

# Efecto de las condiciones de superficie en obra sobre el coeficiente de fricción estático de materiales metálicos

## *Site surface conditions effects on the static friction coefficient for metallic materials*

J.C. Chanchí Golondrino\*<sup>1</sup> <https://orcid.org/0000-0003-2706-3856>

B. Moreno Castañeda\* M. Restrepo Botero\*

\* Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Caldas, COLOMBIA

Fecha de Recepción: 30/12/2022

Fecha de Aceptación: 02/06/2023

Fecha de Publicación: 02/08/2023

PAG: 275-294

### Resumen

Se propone una metodología para cuantificar variaciones del coeficiente de fricción estático  $\mu$  debido a diferentes condiciones de superficie en obra para materiales metálicos con radio de dureza  $\rho = 0.5 - 2.9$ .  $\rho$  es definido como la relación entre la dureza del material y la del Acero A36. Para cada material, 7 probetas fueron consideradas en las condiciones de obra “limpia”, “comprada”, “pulida” y “corroída”. Los resultados muestran que respecto a la condición “limpia”, si las superficies se mantienen como compradas,  $\mu$  puede incrementarse o reducirse hasta el 20%, si las superficies se pulen,  $\mu$  puede incrementarse hasta el 37% y si las superficies se corroen  $\mu$  puede incrementarse hasta el 410% para tasas de corrosión entre 90 – 670  $\mu\text{m/año}$ . Los resultados también muestran que para superficies limpias y para  $\rho \leq 1.7$ ,  $\mu$  es dependiente de  $\rho$  y para  $\rho > 1.7$ ,  $\mu$  es aproximadamente constante. Un modelo que predice la variación de  $\mu$  para las condiciones de superficie en obra consideradas fue propuesto.

**Palabras Clave:** Materiales metálicos; Coeficiente de fricción estático; Condiciones de obra; Corrosión; Radio de dureza.

### Abstract

*A methodology for quantifying the variation of the static friction coefficient  $\mu$  due to different site surface conditions, and for metallic materials with hardness ratios  $\rho = 0.5 - 2$ , is proposed.  $\rho$  is defined as the ratio between the material hardness and the A36 steel hardness. For each material, 7 coupons were considered in the site conditions “clean”, “bought”, “polished” and “corroded”. Results show if surfaces are kept as “bought”,  $\mu$  may increase or decrease up to 20%, if surfaces are polished,  $\mu$  may increase up to 37%, and if surfaces are corroded  $\mu$  may increase up to 410% when considering corrosion rates of 90 – 670  $\mu\text{m/year}$ . These increments or reductions were calculated respect to the site condition “clean”. Results also show for “clean” surfaces and for  $\rho \leq 1.7$ ,  $\mu$  is dependent on  $\rho$ , for  $\rho > 1.7$ ,  $\mu$  is approximately constant. A model for quantifying variations of  $\mu$  for the considered site surface conditions was proposed.*

**Keywords:** *Metallic materials, Friction coefficient, Site conditions, Corrosion, Hardness ratio*

<sup>1</sup> Corresponding author:

Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Caldas, COLOMBIA

author: [ajchanchigo@unal.edu.co](mailto:ajchanchigo@unal.edu.co)

# 1. Introducción

Los primeros ensayos de fricción fueron desarrollados por Da Vinci en 1493, descubriendo que la fricción es dependiente de la fuerza que mantiene unidos los cuerpos e independiente del área de contacto (Hutchings, 2016). Esto fue ratificado por Coulumb y Amontons a través de las leyes que rigen la fricción (Day, 2014):

- i. Se opone al deslizamiento y es independiente de área de contacto y de la velocidad.
- ii. Es el producto entre la fuerza que mantiene unidos los dos cuerpos y el coeficiente de fricción.

En los 50's se propuso que la fricción es causada por la destrucción de las rugosidades entre los cuerpos (Bowden and Tabor, 1950). Recientemente, se propuso que estas rugosidades pueden recuperarse al detenerse el deslizamiento (Hashiguchi, 2020). Estas teorías reconocen que la máxima fricción ocurre antes del deslizamiento y al coeficiente de fricción asociado se le denomina estático (Popov, 2010). Este concepto se usa en el diseño de disipadores sísmicos ensamblados con componentes metálicos que al deslizarse desarrollan fricción (Christopoulos and Filiatrault, 2006), en donde el coeficiente de fricción puede determinarse como:

- i. El estático obtenido para superficies sin desgaste (Popov, 2010).
- ii. El efectivo, el cual incluye el desgaste de las superficies y las pérdidas de tensión en los pernos y es obtenido realizando ensayos del disipador (Khoo et al., 2014).

A la fecha, los valores disponibles de estos coeficientes de fricción corresponden a los de superficies limpias. Sin embargo, en obra, el coeficiente de fricción puede variar debido a que las superficies en las que se desarrollará la fricción:

- i. Cuentan con impurezas adquiridas durante el proceso de almacenamiento y/o transporte.
- ii. Serán pulidas para retirar impurezas antes del proceso de instalación.
- iii. Desarrollaran corrosión durante el almacenamiento y/o vida útil.

Las anteriores condiciones no se tienen en cuenta en el diseño de disipadores, excepto por las reportadas para el caso de corrosión por (Sarraf et al., 2011), (Rodgers et al., 2017), (Chanchi Golondrino et al. 2019). Este artículo propone una metodología simple y económica para evaluar la variación del coeficiente de fricción estático debido a diferentes condiciones de las superficies metálicas en obra. Se consideran diferentes metales deslizando sobre acero A36 y se define la variación del coeficiente de fricción en función del radio de dureza,  $\rho$ , el cual, es la relación entre la dureza de un material metálico dado y la dureza del acero A36 (Moore et al., 1952), (Duque, 2021). Este artículo pretende responder las siguientes preguntas:

- i. ¿Cuál es el efecto del radio de dureza sobre el coeficiente de fricción estático?
- ii. ¿Es el coeficiente de fricción estático dependiente a la condición de superficie en obra?
- iii. ¿Cuál es el mecanismo de corrosión para materiales con radio de dureza entre 0.5 y 2.9?
- iv. ¿Varia el coeficiente de fricción estático debido a la corrosión?
- v. ¿Qué modelo simple predice la variación del coeficiente de fricción estático debido a la condición de superficie en obra?

## 2. Materiales y metodos

### 2.1 Materiales y condiciones de superficie en obra

6 grupos de materiales con 7 probetas cada uno y con dureza Brinell entre 50 BH - 500 BH fueron considerados. El material, la geometría, las propiedades físicas y el radio de dureza,  $\rho$ , promedio para cada grupo de probetas se muestran en la (Tabla 1).

**Tabla 1.** Características de las probetas

Material	Ancho*	Largo*	Espesor*	Volumen*	Masa *	Densidad*	Dureza Brinell*	Radio de dureza*
	cm	cm	cm	cm <sup>3</sup>	gr	gr/cm <sup>3</sup>	BH	$\rho$ ( )
Aluminio	3.0	4.0	0.3	3.6	9.5	2.6	91.0	0.5
Cobre	3.1	4.1	0.3	3.7	32.9	8.9	129.7	0.7
Acero A36	3.1	4.1	0.3	3.5	26.9	7.7	182.2	1.0
Impax	3.2	4.2	0.6	7.9	57.4	7.3	307.5	1.7
Lámina-Antidesgaste	3.2	4.2	0.3	4.2	30.9	7.3	457.3	2.5
Fleje Templado	3.0	4.0	0.3	3.7	28.1	7.7	533.3	2.9

\*Promedio de 7 probetas

En la (Tabla 2), se definen las condiciones de superficie en obra típicas para los 6 grupos de materiales.

**Tabla 2.** Condiciones de superficie en obra

Condición	Definición
<i>Comprada</i>	Se mantuvieron las superficies igual a como fueron compradas.
<i>Limpia</i>	Las impurezas de las superficies fueron removidas con alcohol.
<i>Pulida</i>	Las superficies fueron pulidas con una lija calibre 400 hasta lograr brillo uniforme.
<i>Corroída</i>	Las superficies limpias fueron corroídas aceleradamente.

## 2.2 Angulo de activación de deslizamiento

El ángulo de activación de deslizamiento,  $\theta_{activación}$ , es el ángulo que inicia el deslizamiento de una probeta en reposo. Un dispositivo para medir  $\theta_{activación}$ , fue propuesto y se muestra en la (Figura 1). El dispositivo cuenta con: una plataforma inclinable a través de un tornillo sinfín, dos niveles, cuatro bases nivelantes y un medidor de ángulos con precisión de 0.5°, como se muestra en la (Figura 1). La plataforma inclinable tiene una abertura para incrustar una platina metálica denominada platina de deslizamiento, como se muestra en la (Figura 1). Para determinar  $\theta_{activación}$ , la plataforma con la probeta sobre la platina de deslizamiento se nivela horizontal y posteriormente se inclina hasta activar el deslizamiento de la probeta.

