano, con el fin de simular el rozamiento en la zona del flanco en los procesos de embutición de acero inoxidable. Para ello, se ha estudiado la influencia del acabado superficial del acero, la velocidad de deslizamiento y la presión normal sobre el coeficiente de rozamiento, utilizando un ensayo de fricción con matrices planas. Los ensayos se han realizado con aceite mineral de 200 cst, grasa de bisulfuro de molibdeno y en seco. En presencia de aceite, se ha establecido una correlación de μ con la velocidad de deslizamiento y la presión de contacto con comportamiento fuertemente adhesivo en las condiciones de lubricación límite consideradas. Los resultados obtenidos muestran que la grasa de bisulfuro de molibdeno disminuye en un 50 % los valores del coeficiente de rozamiento. Se ha constatado una menor tendencia al gripado para la calidad 316 caracterizada por una mayor dureza superficial. El rozamiento experimentado bajo las condiciones más severas va acompañado de un relevante efecto *plowing* con un endurecimiento superficial importante del acero.

Palabras clave

Rozamiento plano; Aceros inoxidable austeníticos; Lubricación límite.

Flat friction tests applied to austenitic stainless steels with several surface finish. Analysis of adhesion conditions in friction

Abstract

The main purpose of this work is to evaluate the tribological behaviour of austenitic stainless steels AISI 304 with bright annealed surface finishing (BA) (ASTM a 240); AISI 304 DDQ and AISI 316 with bright surface finishing (B). The assays have been carried out in flat faced dies system with mineral oil of 200 cts viscosity, S_2Mo grease and in dry conditions. The relationship between friction coefficient and pressure and velocity has been established for the mineral oil as lubricant. In these conditions, a strong adhesive tendency has been found in boundary lubrication regime. The results obtained here, show us that S_2Mo grease leads to lowest values for the friction coefficient. A minor adhesive behaviour tendency for AISI 316 steel, harder than 304 grades, has been found. A relevant plowing phenomena has been observed for the more critical friction conditions tried out. A surface hardener is produced as a consequence of that.

Keywords

Flat faced friction; Austenitic stainless steels; Boundary lubrication.

1. INTRODUCCIÓN

En la industria agroalimentaria, cada vez, son más demandados los productos fabricados por conformado de chapa de acero inoxidable austenítico: fabricación de depósitos, cisternas, envases... Uno de los inconvenientes del conformado de estos materiales es el gran endurecimiento que presentan y la tendencia a adherirse a otros metales, principalmente, cuando el

proceso se desarrolla a altas presiones de contacto y las condiciones de lubricación no son las óptimas. Esta elevada tendencia a la adhesión conduce a numerosos fenómenos de gripado o *galling*, en los procesos con fricción, lo que desencadena un deterioro prematuro de la herramienta de trabajo.

Desde el punto de vista de la lubricación, existen diversos trabajos tanto teóricos como experimentales que estudian las diferentes condiciones en las que se

(*) Trabajo recibido el día 26 de diciembre de 2007 y aceptado en su forma final el día 13 de mayo de 2008.

* Instituto de Desarrollo Regional. Ciencia e Ingeniería de Materiales, Universidad de Castilla-La Mancha, Campus Universitario s/n 02071 Albacete, España. valentin.miguel@uclm.es

** Dpto. de Ciencia e Ingeniería de Materiales, Universidad Politécnica de Valencia, Cº de Vera, s/n 46022, Valencia, España.

produce este fenómeno^[1-5]. Otros autores^[4], relacionan el comienzo del *galling* con el calentamiento producido cuando se produce la rotura de la película lubricante, y con el acabado superficial de las matrices, comprobando que el *galling* es muy frecuente cuando se utilizan herramientas muy pulidas. A su vez, existen referencias^[5-6] que modelizan el inicio de este fenómeno en procesos de conformado de chapa, validándolos con datos experimentales obtenidos en un tribómetro, en diferentes condiciones de lubricación y diferentes tipos de contacto.

En la bibliografía, son muy numerosos los ensayos que evalúan la influencia de los diferentes factores involucrados en los procesos de fricción (acabado superficial, tipo de lubricante establecido, velocidad y presión existentes, así como la naturaleza y estado de las superficies rozantes) sobre el coeficiente de rozamiento^[7-11]. Los datos que arrojan dichos ensayos presentan malas condiciones de reproducibilidad, por lo que, generalmente, es necesario establecer los coeficientes de rozamiento en las condiciones en las que se desarrollan los procesos de conformado. En relación con la embutición, los ensayos de fricción en contacto plano^[12 y 13] reproducen las condiciones que tienen lugar bajo el prensachapas.

Otro aspecto importante a considerar en la fricción de los aceros inoxidable es el acabado superficial. Los acabados superficiales utilizados, generalmente, en el proceso de embutición son el BA y 2B^[14]. El acabado 2B se obtiene mediante un proceso de laminación en frío seguido de un recocido en atmósfera oxidante, decapado y laminado final con rodillos muy pulidos. La superficie obtenida es lisa y con un acabado mate. El acabado BA, se obtiene mediante tratamiento térmico de recocido en atmósfera inerte después de la laminación. Este último acabado da al acero un aspecto muy brillante.

Independientemente del acabado superficial, en aplicaciones de embutición se utilizan diferentes calidades del grado AISI 304. Además de la calidad normal existen en el mercado denominaciones DDQ (Deep Drawing Quality) y HDDQ (High Deep Drawing Quality). Estas calidades presentan un contenido de níquel superior al establecido para la calidad normal, que aumenta la estabilidad de la austenita y la conformabilidad del material^[13 y 15].

En este trabajo se determina el valor del coeficiente de rozamiento del acero inoxidable AISI 304 con acabado superficial 2B y BA, y el acero 316 (2B), mediante ensayos de fricción con matrices planas, utilizando un aceite mineral y una mezcla de aceite /S₂Mo (5 0% peso) como lubricantes. Se estudia la influencia de la velocidad, la presión y el tiempo de lubricación sobre el coeficiente de rozamiento. Finalmente, se establece un estudio comparativo del coeficiente de rozamiento y de los parámetros de rugosidad obtenidos en las condiciones de lubricación mencionadas con los obtenidos sin lubricación.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL Y MATERIALES

2.1. Materiales

Este trabajo se ha llevado a cabo sobre muestras de chapa de acero inoxidable AISI 304 BA de 0,7 mm de espesor, AISI 304 DDQ 2B de 0,8 mm y AISI 316 2B de 0,8 y 1 mm (Fig. 1). De este modo, se investigan distintas variables relativas al tipo de acero y al acabado superficial. Las características mecánicas de estos aceros y los valores de rugosidad aparecen en las tablas I y II.

