

# SINERGIA ENTRE ALTA RUGOSIDAD SUPERFICIAL Y AMBIENTE CORROSIVO EN EL COMPORTAMIENTO A LA FATIGA DEL ACERO SAE 1045

## THE SYNERGISM BETWEEN HIGH SUPERFICIAL ROUGHNESS AND CORROSIVE ATMOSPHERE IN THE FATIGUE BEHAVIOR OF THE SAE 1045 STEEL

WILSON FERNANDO CEBALLOS

*Ingeniero Mecánico de la Universidad del Valle. wifcebe@yahoo.com*

ADOLFO LEÓN GÓMEZ

*Profesor de la Universidad del Valle, Escuela de Ingeniería Mecánica. adogomez@univalle.edu.co*

JOHN JAIRO CORONADO

*Profesor de la Universidad del Valle, Escuela de Ingeniería Mecánica. Estudiante de Doctorado en Ingeniería Mecánica de la Universidad de São Paulo (Brasil)*

Recibido para revisar Marzo 12 de 2007, aceptado Agosto 29 de 2007, versión final Septiembre 11 de 2007

**RESUMEN:** En este artículo se presenta el estudio del comportamiento a fatiga del acero SAE 1045 en cuatro condiciones diferentes: superficie pulida (acabado espejo), ambiente corrosivo (jugo de caña de azúcar), alta rugosidad superficial (superficie equivalente a la encontrada típicamente en los ejes de molino de caña) y una condición que involucra la combinación de las dos últimas. Las anteriores condiciones están presentes en los ejes de maza de molino de caña de azúcar durante el proceso de molienda. Se realizaron pruebas de fatiga en flexión rotatoria y se obtuvieron los valores de resistencia a la fatiga para las diferentes situaciones de ensayo. La disminución en resistencia a la fatiga para la sinergia entre la alta rugosidad y ambiente corrosivo fue del 8,7%, resultado estadísticamente representativo con menos de 0,01% de incertidumbre.

**PALABRAS CLAVE:** Acero SAE 1045, Eje de Molino, Jugo de Caña, Rugosidad Superficial, Resistencia a la Fatiga.

**ABSTRACT:** The fatigue behavior of the SAE 1045 steel in four different conditions is reported in this paper. Four treatments were tested: polished surface, corrosive atmosphere (sugar cane juice), low quality roughness (typical equivalent surface of the shaft cane mill) and the combined condition of the two last treatments involved. Fatigue tests were performed in rotating bending conditions and the values of fatigue strength for the different situations from tests were obtained. The diminution in fatigue strength for the synergy condition of rough surface and corrosive atmosphere was of 8.7%, result statistically representative with less than 0.01% of uncertainty.

**KEYWORDS:** SAE 1045 Steel, Shaft Mill, Sugar Cane Juice, Superficial Roughness, Fatigue Strength.

### 1. INTRODUCCIÓN

El proceso de molienda consiste en la extracción del jugo de caña de azúcar a través de molinos, mediante la compresión de la fibra

entre cilindros de gran tamaño llamados mazas.

La caña que ingresa al proceso de molienda pasa por una serie de molinos y el jugo es

recolectado y drenado por la parte inferior de cada molino. Los ejes quedan parcialmente expuestos al contacto con el jugo de caña en los diseños convencionales de molinos.

Los ejes de maza son piezas pesadas de grandes dimensiones, generalmente cerca de 5 metros de longitud y alrededor de 9 toneladas de peso. Su misión es transmitir el movimiento de rotación que reciben de la transmisión hacia las mazas, soportando además las cargas de flexión que se generan durante la compresión de la caña. Las condiciones de servicio generan eventualmente fallas por fatiga. El diseño ha sufrido pocas variaciones en los últimos 100 años, su mejoramiento se ha visto frenado fundamentalmente por no contarse con un esquema de análisis preciso con el cual se logre un diseño óptimo desde el punto de vista de economía del material, operación y vida útil. Una causa concurrente en las fallas ha sido el desgaste y el rayado producido por el ingreso de jugo con partículas abrasivas especialmente durante la flotación del eje, es decir, cuando el sistema hidráulico permite el desplazamiento de la maza superior.