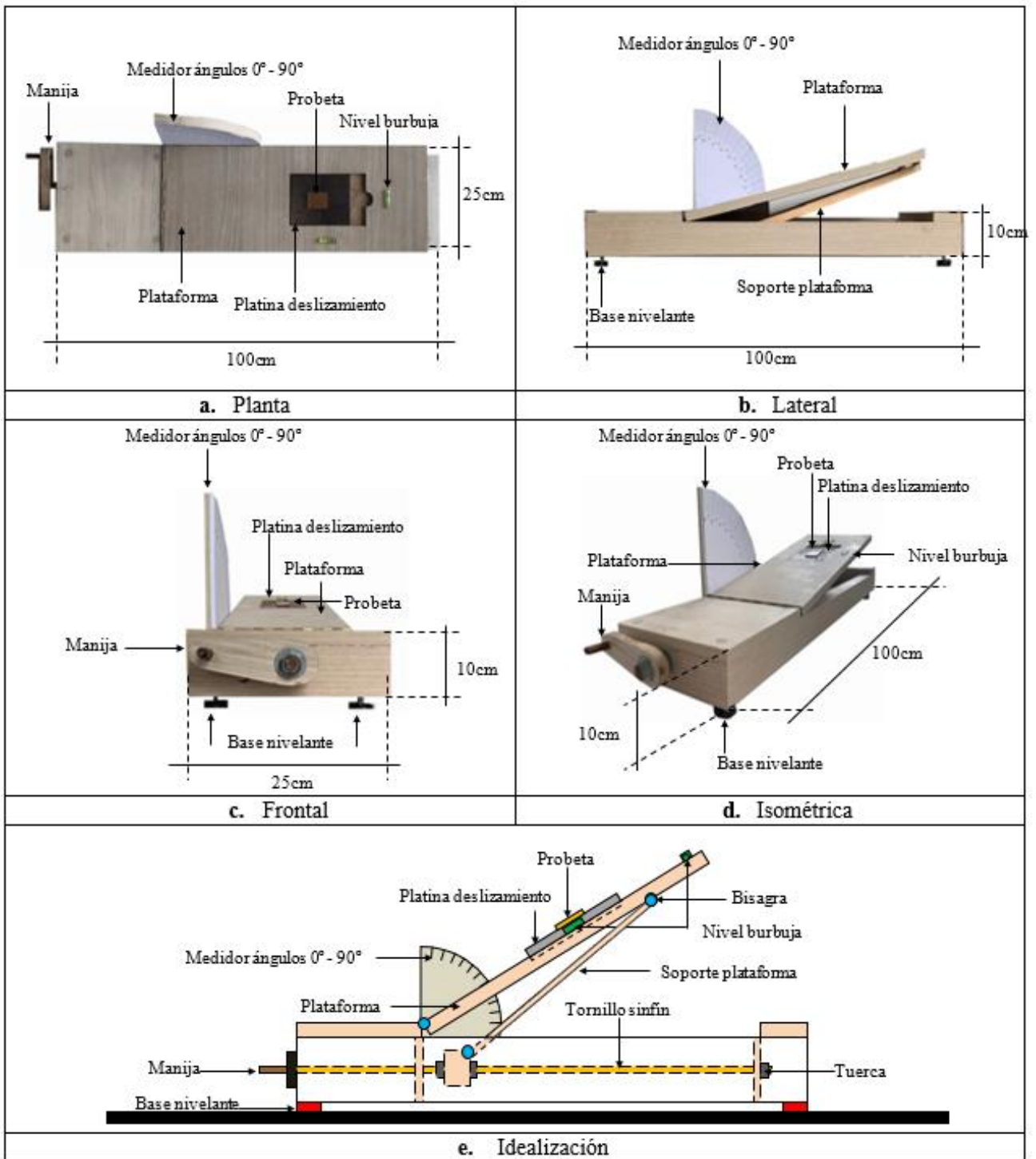


Figura 1. Dispositivo propuesto para medir el ángulo de activación de deslizamiento

### 2.3 Coeficiente de fricción estático

El coeficiente de fricción estático,  $\mu_{estático}$ , se calculó como (Popov, 2010) (Ecuación 1):

$$\mu = \tan(\theta_{activación}) \quad (1)$$

Donde  $\theta_{activación}$  es el ángulo de activación de deslizamiento de la probeta.

### 2.4 Variación del coeficiente de fricción estático por la condición de superficie en obra

La variación del coeficiente de fricción estático por la condición de superficie en obra,  $\gamma$ , es adimensional e indica la variación del coeficiente de fricción estático de una probeta cuando se cambia la condición de superficie en obra respecto a la condición “limpia”.  $\gamma$  se calcula como (Ecuación 2):

$$\gamma = \frac{\mu_i}{\mu_{limpia}} \quad (2)$$

Donde  $\mu_i$  y  $\mu_{limpia}$  son los coeficientes de fricción estáticos de una probeta en una de las condiciones de obra definidas en la (Tabla 2) y en la condición “limpia”, respectivamente.

### 2.5 Ensayo de corrosión

Un dispositivo de corrosión acelerada, similar al propuesto por (Chanchi Golondrino et al., 2019) fue construido. Este dispositivo consta de dos tanques plásticos unidos por una bomba hidráulica. El primero almacenó agua salada. El segundo, un tanque insulated, con un termómetro, una bomba de aire, un elemento de calentamiento y una plataforma de madera y usado para corroer las 42 probetas definidas en la Sección 2.1, como se muestra en la (Figura 2a). Las probetas se dispusieron separadas en 3 niveles sobre una plataforma de madera. En un cuarto nivel, se dispusieron 3 platinas de deslizamiento, como se muestra en las (Figuras 2a), (Figura 2c).

El ensayo de corrosión acelerada buscó que las probetas desarrollaran una tasa de corrosión mínima de  $45\mu\text{m/año}$  y correspondiente a un ambiente altamente corrosivo (Sarraff et al., 2010). Las probetas fueron expuestas a ciclos de 24 horas, cada ciclo constituido por una etapa de inmersión y otra de exposición a vapor (Chanchi Golondrino et al., 2019), como se muestra en la (Figura 2d).

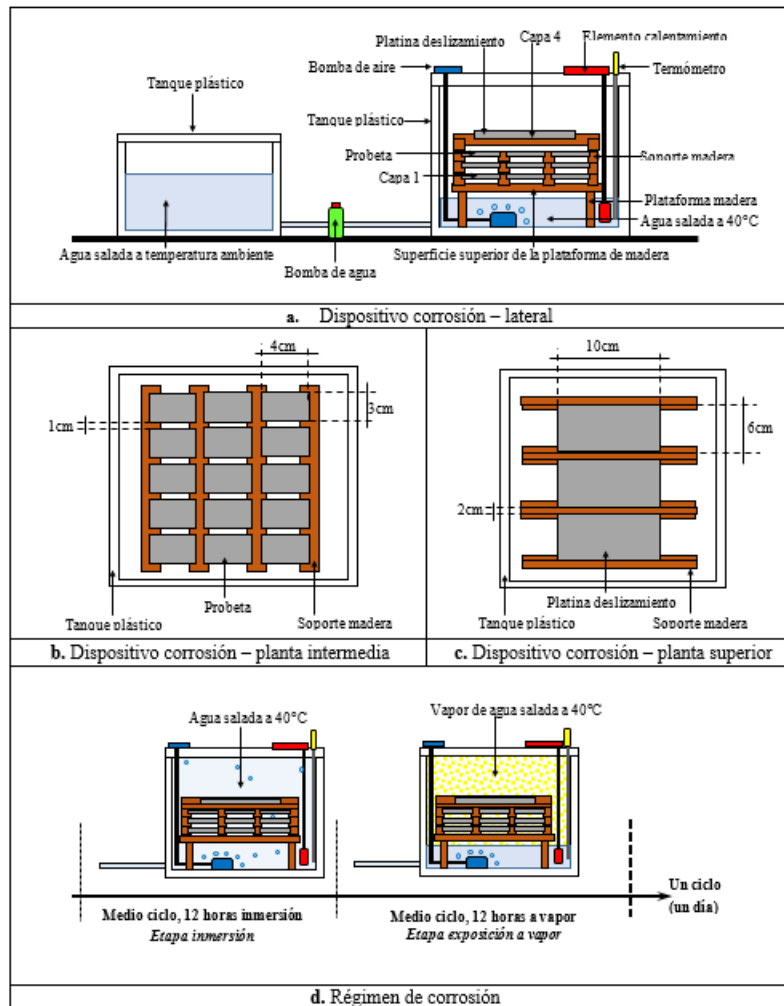
En la etapa de inmersión las probetas fueron sumergidas 12 horas en agua a  $40^\circ\text{C}$  y con una concentración de sal de  $0.05\text{ kg/lt}$  y en la etapa de exposición a vapor a 12 horas de vapor de agua salada calentada a  $40^\circ\text{C}$ , como se muestra en la (Figura 2d). En estas dos etapas, un flujo de aire de  $200\text{lt/hora}$  fue inyectado al agua salada a través de la bomba de aire. Este ciclo corrosivo se repitió 84 veces y cada 7 ciclos las probetas fueron lavadas para retirar el producto corrosivo.