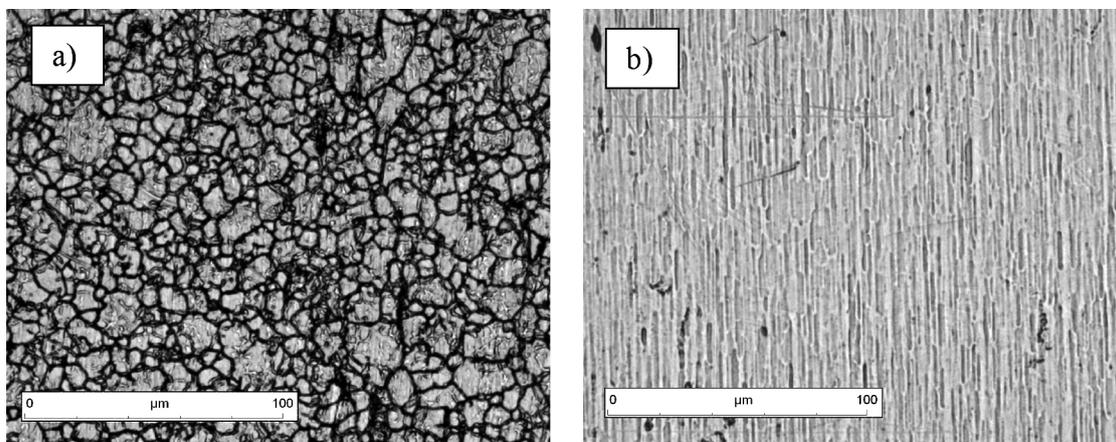


Figura 1. Micrografía del acabado superficial de los aceros. a) 2B; b) BA.

Figure 1. Steels surface finishing micrograph. a) 2B; b) BA.

Tabla I. Propiedades mecánicas del acero AISI 304 y 316

Table I. Mechanical properties of AISI 304 and 316 stainless steel

Acero	R _{p0.2} (MPa)	Rm (MPa)	HV 0,5
304 (BA)	280	637	187
304 DDQ (2B)	252	582	174
316- 1mm	403	730	219
316-0.8 mm	373	689	189

Tabla II. Parámetros de rugosidad superficial

Table II. Surfaces roughness parameters

Acero	Dirección	Ra (µm)	Rz (µm)	RPc (0,50-0,50) picos/cm
304 BA	0°	0,03	0,34	0
	90°	0,04	0,27	0
304 2B	0°	0,06	0,53	0
	90°	0,09	0,92	0
316-1mm 2B	0°	0,09	0,80	0
	90°	0,13	1,10	0
316 -0.8 mm2B	0°	0,08	0,87	0
	90°	0,12	1,33	0

Los ensayos se han llevado a cabo sobre muestras rectangulares de 120 mm de longitud y 9,5 mm de anchura, cortadas con cizalla en la dirección de laminación de la chapa.

2.2. Ensayos de fricción

Para la realización de los ensayos, se diseñó y fabricó un dispositivo experimental que permite aplicar una fuerza normal al conjunto de dos matrices planas, entre las que se aloja la muestra de ensayo (Fig. 2). Esta fuerza de cierre, normal a la muestra de ensayo, es controlada mediante un cilindro neumático y medida, en el punto de contacto, con una célula de carga de 5.000 N de fondo de escala. El dispositivo indicado fue alojado en las mordazas inferiores de una máquina de ensayos universal, Zwick Z010, con un límite de fuerza de 10.000 N. Una vez situada la muestra entre las matrices, el estirado de la probeta de ensayo se realiza sujetando el extremo libre de la misma en las mordazas superiores de la máquina de ensayos, de tal forma que la fuerza de estirado de las muestras a la velocidad preestablecida o fuerza de rozamiento, se registra de forma continua por la máquina de tracción.

Para la realización de los ensayos se utilizaron matrices fabricadas en acero X40CrMoV5.1, templado y revenido, con una dureza de 48 HRC. El acabado superficial de las mismas se realizó mediante lijado con un papel de esmeril de granulometría 220 en el sentido del estirado, obteniendo un valor de rugosidad, Ra, de 0,20-0,30 mm. Estos valores de dureza y rugosidad, que se han considerado fijos para la realización de todos los ensayos, se seleccionaron de acuerdo

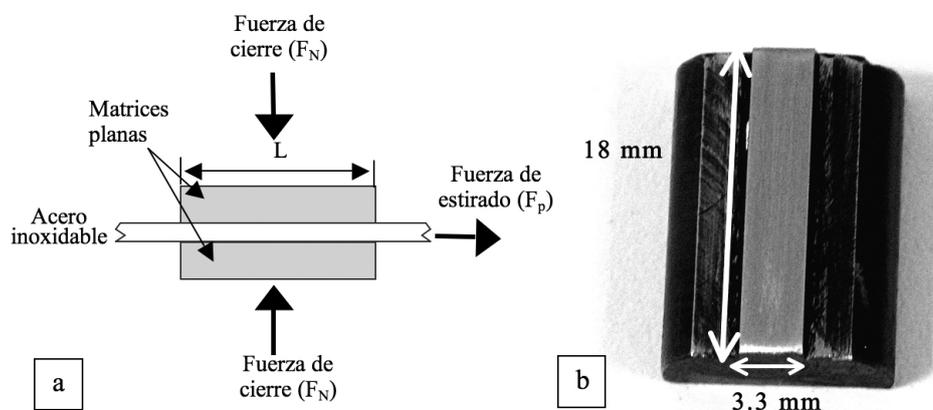


Figura 2. a) Detalle del esquema del ensayo de fricción en matrices planas; b) Detalle de una de las matrices utilizadas para la realización de los ensayos de fricción.