En trabajos anteriores se ha reportado la falla prematura de ejes de maza de molinos azucareros debido a la propagación de grietas por fatiga en el acero SAE 1045[1]. Se han realizado estudios que indican que la presencia del jugo de caña disminuye la resistencia a la fatiga de estos ejes [2] y otras investigaciones indican que la falla de los ejes se presenta especialmente por el rayado superficial generada por el desgaste abrasivo causado por el ingreso de materia extraña mineral y vegetal que acompaña a la caña de azúcar [3]. Otros estudios encontraron disminución en la resistencia a la fatiga en muestras de acero aleado con el incremento de la rugosidad superficial, debido a que las microgrietas se forman en las irregularidades superficiales que actúan como concentradores de esfuerzos [4,5]. Toro et al. [9] realizaron ensayos de corrosión-erosión en aceros inoxidable AISI 420 e 410 templados y revenidos, además fueron ensayados los mismos aceros nitrurados, encontraron que la sinergia entre corrosión y erosión fue más importante en las muestras sin nitruración, debido a la menor

dureza y presencia de corrosión intergranular, por picadura y generalizada.

La disminución del límite de resistencia a la fatiga de los ejes provoca su falla antes de lo previsto, con las consecuentes pérdidas de producción. Por tal motivo en este trabajo de investigación se estudia la sinergia entre corrosión, debido al jugo de caña de azúcar, y la alta rugosidad superficial simulando las condiciones en que se encuentran los ejes de molinos de caña. Se realizaron pruebas de flexión rotatoria usando probetas de acero SAE 1045. El fluido empleado para generar la corrosión en las probetas fue jugo de caña extraído del proceso de molienda y la condición superficial generada en las probetas se realizó a partir del análisis de semejanza usando un eje de maza que falló por fatiga.

## 2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

El propósito de los experimentos fue estudiar el comportamiento a la fatiga del acero SAE 1045 (0,47% C, 0,78% Mn, 0,013% P, 0,034% S 0,3% Si), con microestructura ferrítico-perlítica, este acero es empleado típicamente en la fabricación de ejes. Las cuatro condiciones de ensayo fueron: ambiente estándar (probetas rodeadas de aire y con acabado superficial espejo), ambiente corrosivo (probetas rodeadas de jugo de caña y con acabado espejo), alta rugosidad superficial (probetas rodeadas de aire y con alta rugosidad superficial) y simulando las condiciones reales de trabajo en el proceso de molienda de caña (probetas rodeadas de jugo de caña y con alta rugosidad superficial).

El jugo se preservó fresco con pH 5,5 (enfriado a 10°C) con el objetivo de simular las condiciones de trabajo de los ejes de maza de los molinos. Si este jugo se deja a una temperatura ambiente sufre cambios químicos (el pH disminuye), originando un efecto más agresivo del fluido.

Debido a la alta velocidad de giro de la probeta en la prueba no se logra una permanencia prolongada del fluido corrosivo en contacto con la superficie, por tanto, se adoptó un

procedimiento usado satisfactoriamente en trabajos anteriores [2], donde las probetas se sumergieron durante once horas en total en el jugo, luego se ensayaron hasta la rotura. Con esta modificación de las pruebas, se logra que las muestras estén expuestas al jugo dando lugar al contacto durante el tiempo suficiente. Además, inmersiones fueron intercalados con ciclos de prueba buscando que se generaran depósitos de jugo en las microgrietas formadas, lo cual acerca a la realidad los efectos del agente corrosivo sobre los ejes.

El número de ciclos  $N$  antes de la segunda y tercera inmersión fueron diferentes para cada

nivel de esfuerzo; se utilizó como referencia el número de ciclos hasta la fractura de la probeta más débil (probeta fracturada más rápidamente) de cada nivel de esfuerzos en los ensayos en aire. Esto con el fin de evitar la ruptura de probetas sin haber completado el número de inmersiones. Para cada nivel de esfuerzos se emplearon porcentajes del 30% de  $N$  para realizar la segunda inmersión y del 50% para realizar la tercera y última inmersión. Se realizaron pruebas a tres niveles de esfuerzos: 0,6; 0,7 y 0,8 de la resistencia última ( $s_u$ ) del acero SAE 1045. El número de ciclos y la duración de cada inmersión en jugo se muestran en la tabla 1.