### 2.6 Pérdida de masa por corrosión

La pérdida de masa por corrosión,  $P$ , es la reducción de masa de una probeta después de ser corroída y lavada.  $P$  se expresa en porcentaje y se calcula como (Ecuación 3):

$$P = \frac{m_i - m_0}{m_0} * 100 \quad (3)$$

Donde  $m_o$  y  $m_i$  son las masas de la probeta, antes de ser corroída y después de  $i$  semanas de corrosión.



**Figura 2.** Dispositivo y régimen de corrosión.

**2.7 Rata de corrosión**

La rata de corrosión,  $RC$ , representa la velocidad de pérdida de masa por corrosión, se expresa en  $\mu m/año$  y se calcula como (ASTM International, 2012) (Ecuación 4):

$$RC = 521428 * \frac{m_o - m_i}{A_e * D * S_i} \tag{4}$$

Donde  $m_o$  y  $m_i$  son las masas en gramos de una probeta, antes y después de ser corroídas  $i$  semanas, respectivamente.  $A_e$  es la superficie total de la probeta en  $cm^2$ ,  $D$  es la densidad en  $gr/cm^3$  del material de la probeta y  $S$  es el número de semanas de corrosión.

## 2.8 Ganancia de coeficiente de fricción estático por corrosión

La ganancia de coeficiente de fricción estático por corrosión,  $\beta$ , es adimensional y representa el aumento del coeficiente de fricción estático,  $\mu$ , después de corroer una probeta.  $\beta$  se calcula como (Ecuación 5):

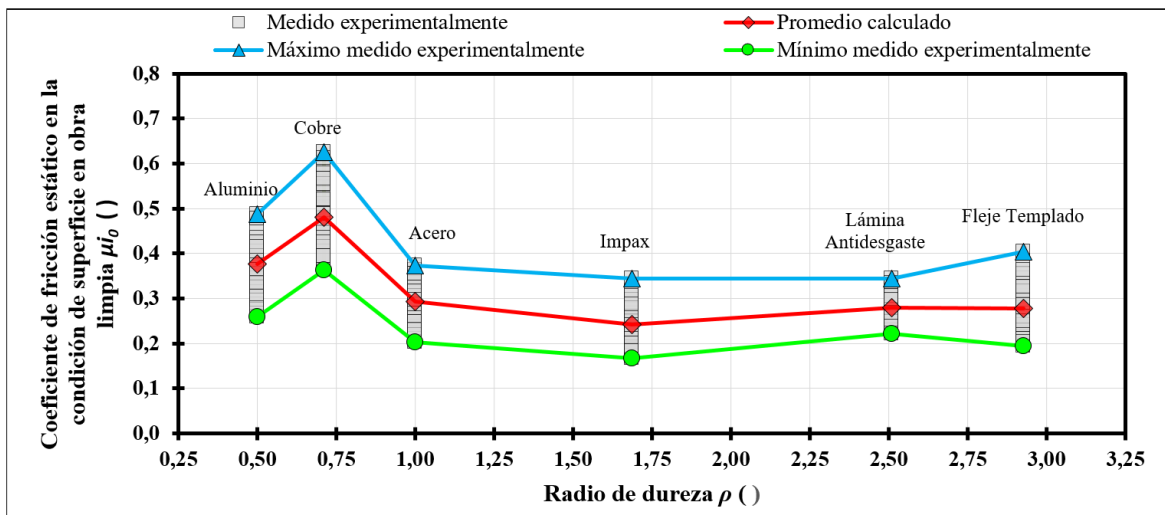
$$\beta_{promedio} = \frac{\mu_{i promedio}}{\mu_0 promedio} \quad (5)$$

Donde  $\mu_{i promedio}$  y  $\mu_{0 promedio}$  son los coeficientes de fricción estáticos promedio para un grupo de probetas después de ser corroídas  $i$  semanas y antes de ser corroídas, respectivamente.

## 3. Resultados y análisis

### 3.1 Efecto del radio de dureza en el coeficiente de fricción estático para la condición limpia

La (Figura 3) muestra la variación del coeficiente de fricción estático para la condición limpia,  $\mu_{i0}$ , definida en la (Tabla 2) y con las 6 categorías del radio de dureza,  $\rho$ , definidas en la (Tabla 1). Para cada categoría de  $\rho$ , 28  $\mu_{i0}$  fueron obtenidos usando la metodología descrita en las Secciones 2.2 - 2.3 y correspondieron a 4 ensayos por probeta.



**Figura 3.** Efecto del radio de dureza  $\rho$  sobre el coeficiente de fricción estático en la condición limpia  $\mu_{i0}$

La (Figura 3) muestra que los  $\mu_{i0}$  más altos ocurrieron para  $\rho = 0,7$ . Para  $0,7 < \rho < 1,7$ ,  $\mu_{i0}$  reduce. Sin embargo, para  $\rho > 1,7$ ,  $\mu_{i0}$  reduce solo hasta  $\rho = 1,7$ , para después volverse aproximadamente constante. Estos resultados indican que  $\mu_{i0}$  sólo es sensible para  $\rho < 1,7$  y que el máximo valor de  $\mu_{i0}$  se puede lograr al deslizar Cobre sobre Acero A36. La (Tabla 3) resume los  $\mu_{i0}$  máximo, mínimo, y promedio, obtenidos desde la (Figura 3).

**Tabla 3.** Coeficiente de fricción estático en la condición de superficie en obra limpia  $\mu_{i0}$ 

Material	Radio dureza $\rho$ ( )	$\mu_{i0}$		
		Máximo*	Mínimo*	Promedio*
		$\mu_{i0-max}$ ( )	$\mu_{i0-min}$ ( )	$\mu_{i0}$ ( )
Aluminio	0.5	0.49	0.26	0.39
Cobre	0.7	0.46	0.36	0.41
Acero A36	1.0	0.37	0.20	0.30
Impax	1.7	0.34	0.17	0.24
Lámina Antidesgaste	2.5	0.32	0.22	0.28
Fleje Templado	2.9	0.38	0.19	0.27