Figure 2. a) Friction test fundamentals; b) Friction die.

a las características mecánicas y de acabado superficial de las matrices utilizadas, generalmente, en procesos industriales de embutición de acero inoxidable.

Inicialmente, los ensayos se llevaron a cabo sobre matrices planas de dimensiones 10 x 37 mm, utilizadas para la realización de ensayos de deformación bajo compresión biaxial. En estos ensayos se comprobó que el contacto producido entre la matriz y la chapa de acero inoxidable no era uniforme, obteniéndose una gran dispersión de los valores del coeficiente de rozamiento y de las presiones aparentes, debido a que las superficies aparentes de contacto eran muy difíciles de determinar ya que se producía un contacto muy irregular y poco reproducible (Fig. 3).

Para solucionar este inconveniente y garantizar un contacto uniforme matriz-acero se utilizaron unas matrices de 18 mm de longitud y 3,3 mm de ancho (Fig. 2). La utilización de estas matrices permitió determinar de forma más precisa la superficie de contacto y la presión aparente como variable de ensayo, lo que mejoró en gran medida los resultados obtenidos. A su vez, al ser la superficie de contacto más pequeña, estas matrices han permitido evaluar el comportamiento a fricción a mayores presiones aparentes, con el sistema de fuerza empleado por los autores. Por otro lado, debido al pequeño tamaño de estas matrices, se consideró la posibilidad de que el efecto borde o de contorno pudiese modificar los resultados obtenidos por lo que, experimentalmente, se ha analizado la influencia del efecto borde, comparando los resultados obtenidos en estos ensayos con los obtenidos en matrices de anchura superior a la de la chapa.

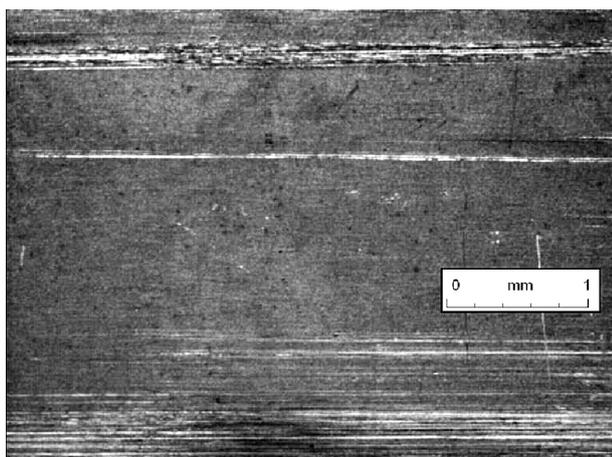


Figura 3. Macrografía de una muestra ensayada en las matrices de 10 x 37mm. Lubricante: aceite mineral. V: 100 mm/min.

Figure 3. Macrograph obtained for AISI 304DDQ steel after sliding on die 10 x 37 mm. Lubricant: mineral oil. V: 100 mm/min.

Las variables estudiadas han sido la presión sobre la chapa (5-25MPa), la velocidad de estirado (10-1.750 mm/min) y el lubricante. La longitud de deslizamiento no se considera como variable de ensayo, siendo, en cualquier caso, muy superior (90 mm) a la longitud de las matrices. Como lubricantes se ha utilizado aceite mineral con una viscosidad 200 cst, y una mezcla del mencionado aceite y S₂Mo al 50 % en peso (grasa). Para fijar las condiciones de lubricación, las muestras desengrasadas con etanol se lubrican posteriormente. En el caso del aceite, la lubricación se realizó por inmersión, en tanto que la grasa se aplicó con un pincel. Después de cada ensayo, las matrices se limpiaron con papel secante para fijar las condiciones iniciales del ensayo. También, se ha estudiado la influencia del tiempo de escurrido del aceite sobre el coeficiente de rozamiento, observándose que esta variable no influye sobre los resultados obtenidos, de tal forma que todos los ensayos se han realizado considerando un tiempo de escurrido entre 15 y 30 min.

Para los rangos de las variables consideradas, experimentalmente se ha comprobado que en los ensayos realizados con aceite se produce un contacto superficial entre las superficies deslizantes, lo que indica la existencia de un régimen de lubricación límite^[12].

El coeficiente de rozamiento, μ , para cada uno de los ensayos, se ha determinado mediante la ecuación (1), en función de la fuerza de rozamiento o fuerza de ensayo, F_R , y de la fuerza de cierre de las matrices, F_N :

$$\mu = \frac{F_R}{2 \cdot F_N} \quad (1)$$

Para controlar la fuerza de cierre se calibró convenientemente el dispositivo de cierre de las matrices, relacionando la presión en el circuito neumático de accionamiento del cilindro de cierre con la fuerza ejercida en la matriz. Para calcular la presión se consideró la superficie aparente de contacto, determinada a partir de la anchura de la banda de rozamiento. En este contexto, se define la banda de rozamiento como la zona de acción bajo las matrices en la que existe contacto superficial con la muestra de ensayo. La banda de rozamiento se determina mediante técnicas de análisis de imagen.

2.3. Caracterización de las muestras ensayadas

Con el fin de evaluar el acabado superficial de las muestras ensayadas y los posibles cambios microestructurales producidos en los ensayos de fricción se han realizado ensayos macro y microestructurales de las

diferentes muestras. De igual forma, se ha analizado la rugosidad superficial en muestras ensayadas a fricción.

El análisis macroestructural se ha realizado sobre la superficie de las muestras, mediante una lupa binocular con captura de imágenes. Sobre estas macrográficas y mediante el programa de tratamiento de imágenes Perfect Image, se ha realizado la medida de las bandas de rozamiento. La anchura de estas bandas ha sido determinada, también, en un proyector de perfiles, Nikon V-12.