**Tabla 1.** Duración de las inmersiones en jugo de caña.

**Table 1.** Duration of the immersions in cane juice.

Nivel de esfuerzos	Duración primera inmersión	# Ciclos hasta 2da inmersión	Duración segunda inmersión	# Ciclos hasta 3ra inmersión	Duración tercera inmersión
0.6 $S_u$	8 horas	0.3 $N$ (aire)	2 horas	0.5 $N$ (aire)	1 hora
0.7 $S_u$	8 horas	0.3 $N$ (aire)	2 horas	0.5 $N$ (aire)	1 hora
0.8 $S_u$	8 horas	0.3 $N$ (aire)	2 horas	0.5 $N$ (aire)	1 hora

El proceso de molienda de caña de azúcar sin sistema de sellado, produce en los ejes de maza una alta rugosidad superficial. El rayado es generado por el desgaste abrasivo que produce la materia extraña que acompaña a la caña de azúcar. Se midió la topografía de la superficie de un eje usado en el proceso de molienda. Con base un análisis de semejanza se generó la rugosidad superficial en las probetas, equivalente a la rugosidad superficial de los ejes de maza.

## 2.1 Estudio De La Superficie De Un Eje De Molino

Para medir la rugosidad superficial de un eje de maza que se fracturó debido al fenómeno de fatiga, se empleó un proyector de perfiles NIKON modelo 6C; este equipo refleja en una pantalla la sombra que se genera debido a la

exposición del perfil de la muestra a la luz. Una vez se refleja la sombra del perfil en la pantalla se miden las alturas y las profundidades de las crestas y valles. Se utilizó este equipo debido a que el rugosímetro no es apto para medir este tipo de rayados tan profundos.

A partir de las medidas realizadas en un tramo de la superficie del eje, se evaluó la rugosidad superficial a través del parámetro  $Ra$ , el cual se calcula como la media aritmética de las desviaciones respecto a la línea media del perfil. Estas desviaciones,  $z_1, \dots, z_n$ , son las distancias de los distintos puntos medidos del perfil efectivo respecto a la línea media. De esta forma, seleccionada una longitud básica, se determina la rugosidad ( $Ra$ ) como la media aritmética de las desviaciones expresadas en valor absoluto (ecuación 1). La rugosidad superficial  $Ra$  fue igual a 0,1464 mm.

$$Ra = \frac{\sum_{i=1}^n |Z_i|}{n} \quad (1)$$

## 2.2 Rugosidad Superficial En Las Probetas

Para realizar el análisis de semejanza se partió de la teoría de que el factor de concentración de esfuerzos geométrico ( $K_t$ ) en el eje de molino debe tener el mismo valor en las probetas. Los valores de  $K_t$  dependen de la forma de la discontinuidad (entallas). Se calculó el  $K_t$  del eje de maza por medio de la ecuación 2 con un valor de 3,4149.

$$Kt \cong A \cdot \left( \frac{Ra}{d} \right)^B \quad (2)$$

Donde:

$A = 0,9939$ : parámetro geométrico.

$B = -0,1524$ : parámetro geométrico [7].

$Ra = 0,1464$  mm: rugosidad superficial.

$d = D - 2r = 482,3071$  mm

$D = 482,6$  mm: diámetro del eje.

Posteriormente se calculó el valor de la rugosidad para las probetas que tienen un diámetro de la sección reducida de 6,35 mm. Reemplazando los datos de la geometría de la probeta en la ecuación 2, se calculó  $Ra = 1,926 \mu\text{m}$ .

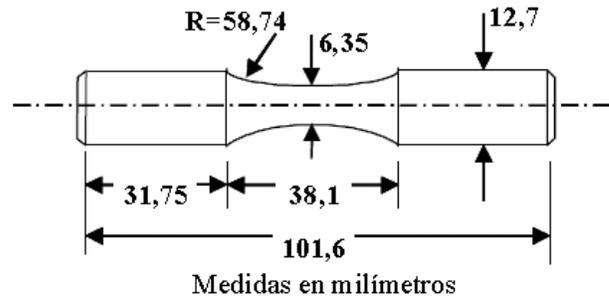
## 2.3 Obtención De La Rugosidad Superficial En Las Probetas

Las probetas se maquinaron en un centro de torneado HAAS AUTOMATION INC modelo SL20. Se fijaron los parámetros de avance, profundidad de pasada y velocidad de corte durante el proceso de maquinado, para obtener la condición superficial mencionada en todas las probetas. En la realización de este maquinado se usó una profundidad de pasada de 1 mm al diámetro, velocidad de corte de 103.73 m/min y avance 0.12 mm/rev. La rugosidad de las probetas se midió con un rugosímetro MITUTOYO SJ-20 usando el parámetro  $Ra$  y se obtuvo valor medio de 1,90  $\mu\text{m}$ .