### 3.2 Efecto de la condición de superficie en obra sobre el coeficiente de fricción estático

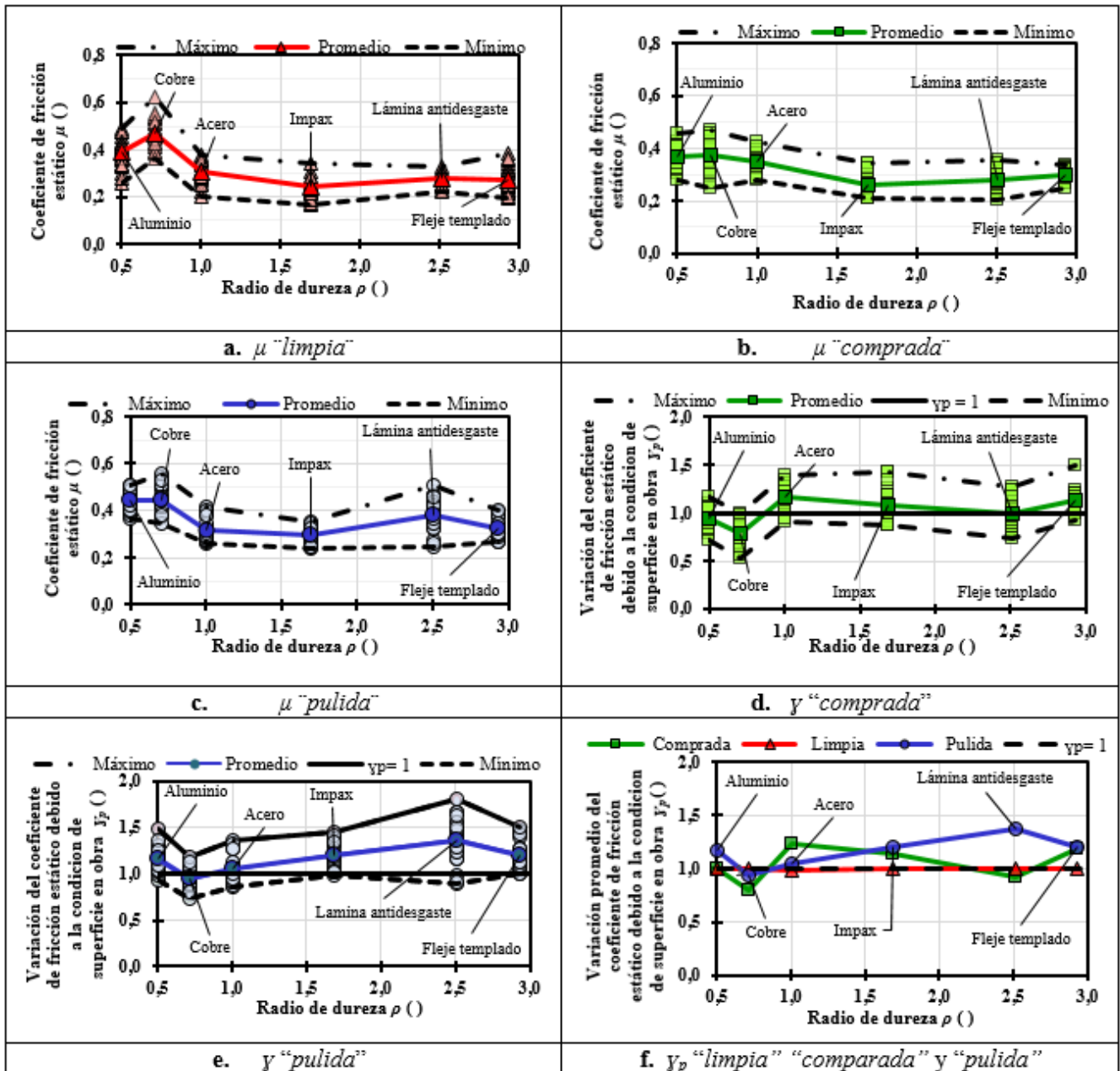
Las (Figura 4a), (Figura 4b) y (Figura 4c) muestran el coeficiente de fricción estático,  $\mu$ , para las condiciones de superficie en obra “limpia”, “comprada” y “pulida” definidas en la (Tabla 2) y en las 6 categorías del radio de dureza,  $\rho$ , definidas en la (Tabla 1). Para cada  $\rho$ , 28  $\mu$  fueron obtenidos usando la metodología descrita en las Secciones 2.2 - 2.3. Las (Figura 4a), (Figura 4b) y (Figura 4c) muestran que indiferente a la condición de superficie en obra, los valores más altos de  $\mu$  ocurrieron para  $\rho = 0.5 - 0.7$  (aluminio y cobre). Al incrementar  $\rho$  entre 0.7 y 1.7  $\mu$  disminuyó y para  $\rho > 1.7 \mu$  fue aproximadamente constante. La (Tabla 4) muestra los valores mínimo, máximo y promedio de  $\mu$  para las condiciones de superficie en obra “limpia”, “comprada” y “pulida”.

**Tabla 4.** Coeficiente de fricción estático máximo, mínimo y promedio para diferentes condiciones de superficie en obra y  $\rho = 0.5 - 2.9$ 

Material	Radio dureza $\rho$ ( )	Condición superficie en obra								
		Limpia			Comprada			Pulida		
		$\mu_{min}$ ( )	$\mu_{max}$ ( )	$\mu_{prom}$ ( )	$\mu_{min}$ ( )	$\mu_{max}$ ( )	$\mu_{prom}$ ( )	$\mu_{min}$ ( )	$\mu_{max}$ ( )	$\mu_{prom}$ ( )
Aluminio	0.5	0.26	0.49	0.39	0.28	0.46	0.37	0.36	0.51	0.45
Cobre	0.7	0.36	0.62	0.47	0.25	0.47	0.37	0.34	0.55	0.44
Acero A36	1.0	0.20	0.37	0.30	0.28	0.42	0.35	0.26	0.41	0.32
Impax	1.7	0.17	0.34	0.24	0.21	0.34	0.26	0.24	0.35	0.29
Lámina Antidesgaste	2.5	0.22	0.32	0.28	0.20	0.35	0.28	0.25	0.51	0.38
Fleje Templado	2.9	0.19	0.38	0.27	0.25	0.33	0.30	0.27	0.40	0.32

Las (Figura 4d) y (Figura 4d) muestran la variación del coeficiente de fricción estático debido a la condición de superficie en obra,  $\gamma$ , para las condiciones “comprada” y “pulida”, en las 6 categorías del radio de dureza,  $\rho$ . Para cada  $\rho$ , 28  $\gamma$  fueron obtenidos usando la metodología descrita en la Sección 2.4 y el valor promedio,  $\gamma_p$ , se muestra en (la Figura 4f). Las (Figura 4d) y (Figura 4f) muestran que en la condición “comprada”,  $\gamma_p$  varió entre 0.79 y 1.16, indicando que  $\mu$  fue inferior o superior al de la condición “limpia”. Las (Figura 4e) y (Figura 4f) muestran que en la condición “pulida”,  $\gamma_p$  varió entre 0.94 y 1.37, indicando que  $\mu$  fue aproximadamente igual o superior al de la condición “limpia”.





**Figura 4.** Efecto de la condición de superficie en obra sobre el coeficiente de fricción estático,  $\mu$ , para  $\rho = 0.5 - 2.9$

Estos resultados indican que, dependiendo de las condiciones de almacenamiento de los materiales metálicos en el sitio de venta,  $\mu$  puede incrementarse o reducirse respecto a la condición “limpia” y que, al pulir las superficies con el fin de remover impurezas,  $\mu$  permanece igual o se incrementa. La (Tabla 5) muestra los valores mínimo, máximo y promedio de  $\gamma$  para cada condición de superficie en obra y obtenidos desde la (Figura 4).

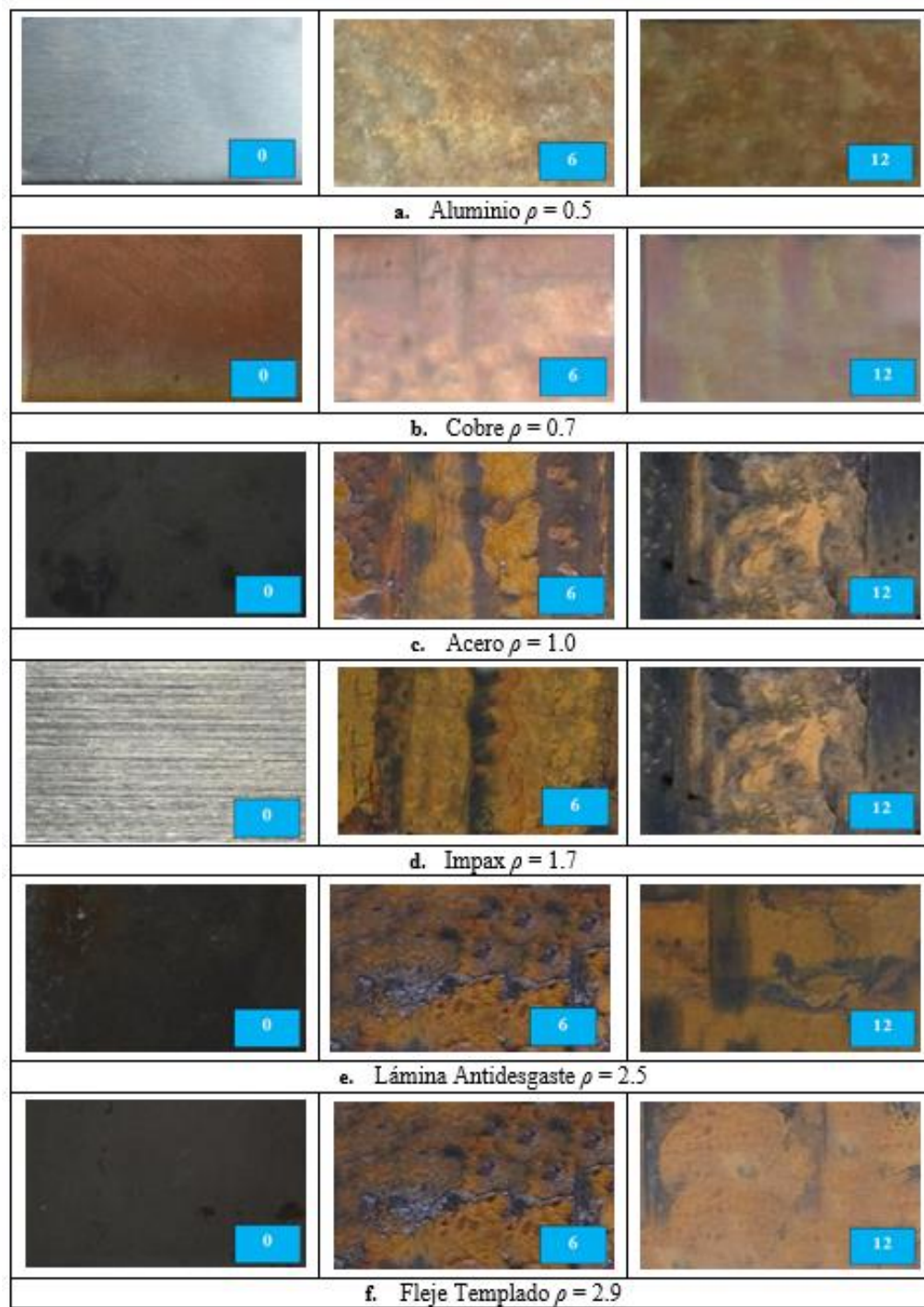
**Tabla 5.** Variación del coeficiente de fricción estático,  $\gamma$ , máximo, mínimo y promedio para diferentes condiciones de superficie en obra y  $\rho = 0.5 - 2.9$