Para el estudio metalográfico se han preparado diferentes probetas de la sección transversal de las muestras más representativas. Sobre estas muestras se ha realizado el estudio microestructural de la zona próxima a la superficie. Finalmente, se han determinado los parámetros de rugosidad, 2D, mediante un rugosímetro Mahr Perthometer S2.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Influencia de la presión sobre el coeficiente de fricción

El posible efecto borde, debido al empleo de matrices de pequeño tamaño, es poco significativo, tal y como puede apreciarse en la figura 4, en la que se representa el efecto de la presión sobre ensayos efectuados con matrices de mayor anchura que las muestras ensayadas (10 x 17 mm) sobre acero 304 DDQ 2B. El único efecto observado es la mayor dispersión

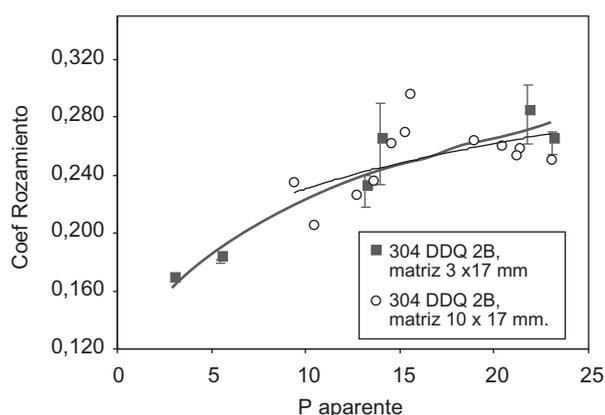


Figura 4. Variación del coeficiente de fricción del acero 304 DDQ 2B con la presión para diferentes matrices. Lubricante: aceite mineral. V: 100 mm/min.

Figure 4. Friction coefficient value vs apparent pressure for 304 stainless steel for different dies. Lubricant: mineral oil. V: 100 mm/min.

de los resultados, pero la tendencia de comportamiento es similar para los dos tamaños de matrices considerados. El empleo de matrices de gran tamaño conduce a un rozamiento no uniforme con contacto desigual de las superficies rozantes, que hace difícil la evaluación de la presión aparente. Por este motivo, el resto de variables son evaluadas con ensayos realizados en matrices de 3,3 mm de anchura.

En las figuras 5 y 6 se muestra el coeficiente de rozamiento en función de la presión aparente para el acero 304 BA y 316, respectivamente, ensayadas en

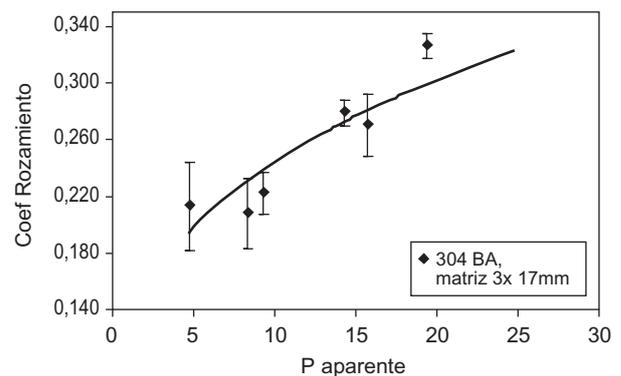


Figura 5. Variación del coeficiente de fricción del acero 304 con la presión; Lubricante: aceite mineral. V: 100 mm/min.

Figure 5. Friction coefficient value vs. apparent pressure for 304 stainless steel; Lubricant: mineral oil. V: 100 mm/min.

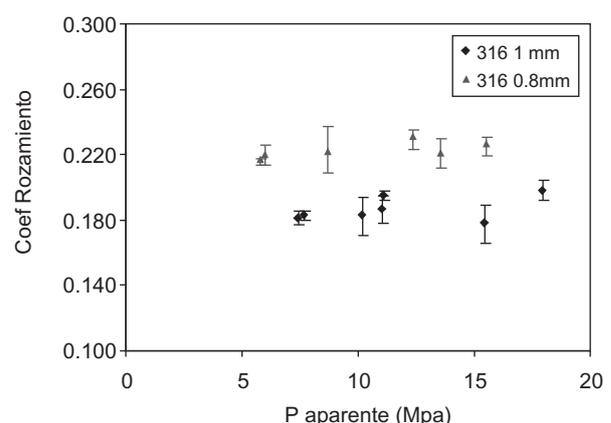


Figura 6. Variación del coeficiente de fricción del acero 316 con la presión. Lubricante aceite. V: 100 mm/min.

Figure 6. Friction coefficient vs. apparent pressure for 316 stainless steel. Lubricant: mineral oil. V: 100 mm/min.

matrices de 3,3 mm de ancho. Las dos calidades del acero 304, 304 BA y 304 DDQ 2B, presentan una correlación de tipo potencial creciente. De acuerdo con las teorías clásicas del rozamiento, esta tendencia se corresponde con un comportamiento de tipo adhesivo con rotura de películas de óxidos superficiales, típico de altas presiones de contacto entre las superficies deslizantes. En definitiva, esta teoría se corresponde con la evidenciada por Bowden and Tabor^[16].

Para el acero AISI 316 no se observa una correlación significativa del coeficiente de fricción con la presión, lo que significa que, de acuerdo con las teorías anteriores, en el rango de presiones considerado, coexiste la fricción de carácter interferencial con la de tipo adhesivo. Como consecuencia, se puede afirmar que la película de pasivación del acero 316 es más resistente que la del 304, lo que confirma que el carácter adhesivo obtenido en el rozamiento sea menor en aquél. Probablemente, a mayores presiones para el 316 se hubiese obtenido la tendencia descrita en el 304 pero, en cualquier caso, el rango de

presiones analizado es significativo desde el punto de vista de las aplicaciones de estampación de estos aceros, por lo que no se considera necesario analizar la tendencia de comportamiento a presiones mayores.