## 2.4 Ensayos

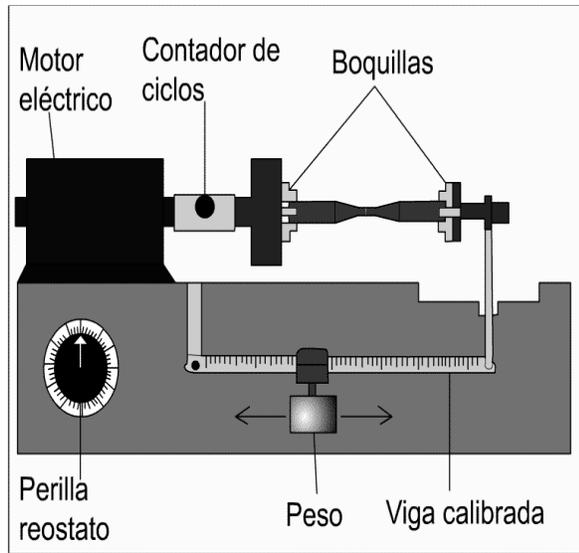
Las probetas para los ensayos fueron maquinadas a partir de un perfil redondo calibrado de 12,70 mm de diámetro. Se realizó el ensayo de tracción para encontrar la resistencia última de tensión del acero, el valor promedio de  $S_u$  fue de 138,97 Ksi (958.16MPa).

Las pruebas de fatiga se realizaron en una maquina de flexión rotatoria bajo la norma ASTM E-606 [8]. Las probetas empleadas son cilíndricas con una reducción de diámetro en la zona central (ver figura 1).



**Figura 1.** Probeta para ensayos de fatiga para flexión rotatoria usada en las pruebas [8].  
**Figure 1.** Sample for fatigue tests used for rotatory bending tests.

En la figura 2 se muestra un esquema del equipo utilizado para las pruebas. La probeta se monta en *cantilever*, las cargas son aplicadas a través de un brazo de carga y un rodamiento de bolas, y corresponden a un peso suspendido sobre una barra calibrada que está pivotada en el otro extremo de la máquina. La probeta está girando continuamente de manera que cada punto de su sección (con excepción del eje neutro) esta sometido alternativamente a ciclos de flexión y compresión y cada ciclo de estos corresponde a una vuelta del motor eléctrico.



**Figura 2.** Esquema del equipo utilizado en los ensayos.

**Figure 2.** Representation of the equipment used in the tests.

### 2.5 Diseño De Experimentos

Tres niveles de esfuerzos fueron seleccionados para las pruebas de fatiga: 0,8Su, 0,7Su y 0,6Su. Los resultados corresponden a tres puntos en la gráfica, la cual es ajustada usando el método de mínimos cuadrados. La dispersión de los datos se incrementa con la disminución del nivel de esfuerzo, en consecuencia, se emplean más especímenes para los niveles de bajo de esfuerzo.

El tamaño de la muestra que se requiere, correspondiente a un porcentaje de error aceptable del 5% y un nivel de confianza del 90%, se muestra en la tabla 2. El coeficiente de variación (*CV*) esperado es 4% para el nivel de esfuerzo de 0.8Su, 5% para el nivel de esfuerzo de 0.7Su y 7% para el nivel de esfuerzo de 0.6Su [9].

**Tabla 2.** Determinación del tamaño de la muestra  
**Table 2.** Determination of the sample size

Nivel de esfuerzo	Porcentaje del coeficiente de variación	Porcentaje de error / porcentaje del coeficiente de variación	Tamaño de la muestra requerido
0,8 Su	4	1,25	4
0,7 Su	5	1	5
0,6 Su	7	0,71	8
			Total = 17 especímenes

La confiabilidad de los datos obtenidos desde el punto de vista estadístico, se confirmó comparando los *CV* experimentales con los deseados. Esta comparación se muestra en las tablas 3, 4, 5 y 6 para todas las condiciones de

ensayo. Como se puede observar, el tamaño de la muestra resultó ser el correcto en todos los niveles de esfuerzos, para evaluar la sinergia rugosidad superficial con la presencia de jugo de caña de azúcar.

**Tabla 3.** Análisis estadístico de las pruebas con acabado espejo ensayadas en el aire.  
**Table 3.** Statistical analysis of the tests with finished mirror tested in the air.