	Radio dureza	Condición superficie en obra								
		Limpia			Comprada			Pulida		
		$\gamma_{min}$	$\gamma_{max}$	$\gamma_{prom}$	$\gamma_{min}$	$\gamma_{max}$	$\gamma_{prom}$	$\gamma_{min}$	$\gamma_{max}$	$\gamma_{prom}$
Material	$\rho$	( )	( )	( )	( )	( )	( )	( )	( )	( )
Aluminio	0.5	0.67	1.26	1.00	0.71	1.17	0.95	0.94	1.49	1.16
Cobre	0.7	0.77	1.33	1.00	0.53	0.99	0.79	0.73	1.18	0.94
Acero A36	1.0	0.67	1.23	1.00	0.91	1.40	1.16	0.85	1.36	1.05
Impax	1.7	0.69	1.42	1.00	0.88	1.42	1.07	0.99	1.46	1.21
Lámina Antidesgaste	2.5	0.79	1.16	1.00	0.73	1.26	0.99	0.89	1.82	1.37
Fleje Templado	2.9	0.72	1.43	1.00	0.93	1.50	0.13	1.00	1.50	1.20

### 3.3 Mecanismo de corrosión

Para cada una de las categorías de radio de dureza,  $\rho$ , descritas en la (Tabla 1), la (Figura 5) muestra la superficie de una probeta antes, en la mitad y al final del ensayo de corrosión (semanas: 0, 6 y 12). En todas las categorías de  $\rho$  se desarrolló corrosión uniforme caracterizada por localización de producto corrosivo entre anaranjado y marrón, el cual se fue expandiendo en la superficie de las probetas. También, después del lavado de las probetas, se observó desprendimiento uniforme de masa de la superficie de las probetas, la cual varío la textura de la superficie de las probetas de lisa a rugosa.

Para cada una de las categorías de radio de dureza,  $\rho$ , descritas en la (Tabla 1), la (Figura 6) muestra, la pérdida de masa,  $P$ , y la rata de corrosión,  $RC$ , calculadas con las (Ecuación 3) y (Ecuación 4). Los valores promedio y una tendencia propuesta de  $P$  y  $RC$  también son mostrados. La (Figura 6) muestra que independientemente del valor de  $\rho$ , mientras  $P$  se incrementó casi linealmente con el tiempo de corrosión,  $RC$  fue aproximadamente constante después de la primera semana. Al final del ensayo de corrosión, para  $\rho = 0.5 - 2.9$ ,  $P$  varío entre 1.5% - 12% y  $RC$  varío entre 90  $\mu\text{m/año}$  - 670  $\mu\text{m/año}$ . Los valores obtenidos de  $RC$  ( $RC \geq 90 \mu\text{m/año}$ ), indican que en el ensayo simuló un ambiente altamente corrosivo, como el definido por (Sarraf et al., 2011), (Chanchi Golondrino et al., 2019). Los valores mínimo y máximo de  $P$  y  $RC$  ocurrieron para el Cobre con  $\rho = 0.5$  y el Fleje Templado con  $\rho = 2.9$ , respectivamente, mostrando que  $P$  y  $RC$  tienen una tendencia creciente con  $\rho$ .



**Figura 5.** Probetas de materiales con  $\rho = 0.5 - 2.9$ , en las semanas 0, 6 y 12 del ensayo de corrosión

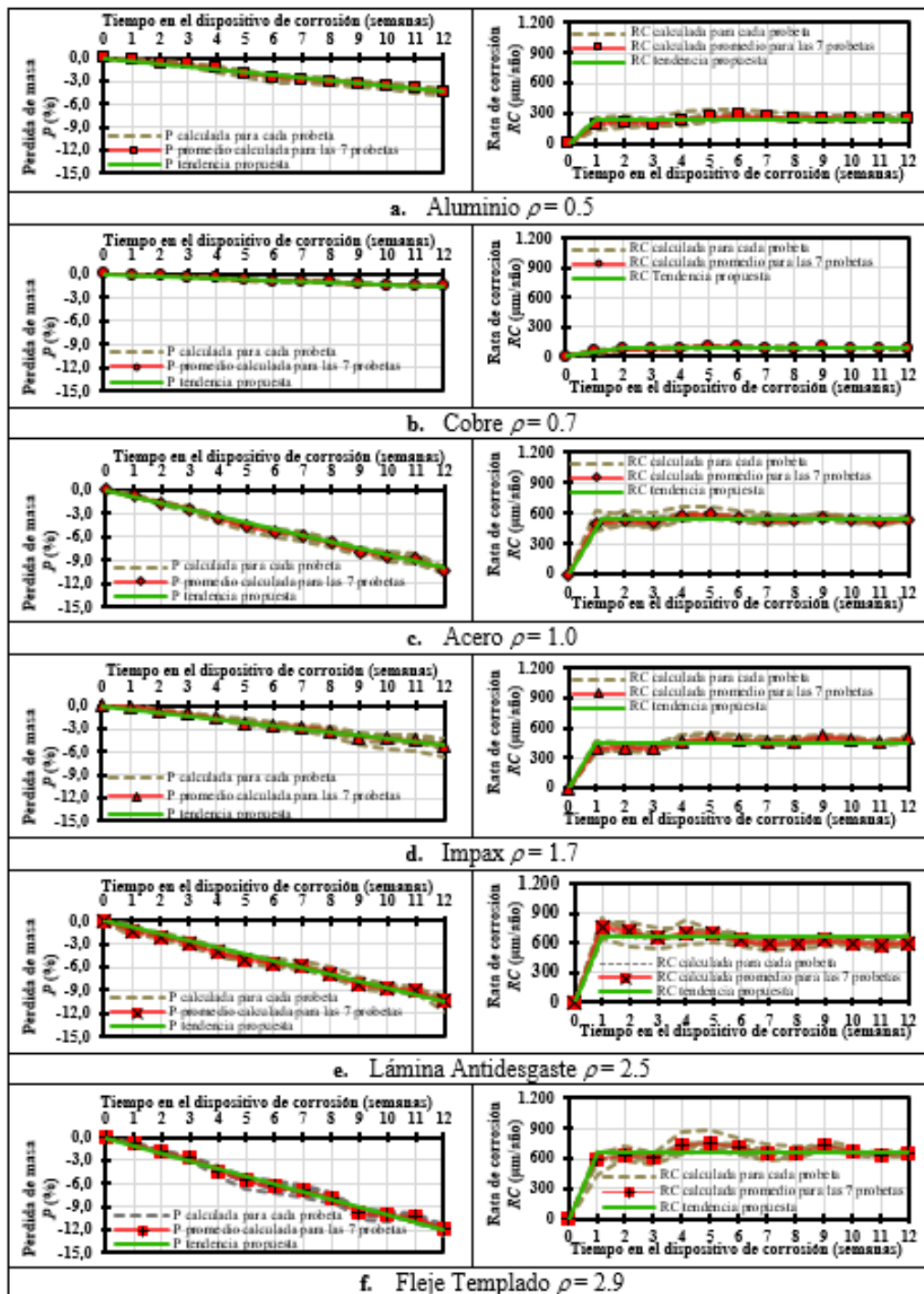


Figura 6. Pérdida de masa  $P$  y rata de corrosión  $RC$  para materiales con  $\rho = 0.5 - 2.9$  durante el ensayo corrosión.

### 3.4 Efecto de la corrosión en el coeficiente de fricción estático

Para cada una de las 7 probetas en cada una de las 6 categorías de radio de dureza,  $\rho$ , descritas en la (Tabla 1), las (Figura 7) y (Figura 8) muestran el coeficiente de fricción estático,  $\mu$ , y la ganancia de coeficiente de fricción estático,  $\beta$ , durante el ensayo de corrosión.  $\mu$  y  $\beta$  fueron evaluados usando las metodologías descritas en las Secciones 2.2, 2.3 y 2.8 y para una platina de deslizamiento de acero A36, en condición limpia y en condición corroída de acuerdo con la descripción de la (Tabla 2).  $\mu$  y  $\beta$  promedio en cada semana,  $\beta$  promedio de las 12 semanas y una tendencia propuesta de  $\beta$ , también son mostradas.