Si se comparan las dos muestras de acero 316 estudiadas, podemos detectar que el espesor de 0,8 mm, presenta un coeficiente de rozamiento superior al de 1 mm de espesor, lo que se justifica por la mayor dureza que presenta este último acero^[8 y 16]. Bregliozzi^[8 y 17] estudia la influencia del tamaño de grano, de la dureza y la humedad sobre el coeficiente de rozamiento del acero inoxidable 304, observando que la dureza es el factor determinante y que, para un mismo acero, las muestras con mayor dureza (y menor tamaño de grano) presentan un coeficiente de fricción más bajo, lo que corrobora los resultados experimentales obtenidos en este trabajo. Así, conforme la dureza del acero es mayor, existe menor tendencia al fenómeno de *plowing*, como puede observarse en la figura 7. Si se comparan las micrografías c) y d) se observa una mayor deformación superficial para el acero más blando. El *plowing*

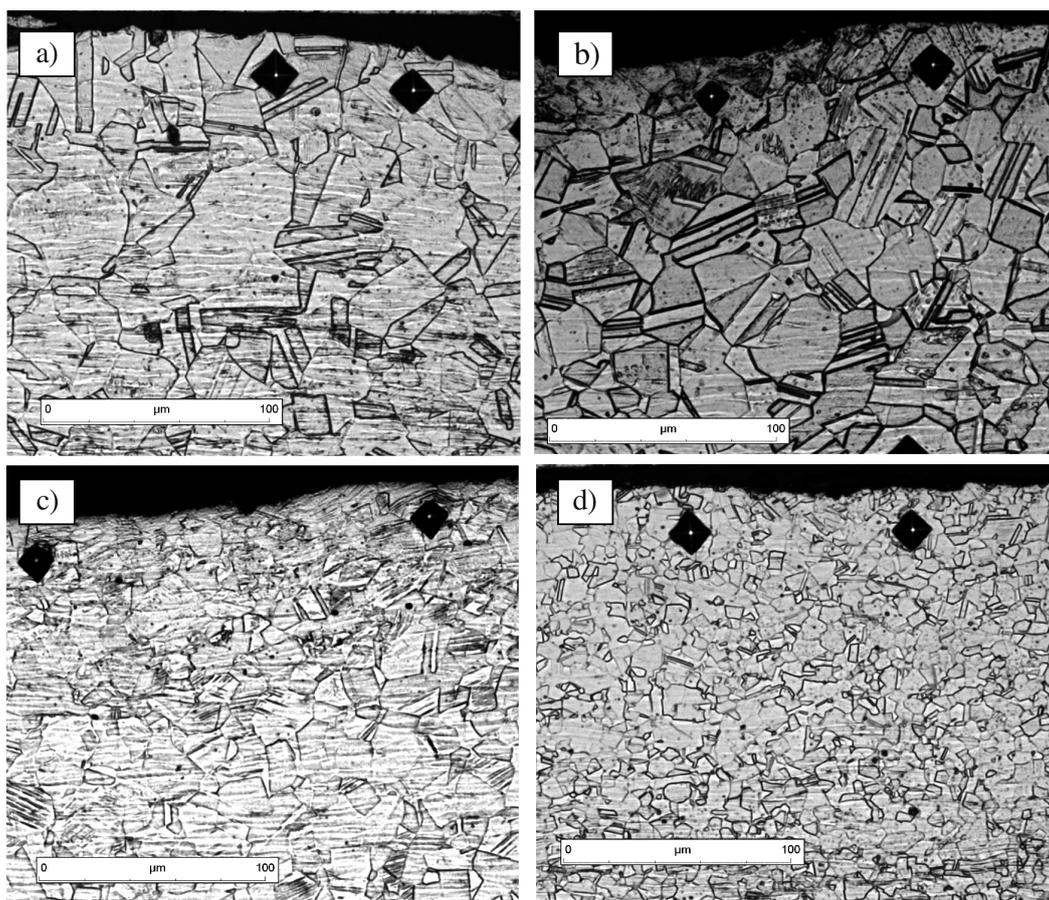


Figura 7. Micrografías de distintas muestras ensayadas a fricción. P: 20 MPa. V: 100 mm/min. Sin lubricante: a) 304 BA; b) 304 DDQ 2B; c) 316-0.8 mm; d) 316-1mm.

Figure 7: Micrographs for different steels after sliding: Without lubricant, P: 20 MPa. V: 100 mm/min: a) 304 BA; b) 304 DDQ 2B; c) 316-0.8 mm; d) 316-1mm.

conduce a un aumento significativo del coeficiente de rozamiento, debido a la interacción superficial localizada de la superficie deformada sobre la rugosidad de la matriz. Por tanto, el mayor coeficiente obtenido para el acero 316 de espesor 0,8 mm es coherente con el resultado esperado.

Las diferencias del coeficiente de rozamiento y el comportamiento a fricción de los dos tipos de acero 304 estudiados, con valores de dureza y rugosidad similares, se justifican por el diferente estado superficial del material. En la figura 1 se observa la oxidación existente en límite de grano para el acabado superficial 2B, característico del proceso de recocido que sufre en la última etapa de laminación. Esta oxidación es un indicador de que las condiciones a las que se somete la chapa, en su proceso de elaboración, son las que condicionan, inevitablemente, la aparición de óxidos superficiales más allá de la formación de la película de pasivación típica en estos aceros. Este hecho contrasta con la observación de la superficie BA (Fig. 1 b)), en la que no existe dicha oxidación debido a que el tratamiento térmico en el conformado del material se efectúa en condiciones de atmósfera inerte. Los óxidos formados en la superficie del acero actúan separando las superficies en contacto en el rozamiento y, con ello, disminuye la tendencia a la adhesión^[9 y 18]. Por el contrario, cuando la presión es elevada se rompe dicha capa y el contacto entre las superficies deslizantes es directo, aumentando la formación de microsoldaduras.

3.2. Variación del coeficiente de fricción con la velocidad

La variación del coeficiente de rozamiento, μ , con la velocidad a la presión de 20 MPa y para cada uno de los aceros estudiados, se muestra en la figura 8.

Para los diferentes aceros estudiados, el coeficiente de rozamiento experimenta una importante disminución con la velocidad, siendo esta tendencia más acusada en el rango de velocidades 10-500 mm/min, donde se produce una reducción del 20 %. Esta variación del coeficiente de rozamiento se debe, probablemente, al hecho de que las bajas velocidades de deslizamiento favorecen la formación de enlaces químicos entre las superficies rozantes con formación de microsoldaduras^[18], tal y como se constata en el pronunciado efecto *stick-slip* observado en los registros de ensayo (Fig. 9 a)). Además, los posibles efectos microhidrodinámicos que facilitan el transporte de lubricante de unas zonas a otras^[19] en las superficies rozantes son menores a bajas velocidades, lo que corrobora la teoría anterior.