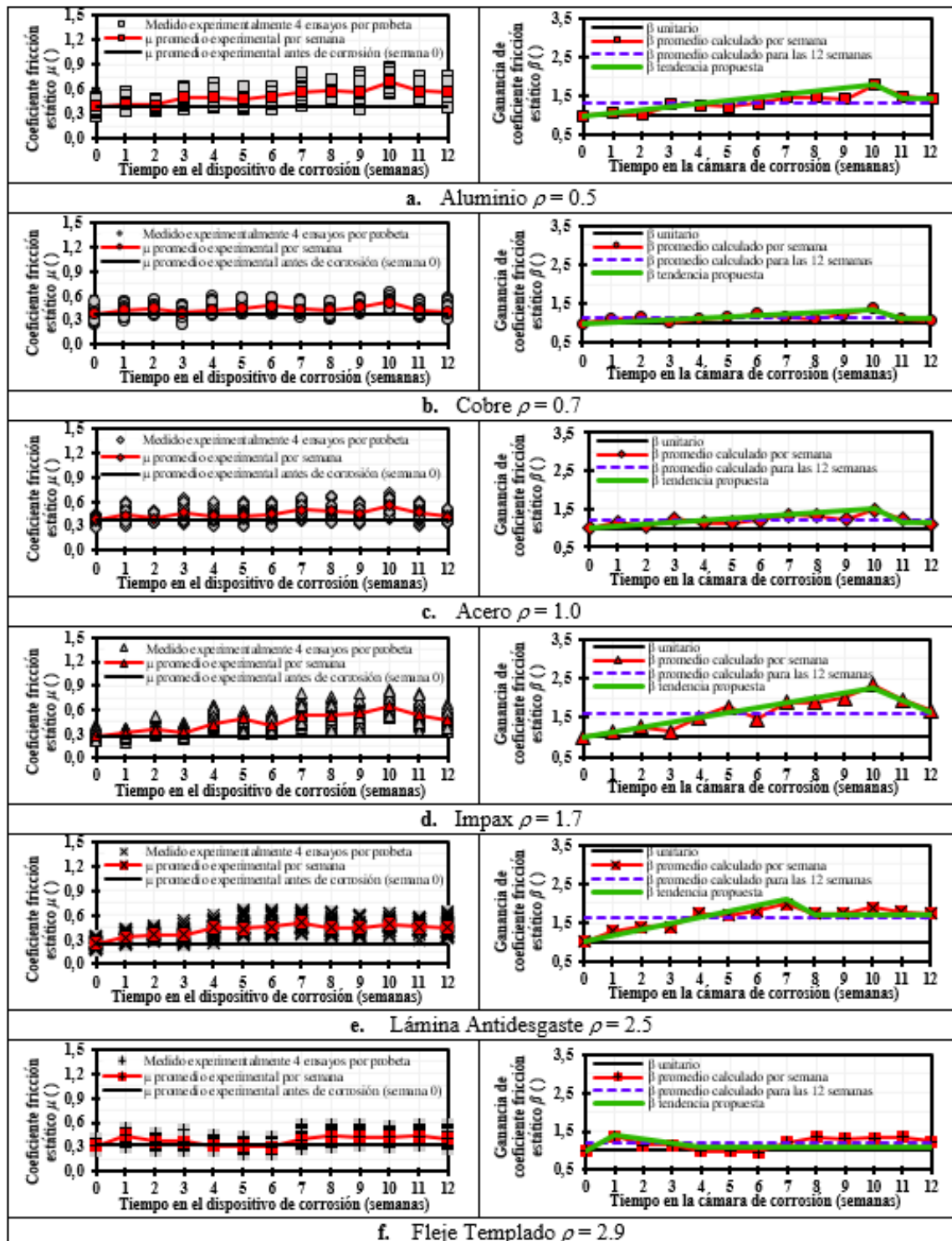
Las (Figura 7) y (Figura 8) muestran que indiferente el valor de  $\rho$  y como resultado de la corrosión,  $\mu$  se incrementó, mostrando valores de  $\beta > 1$ . Inicialmente,  $\beta$  fue aproximadamente lineal con el tiempo de exposición en el dispositivo de corrosión, para posteriormente reducirse y volverse constante. Para un mismo  $\rho$ , los mayores  $\beta$  ocurrieron cuando  $\mu$  fue obtenido deslizando una probeta corroída sobre la platina de deslizamiento corroída, como indican los valores de la (Tabla 6) obtenidos de las (Figura 7) y (Figura 8).

**Tabla 6.** Ganancia del coeficiente de fricción estático  $\beta$  para materiales con  $\rho = 0.5 - 2.9$  y sometidos a corrosión

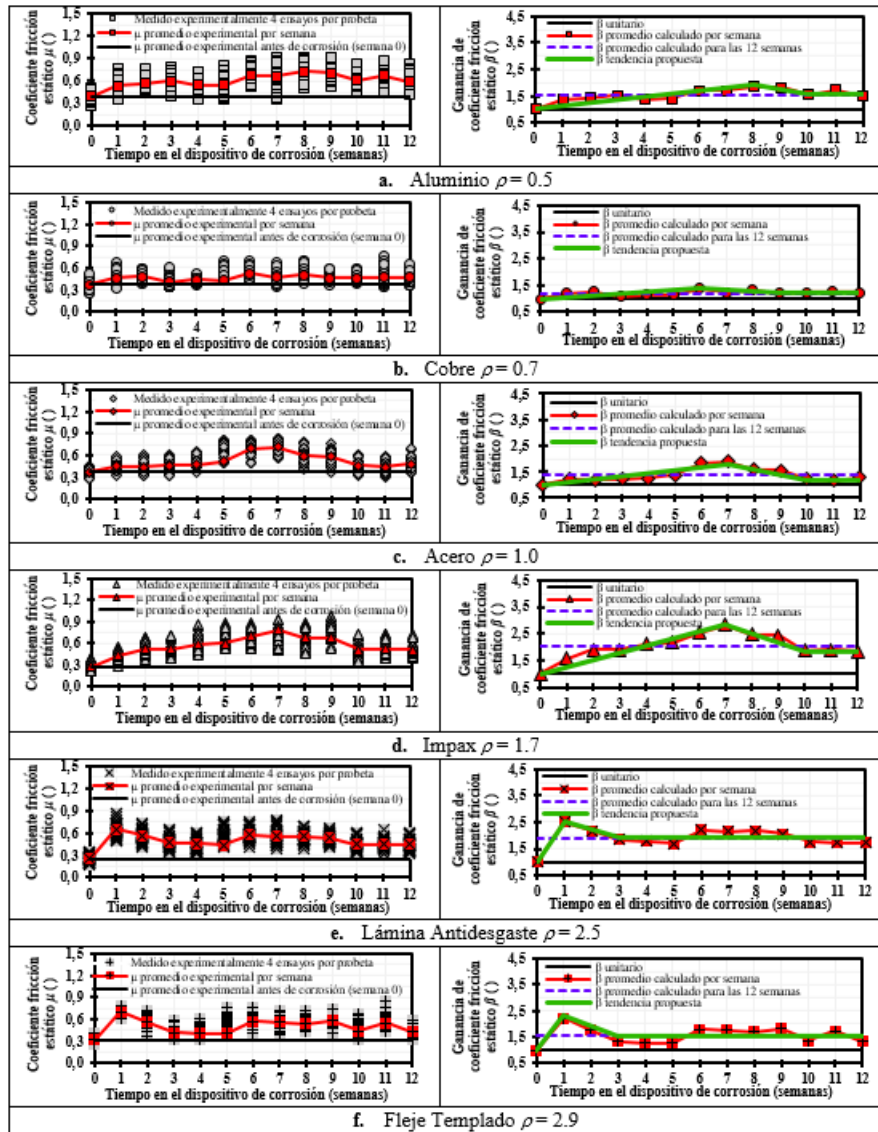
	Radio dureza	Probeta corroída deslizando sobre platina de:					
		Acero A36 Limpio			Acero A36 Corroído		
		$\beta_{\text{máximo}}$	$\beta_{\text{constante}}$	$\beta_{\text{promedio}}$	$\beta_{\text{máximo}}$	$\beta_{\text{constante}}$	$\beta_{\text{promedio}}$
Material	( )	( )	( )	( )	( )	( )	( )
Aluminio	0.5	1.8	1.5	1.3	1.9	1.6	1.5
Cobre	0.7	1.3	1.1	1.1	1.4	1.2	1.2
Acero A36	1.0	1.5	1.2	1.2	1.8	1.3	1.4
Impax	1.7	1.5	1.7	1.6	2.8	1.8	2.0
Lámina Antidesgaste	2.5	2.1	1.7	1.6	2.5	1.9	1.9
Fleje Templado	2.9	1.4	1.1	1.2	2.3	1.5	1.6

Las (Figuras 7), (Figura 8) y la (Tabla 6) muestran que para  $\rho = 0.5 - 2.9$ , los  $\beta$  más altos variaron en el rango 1.3 - 2.1 y 1.4 - 2.8, cuando  $\mu$  fue obtenido usando la platina de deslizamiento en condición limpia y en condición corroída, respectivamente. Estos resultados indican que los incrementos más altos de  $\mu$  ocurrieron cuando las probetas corroídas deslizaron sobre la platina de deslizamiento corroída y que los materiales más propensos a incrementar  $\mu$  debido a corrosión fueron el Impax con  $\rho = 1.7$  y la Lámina Antidesgaste con  $\rho = 2.5$ . Por esta razón, en aplicaciones de fricción, no es conveniente usar superficies corroídas debido a que estas incrementan el coeficiente de fricción y este incremento depende del tiempo de exposición a la corrosión.