Debido a la gran diferencia de dureza existente entre la matriz y las muestras ensayadas, la rotura de

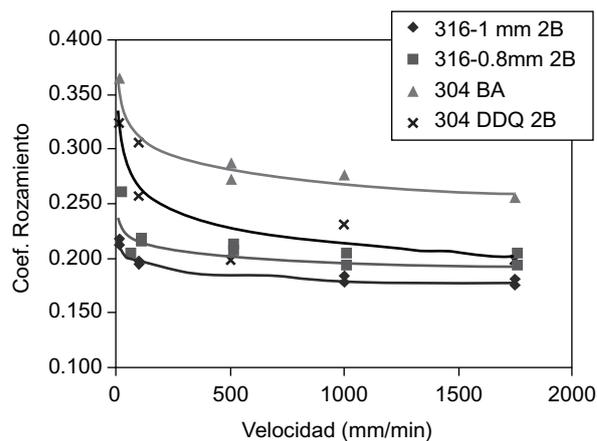


Figura 8. Variación del coeficiente de rozamiento con la velocidad. Lubricante: aceite mineral. Presión 20 Mpa.

Figure 8. Friction coefficient variation with Sliding velocity. Lubricant: mineral oil. Pressure: 20 MPa.

las microsoldaduras formadas se produce sobre el acero inoxidable (Fig. 9 b)).

3.3. Influencia del lubricante

La influencia del lubricante ha sido analizada, a partir de los resultados obtenidos en el acero 304 BA, bajo diferentes condiciones de lubricación: lubricación con aceite mineral, lubricación con grasa (aceite/S₂Mo) y en seco. Los valores correspondientes a los diferentes ensayos realizados se recopilan en la figura 10. Dado que para cada condición de ensayo se han realizado tres muestras, se representan los valores máximos y mínimos obtenidos con el objetivo de considerar la repetibilidad experimental. En dicha figura, se detecta claramente que con grasa S₂Mo se obtienen los valores más bajos del coeficiente de rozamiento, ya que existe una película lubricante que disminuye el contacto entre las superficies de la matriz y el acero inoxidable. También, se observa que estos valores se mantienen prácticamente constantes con la presión, lo que indica que dicha película se mantiene en todo el rango de presiones considerado.

Los ensayos realizados sin lubricación arrojan valores más dispersos del coeficiente de rozamiento, obteniéndose incluso valores superiores a 0,5. Estos valores son coherentes con las fuertes adhesiones y la tendencia creciente de la fuerza de fricción observada en los registros de rozamiento.

Si se comparan los valores del coeficiente de rozamiento obtenidos con aceite como lubricante y en seco, se puede establecer que, para bajas presiones, los

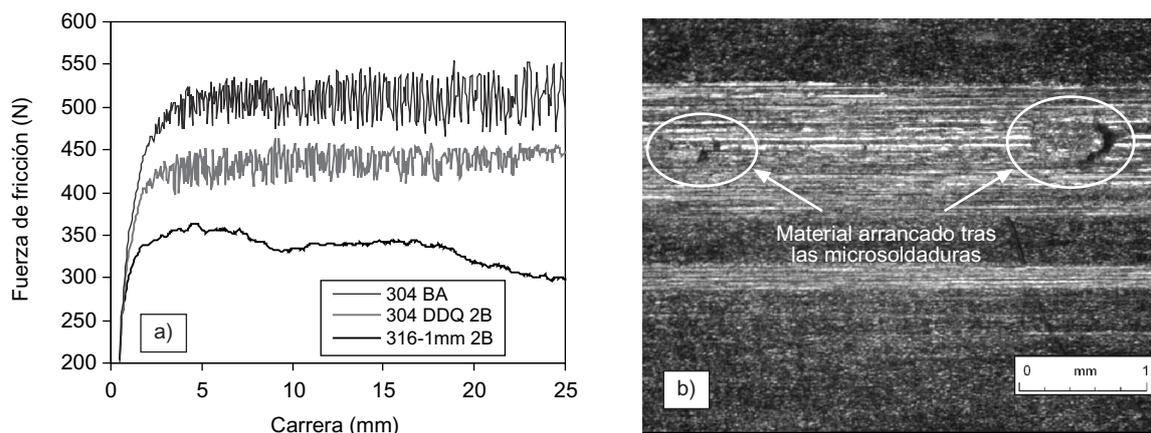


Figura 9. a) Registros de fuerza de rozamiento-carrera en ensayos de rozamiento plano; b) Detalle de las adhesiones producidas en la superficie del acero 304 BA ensayado. Lubricante: aceite mineral, v:10 mm/min, P: 20 MPa.

Figure 9. a) Friction force-stroke registers in flat face friction tests (lubricant: mineral oil). b) Steel 304 BA surface after sliding. Lubricant: mineral oil. V: 10 mm/min. P: 20 MPa.

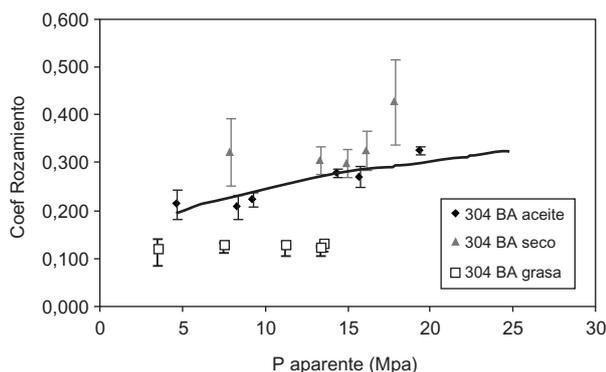


Figura 10. Variación del coeficiente de fricción del acero 304 BA con la presión para distintos lubricantes.

Figure 10. Variation in friction coefficient with different lubricants. Steel: 304 BA.

valores de m son menores en todos los casos con lubricación. Sin embargo, para valores de presiones intermedias en el rango ensayado, los valores de m , con y sin lubricación, tienden a igualarse. Este hecho indica que el lubricante ensayado es poco efectivo a presiones elevadas ($P > 20$ MPa). Para estas presiones se produce la rotura de la película lubricante, aumentando por tanto la zona de contacto entre las superficies rozantes, la rugosidad de las muestras ensayadas [1 y 2] y los valores del coeficiente de rozamiento. En estas condiciones, los ensayos con aceite arrojan valores de rugosidad, $R_a \approx 1 \mu\text{m}$, y coeficientes de rozamiento del mismo orden que los obtenidos en muestras ensaya-

das sin lubricante. Por tanto, los resultados corroboran la teoría del rozamiento adhesivo mencionada anteriormente para las presiones ensayadas en el acero 304. Estos resultados son comparables a los obtenidos por Andreasen [1 y 2], que estudia la efectividad de distintos lubricantes basándose en el efecto de rotura de la película. Este autor comprueba que la rotura de la película lubricante da lugar a un gran incremento de la rugosidad superficial de las muestras ensayadas ($R_a \approx 1 \mu\text{m}$) y que las condiciones de rozamiento en este caso son similares al rozamiento en seco.

3.4. Caracterización macroestructural de las superficies ensayadas

El análisis superficial de las muestras ensayadas se ha realizado mediante la determinación de la anchura de la banda de rozamiento (zona de contacto) y los parámetros de rugosidad de cada una de las muestras.

En la figura 11 se puede observar el acabado superficial y los perfiles de rugosidad del acero 304 DDQ, ensayado bajo diferentes condiciones de presión, velocidad y lubricación. Si comparamos los valores del ancho de la banda de rozamiento, obtenidos en función de la velocidad, se observa que esta variable no afecta de forma significativa. Sin embargo, la presión presenta una mayor influencia sobre el ancho de banda produciéndose, como cabría esperar, un aumento de la zona de contacto o banda de rozamiento a medida que se incrementa la presión. Este hecho se justifica porque a altas presiones se produce una mayor deformación plástica de las as-

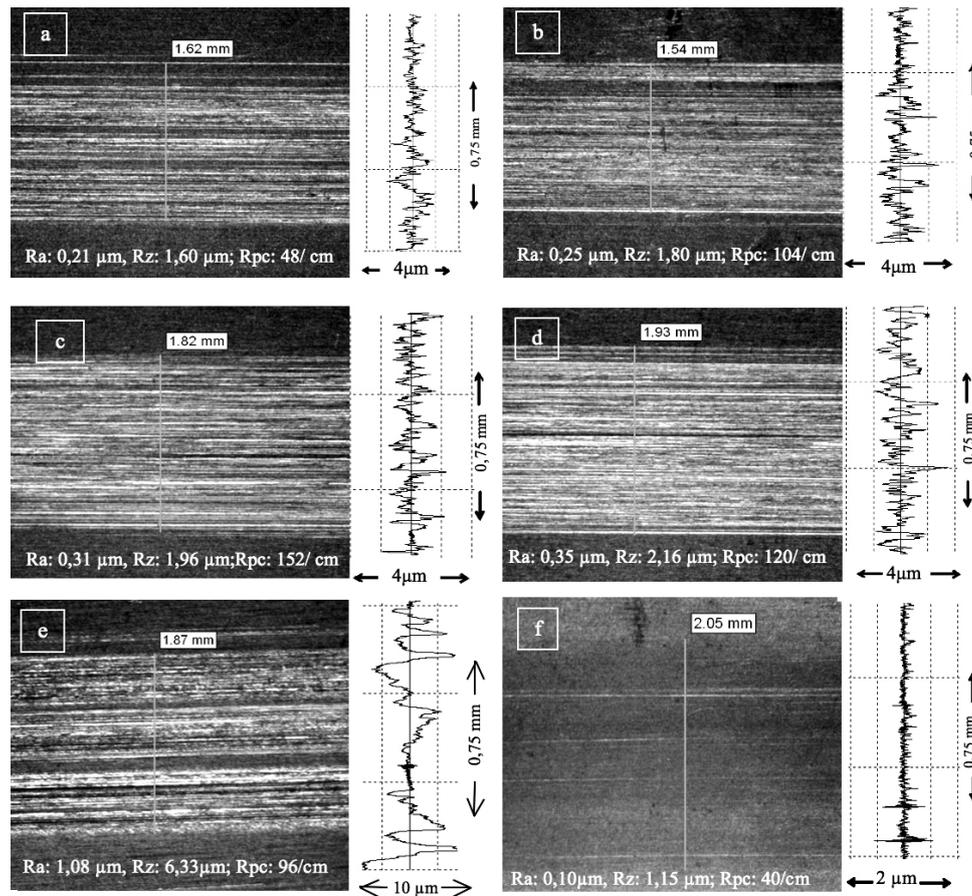


Figura 11. Macrografías y parámetros de rugosidad del acero 304 DDQ ensayado a fricción: a) Aceite, P: 5 MPa, v: 100 mm/min; b) Aceite, P: 5 MPa, v: 1750 mm/min; c) Aceite, P: 20 MPa, v: 100 mm/min; d) Aceite P: 20 MPa, v: 1750 mm/min; e) Sin lubricante, P: 20 MPa, v: 100 mm/min; f) Aceite/S₂Mo, P: 18 MPa, v:100 mm/min.

Figure 11. Macrographs and roughness parameters obtained for AISI 304DDQ steel after sliding: a) Lubricant: mineral oil, P: 5 MPa, v: 100 mm/min; b) Lubricant: mineral oil, P: 5 MPa, v: 1750 mm/min; c) Lubricant: mineral oil, P: 20 MPa, v: 100 mm/min; d) Lubricant: mineral oil, P: 20 MPa, v: 1750 mm/min; e) Without lubricant, P: 20 MPa, v: 100 mm/min; f) Lubricant: S₂Mo/aceite, P: 18 MPa, v:100 mm/min.

perezas que permite aumentar la superficie de contacto entre la matriz y el acero inoxidable.

En relación a los valores de los parámetros de rugosidad, la tendencia de los mismos es similar a la del ancho de banda, produciéndose un incremento de la rugosidad con la presión, debido al aumento de deformación superficial comentado anteriormente. Como consecuencia, se desprende que la presión afecta de forma importante al efecto de *plowing* para el acero considerado en condiciones de no existencia de película lubricante entre las superficies en contacto.

Por tanto, se observa que el factor determinante es el lubricante utilizado, siendo la grasa el que permite obtener un mejor acabado superficial ya que apenas existe *plowing* debido a que no hay contacto entre las superficies rozantes.