**Figura 7.** Coeficiente fricción estático  $\mu$  y ganancia de coeficiente fricción estático  $\beta$  obtenidos sobre superficie deslizamiento “limpia”, para materiales con  $\rho = 0.5 - 2.9$  y “corroídos”



**Figura 8.** Coeficiente fricción estático  $\mu$  y ganancia de coeficiente fricción estático  $\beta$  obtenidos sobre superficie deslizamiento “corroída”, para materiales con  $\rho = 0.5 - 2.9$  y “corroídos”

## 4. Modelo propuesto del coeficiente de fricción estático

El modelo predice el coeficiente de fricción estático mínimo,  $\mu_{\text{mínimo}}$ , y máximo,  $\mu_{\text{máximo}}$ , para las condiciones de superficie en obra: “comprada”, “pulida”, y “corroída”, a partir de los coeficientes de fricción estático promedio para la condición de superficie en obra “limpia”,  $\mu_{i0}$ , listados en la (Tabla 3). Estas condiciones de superficie en obra fueron definidas en la (Tabla 2). La relación entre  $\mu_{\text{mínimo}}$ ,  $\mu_{\text{máximo}}$  y  $\mu_{i0}$  es propuesta a través de las siguientes expresiones (Ecuación 6) y (Ecuación 7):

$$\mu_{\text{mínimo}} = \alpha \times \mu_{i0} \tag{6}$$

$$\mu i_{\text{máximo}} = \lambda \times \mu i_0 \quad (7)$$

Donde,  $\alpha$  y  $\lambda$  son coeficientes de reducción y amplificación, respectivamente.

En la (Figura 9) los valores de  $\mu i_0$  fueron graficados sobre los coeficientes de fricción estáticos medidos experimentalmente y reportados en las (Figura 4), (Figura 7) y (Figura 8) para las condiciones de superficie en obra “comprada”, “pulida”, y “corroída. Las tendencias de  $\mu i_{\text{mínimo}}$  y  $\mu i_{\text{máximo}}$ , que envuelven los datos experimentales se ajustaron a los valores de  $\alpha$  y  $\lambda$  presentados en la (Tabla 7) y calculados mediante la (Ecuación 6) y la (Ecuación 7). La (Tabla 7) muestra que  $\alpha$  y  $\lambda$  varían en los rangos 0.5 - 0.9 y 1.1 - 4.1, respectivamente, para todas las condiciones de superficie en obra.

**Tabla 7.** Coeficiente de reducción  $\alpha$  y coeficiente de amplificación  $\lambda$  para materiales con  $\rho = 0.5 - 2.9$  y en diferentes condiciones de superficie en obra

	Radio dureza	$\alpha$				$\lambda$			
		Comprada	Pulida	*	**	Comprada	Pulida	*	**
Material	$\rho$ ( )	( )	( )	( )	( )	( )	( )	( )	( )
Aluminio	0.5	0.7	0.9	0.5	0.7	1.2	1.4	2.3	2.4
Cobre	0.7	0.6	0.8	0.6	0.6	1.1	1.4	1.6	1.8
Acero	1.0	0.9	0.8	0.9	0.9	1.5	1.5	2.4	2.9
Impax	1.7	0.8	0.9	0.8	0.8	1.5	1.6	3.6	4.1
Lámina Antidesgaste	2.5	0.7	0.8	0.6	0.6	1.4	1.9	2.5	3.1
Fleje templado	2.9	0.9	0.9	0.8	0.9	1.3	1.6	2.3	3.2

\* Deslizado sobre superficie de acero A36 limpia

\*\*Deslizado sobre superficie de acero A36 corroída

La (Figura 10) muestra la variación de los factores  $\alpha$  y  $\lambda$  con  $\rho$ , para las condiciones de superficie en obra consideradas. Los valores más bajos de  $\alpha$  (0.5 - 0.8) y los más altos de  $\lambda$  (1.7 - 4.1) ocurrieron para las condiciones “*corroída deslizando sobre superficie de acero A36 limpia*” y “*corroída deslizando sobre superficie de acero A36 corroída*”. Estos resultados indican que para aplicaciones de fricción en donde se deslice un metal sobre una superficie de acero A36, no es conveniente el uso de una o ambas superficies corroídas. Esto es debido a que como resultado de la corrosión se tiene la reducción más baja o la amplificación más alta del coeficiente de fricción estático respecto a la condición de superficie en obra “limpia”.



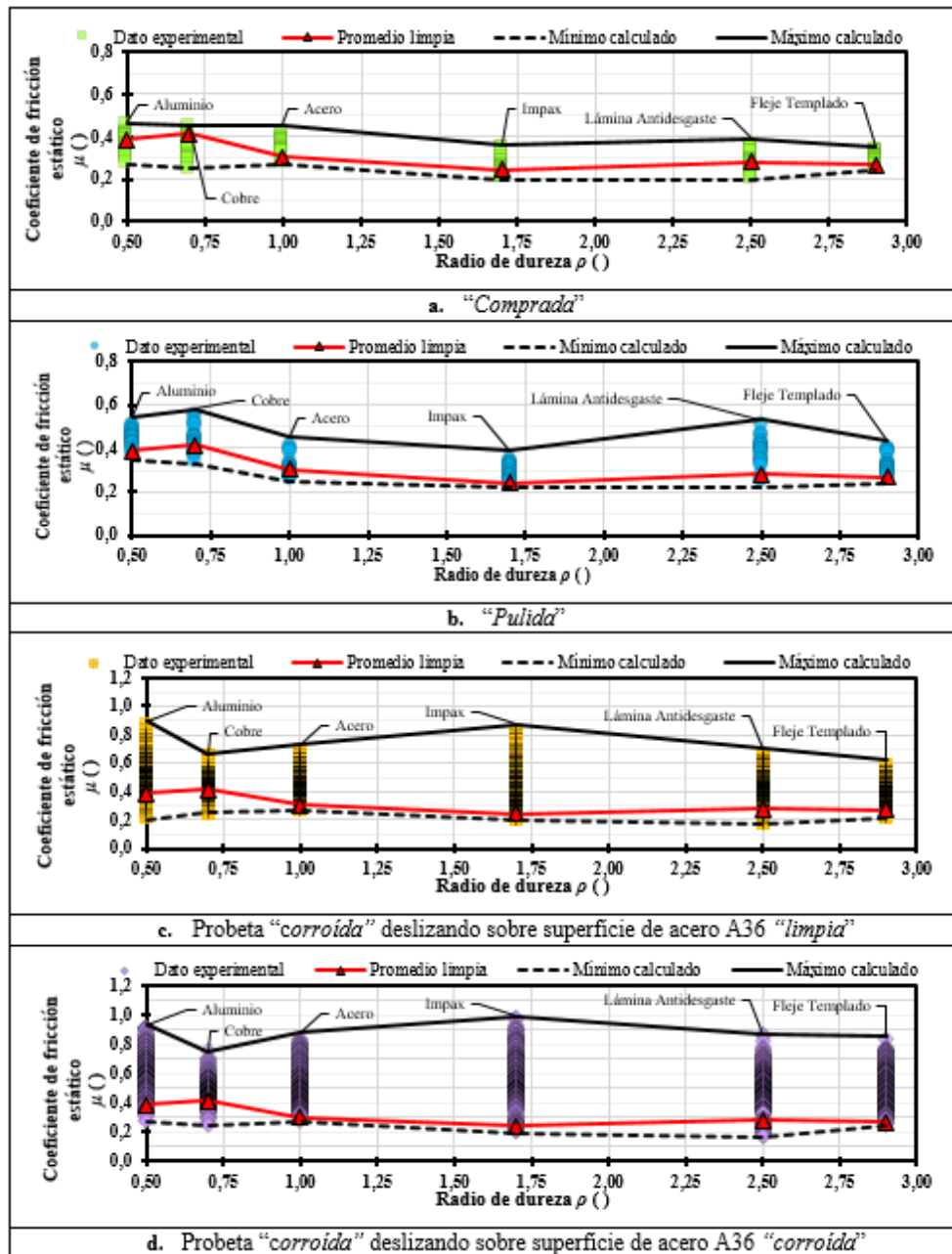


Figura 9. Comparación entre datos experimentales y modelo del coeficiente de fricción estático  $\mu$  para materiales  $\rho = 0.5 - 2.9$