3. 5. Caracterización microestructural

El estudio microestructural ha tenido por objeto analizar los cambios microestructurales en la superficie del material. Este estudio se ha realizado sobre una sección transversal de las muestras ensayadas en las condiciones más severas, velocidad de 100 mm/min, presión de 20 MPa y sin lubricante. A su vez, sobre estas muestras se han realizado medidas de microdureza en la zona próxima al borde. Las características microestructurales observadas muestran que, en estas condiciones de ensayo, no se producen cambios significativos en la microestructura y dureza de las zonas de contacto en las que los ensayos de fricción se han desarrollado en régimen, predominantemente, interferencial. Sin embargo, aparecen algunas zonas

(Fig. 7), principalmente en el acero 304 y 304 DDQ, en las que se observa una importante deformación plástica y pérdida de material, característica de los fenómenos de gripado o *galling*. También, se observa que estas zonas son más frecuentes en las muestras del acero 304 que en el 304 DDQ. Estos resultados justifican los elevados valores del coeficiente de rozamiento y elevados valores de rugosidad obtenidos en las muestras ensayadas sin lubricante, constatándose la existencia del mencionado efecto *plowing*.

Los resultados obtenidos revelan el gran incremento de dureza superficial producido en estas zonas, con incrementos de 140 HV en las zonas más deformadas del acero 304 y 304 DDQ. Las dos muestras de acero 316 presentan un incremento de dureza de 50 HV, muy inferior al del 304, ya que, como se había comentado anteriormente, en estos aceros se produce menor deformación.

4. CONCLUSIONES

Se ha evaluado el coeficiente de rozamiento para tres grados diferentes de acero inoxidable austenítico y dos calidades de acabado superficial, estudiando la influencia de la presión y de la velocidad de deslizamiento en condiciones de lubricación límite.

Se ha justificado la existencia de rozamiento, predominantemente adhesivo, para el acero 304 en condiciones de no lubricación y de lubricación con aceite mineral, lo que establece este tipo de comportamiento para el rango de presiones de uso de estos aceros.

También, se ha constatado que el efecto *plowing* es importante para las condiciones indicadas.

El empleo de acero AISI 316 conduce a comportamiento preferentemente interferencial, mejorando las condiciones del rozamiento. También, se puede disminuir el efecto *plowing* y el rozamiento adhesivo con el empleo de lubricantes sólidos que impiden el contacto superficial y la formación de microsoldaduras.

El estado superficial del acero tiene una marcada influencia para las bajas presiones. Así, el acabado superficial 2B tiene una menor tendencia a la adhesión debido a los óxidos presentes en la superficie que impiden el contacto entre las asperezas de los materiales rozantes.

En las condiciones severas de ensayo, caracterizadas fundamentalmente por el deslizamiento en seco, se ha observado un importante efecto de *plowing* sobre el material, especialmente para los dos grados del acero 304, que endurece superficialmente de manera notable. Esto supone una modificación del estado superficial que debería ser tenida en cuenta en los procesos de conformado con rozamiento, si están sujetos a condiciones adhesivas.

REFERENCIAS

- [1] J.L. Andreasen, N. Bay, M. Andersen, E. Christensen y N. Bjerrum, *Wear* 207 (1997) 1-5.
- [2] J.L. Andreasen, N. Bay y L. De Chiffre, *Int. J. Mat. Tools Manufact.* 38 (1998) 503-510.
- [3] D.D. Olsson, N. Bay y J.L. Andreasen, *CIRP Ann. Manuf. Technol.* 53 (2004) 231-234.
- [4] E. Van der Heide, *Wear* 254 (2003) 1.127-1.133.
- [5] E. Sheadin, *Proc. Conf. Applications on Stainless Steel*, Jernkontoret, Stockholm, Suecia, 1992, pp.137-46.
- [6] M.P.F. Sutcliffe, H.R. Le y D. Farrugia, *Wear* 254 (2003) 523-531.
- [7] Z. Wang, K. Dohda y Y. Haruyama, *Wear* 260 (2006) 249-257.
- [8] G. Bregiozzi, A. Schino, J.M. Kenny y H. Haefke, *Mater. Lett.* 57 (2003) 4.505-4.508.
- [9] A. Määttä, P. Vuoristo y T. Mäntylä, *Tribol. Int.* 34 (2001) 779-786.
- [10] E. Iizuka, C. Fuginaga, T. Hira, M. Morita y O. Furukimi, *IDDRG Biennial Congress 17th*, Shenyang, China, 1992, pp. 239-247.
- [11] C. Ferrer, J.J. Saura, K.A. Razzaq, A. Carcel, G. Esteller y M.A. Pérez-Puig, *II Congreso Ibérico de Tribología TRIB 2003*, Valencia, España, Ed. UPV, 2003, pp. 49-56.
- [12] V. Miguel, C. Ferrer, A. Calatayud, A. Martínez y J. Coello, *II Congreso Ibérico de Tribología TRIB 2003*, Valencia, España, Ed. UPV, 2003, pp. 1-6.
- [13] J. Coello, V. Miguel, C. Ferrer, A. Calatayud y A. Martínez, *International Deep-drawing Research Group, IDDRG 2007 Int. Conf.*, Győr, Hungría, 2007, Mikós Tisza (Ed.), University Publisher in Miskolc, 2007, pp. 139-146.
- [14] G. Di Caprio, *Los aceros inoxidables*, Ed. Grupinox, Barcelona, España (1999) pp. 225-229.
- [15] J. Coello, V. Miguel, A. Calatayud, A. Martínez y C. Ferrer, *IV Congreso Ibérico de Tribología*, Bilbao, España, 2007, pp. 1-8.
- [16] F. P. Borden y D. Tabor, *The friction and lubrication of solids*, Ed. Oxford Classics Series, EE.UU., 2001, pp. 90-115.
- [17] M. A. Martínez, J. Ordieres, J. Botella, R. Sánchez y R. Parra, *Rev. Metal. Madrid* Vol. Extr. (2005) 64-68.
- [18] ASM Handbook 18 *Friction, Lubrication and Wear Technology*, 3rd ed., ASM International, EE.UU., 1998, pp. 27-39.
- [19] A. Wihlborg y L. Gunnarson, *IDDRG Biennial Congress 17th*, Shenyang, China, 1992, pp. 281-289.