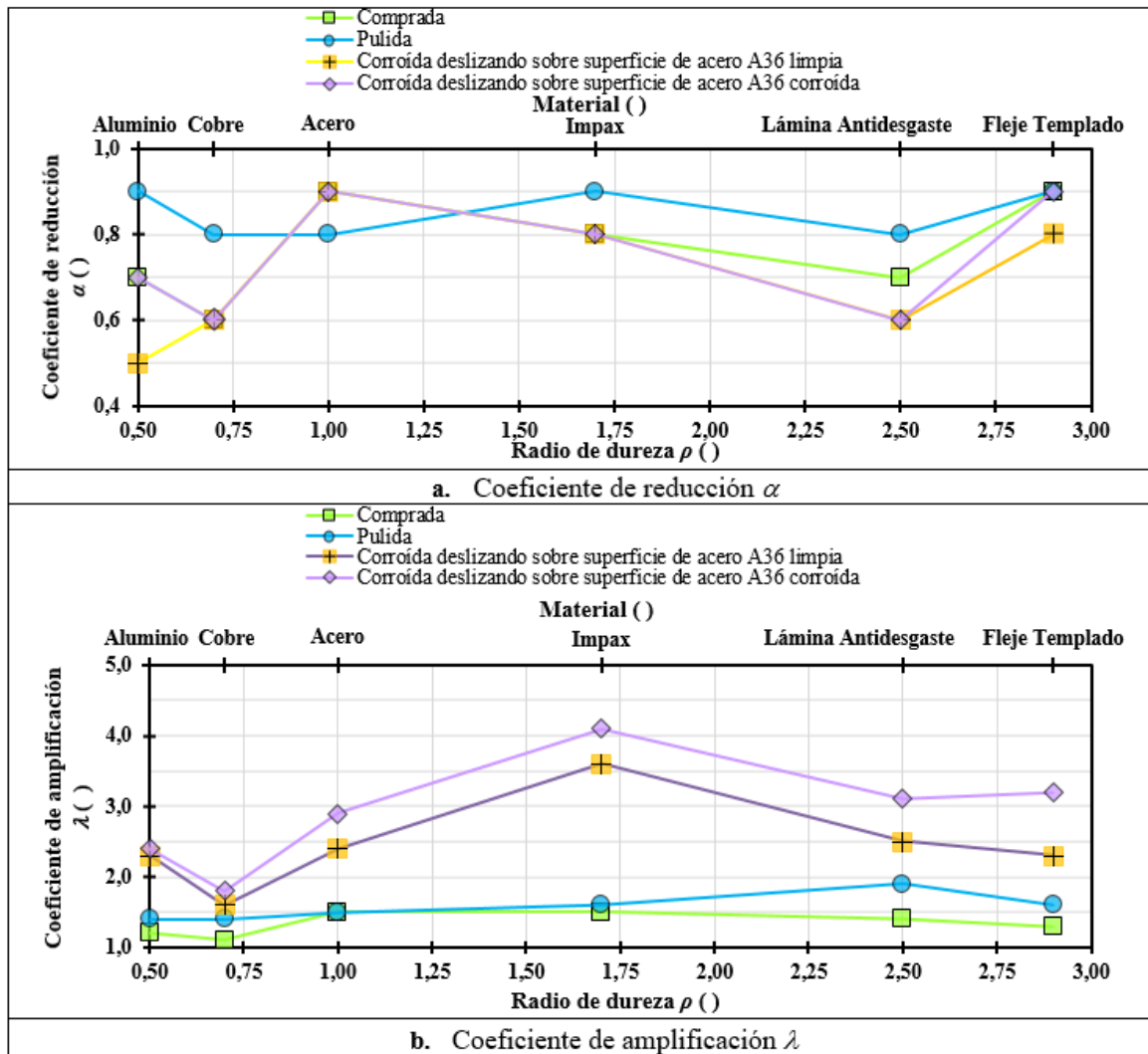


Figura 10. Coeficientes de reducción y amplificación  $\alpha$ ,  $\lambda$ , para materiales con  $\rho = 0.5 - 2.9$

## 5. Conclusiones

Se propuso un modelo para cuantificar la variación del coeficiente de fricción estático  $\mu$  de materiales metálicos con radios de dureza  $\rho = 0.5 - 2.9$  en diferentes condiciones de superficie en obra. Se demostró:

- Para superficies limpias,  $\mu$  es dependiente de  $\rho$  cuando  $\rho \leq 1.7$ . Para  $\rho > 1.7$ ,  $\mu$  es constante. El máximo valor de  $\mu$  para superficies limpias y para  $\rho = 0.5 - 2.9$ , se logra al deslizar Cobre ( $\rho = 0.7$ ) sobre Acero A36.
- El valor de  $\mu$  es dependiente de la condición de superficie en obra. Si las superficies se mantienen como compradas,  $\mu$  puede incrementarse o reducirse el 20% respecto a  $\mu$  para las superficies limpias. Si las superficies se pulen después de compradas,  $\mu$  podría ser igual o incrementarse hasta el 37% del  $\mu$  para las superficies limpias.
- Los materiales con  $\rho = 0.5 - 2.9$  desarrollaron corrosión uniforme caracterizada por producto corrosivo de color entre anaranjado y marrón, pérdida de masa e incremento de la rugosidad. La pérdida de masa se

incrementó linealmente con el tiempo y la rata de corrosión se incrementó inicialmente para después volverse constante.

iv. La corrosión incrementó  $\mu$  respecto al valor para superficies limpias. Los mayores incrementos ocurrieron para superficies corroídas. El incremento de  $\mu$  varió linealmente con el tiempo de exposición a la corrosión, para después reducirse y volverse constante.

v. Para diferentes condiciones de superficie en obra,  $\mu$  puede predecirse reduciendo o amplificando  $\mu$  para superficies limpias. Los factores de reducción y amplificación varían en los rangos 0.5 – 0.9 y 1.1 - 4.1, respectivamente. Los valores más altos y más bajos de estos factores corresponden a superficies corroídas.

## 6. Referencias

- ASTM International (2012).** ASTM G31. Standard guide for laboratory immersion corrosion testing of metals. United States of America.
- Bowden, F.P.; Tabor, D. (1950).** The friction and lubrication of solids, Oxford: Oxford University Press.
- Chanchí Golondrino, J.C.; MacRae, G.A., Chase, J.G., Rodgers, G.W., Nye Scott, A.C.; Clifton, G.C. (2019).** Steel Building Friction Connection Seismic Performance – Corrosion Effects. Structures, 19: 96-109, doi: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2018.11.008>
- Christopoulos, C.; Filiatrault, A. (2006).** Principles of Passive Supplemental Damping and Seismic Isolation. Inglaterra: IUSS Press.
- Day, A. (2014).** Braking of Road Vehicles, p. 472, Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Duque Sierra, J.L. (2021).** Comportamiento experimental y modelaje de un disipador sísmico de bajo daño y alta dureza aplicable a uniones viga - columna de marcos de resistencia a momento. (Tesis de Maestría no publicada). Manizales: Universidad Nacional de Colombia
- Hutchings, I.M. (2016).** Leonardo da Vinci's studies of friction. Wear, 360–361: 51-66, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.04.019>
- Hashiguchi, K. (2020).** Nonlinear Continuum Mechanics for Finite Elasticity-Plasticity. Amsterdam: Elsevier.
- Khoo, H.H.; Clifton, C.; Butterworth, J.; MacRae, G.; Ferguson, G. (2012).** Influence of steel shim hardness on the sliding hinge joint performance. Journal of Constructional Steel Research, 72: 119-29, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2011.11.009>
- Khoo, H.; Clifton, C.; MacRae, G. A.; Zhou, H.; Ramhormozian, S. (2014).** Proposed design models for the asymmetric friction connections. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 44(8): 1309-1324, doi: <https://doi.org/10.1002/eqe.2520>
- Moore, A. J. W.; Tegart, W. J.. (1952).** Relation between and Hardness. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, Volume 212, Issue 1111, pp. 452-458
- Popov, V. (2010).** Contact Mechanics and Friction - Physical Principles and Applications. Berlin: Springer.
- Rodgers, G.W.; Chase, J.G.; Gausse, R.; Chanchi Golondrino, J.C.; MacRae, G.A. (2017).** Performance and degradation of sliding steel friction connections: impact of velocity, corrosion, coating and shim material. Engineering Structures, 141: :292-302, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.02.070>.
- Sarraff, E.R.; Clifton, C.; Mandemo, W. (2011).** HERA report R4-133: New Zealand steelwork corrosion and coating guide. Manukau City – New Zealand: New Zealand Heavy Engineering Research Association.