Nivel de esfuerzo	CV límite (%)	Promedio Log N	Desviación Estándar	CV Experimental (%)
0.8 Su	4	3,3143	0,0933	2,8154
0.7 Su	5	4,0444	0,1562	3,8624
0.6 Su	7	4,6212	0,1127	2,4389

**Tabla 4.** Análisis estadístico de las pruebas con acabado rugoso ensayadas en el aire.**Tabla 4.** Statistical analysis of the tests with low quality roughness tested in the air.

Nivel de esfuerzo	CV límite (%)	Promedio Log N	Desviación Estándar	CV Experimental (%)
0.8 Su	4	3,2464	0,0997	3,0714
0.7 Su	5	3,7387	0,0595	1,5927
0.6 Su	7	4,5367	0,0886	1,9539

**Tabla 5.** Análisis estadístico de las pruebas con acabado espejo ensayadas con el jugo de caña.**Tabla 5.** Statistical analysis of the tests with finished mirror tested in the cane juice.

Nivel de esfuerzo	CV límite (%)	Promedio Log N	Desviación Estándar	CV Experimental (%)
0.8 Su	4	3,5367	0,0905	2,5588
0.7 Su	5	4,0411	0,0759	1,8795
0.6 Su	7	4,6454	0,1296	2,7890

**Tabla 6.** Análisis estadístico de las pruebas con acabado rugoso ensayadas con el jugo.**Tabla 6.** Statistical analysis of the tests with low quality roughness tested in the cane juice.

Nivel de esfuerzo	CV límite (%)	Promedio Log N	Desviación Estándar	CV Experimental (%)
0.8 Su	4	3,3797	0,0769	2,2748
0.7 Su	5	3,8802	0,1036	2,6696
0.6 Su	7	4,4942	0,0800	1,7806

### 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con los datos obtenidos experimentalmente se trazaron gráficas esfuerzo alternante ( $S$ ) contra número de ciclos ( $N$ ) para cada ensayo. En el rango de vida finita, es decir, entre  $10^3$  y  $10^6$  ciclos, la línea corresponde a una ecuación lineal:  $Y = -mx + b$ . Donde  $Y$  corresponde a  $\text{Log}(S_f)$  siendo  $S_f$  el esfuerzo aplicado a una vida determinada,  $x$  corresponde al  $\text{Log}(N)$ ;  $m$  y  $b$  son parámetros dependientes del material ensayado, de esta manera, se puede describir la

ecuación de la siguiente manera (ver ecuación 3):

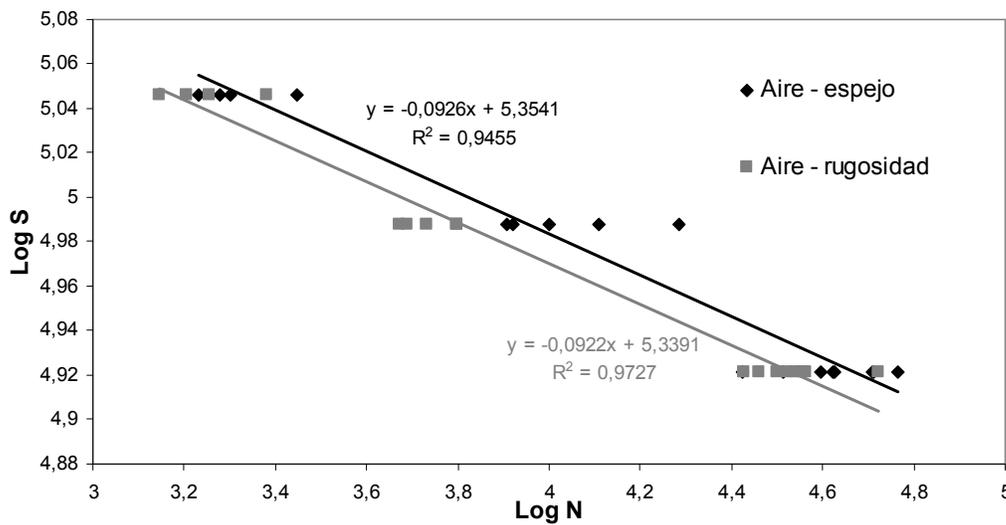
$$\text{Log}S_f = -m\text{Log}N + b \quad (3)$$

De la ecuación anterior, igualando el número de ciclos a  $10^6$  (límite de la vida finita) se puede obtener el límite de la resistencia a la fatiga. La tabla 7 presenta los valores de resistencia a la fatiga ( $10^6$  ciclos) para todas las condiciones ensayadas y en las figuras 3, 4 y 5 se muestran las curvas S-N sobrepuestas.

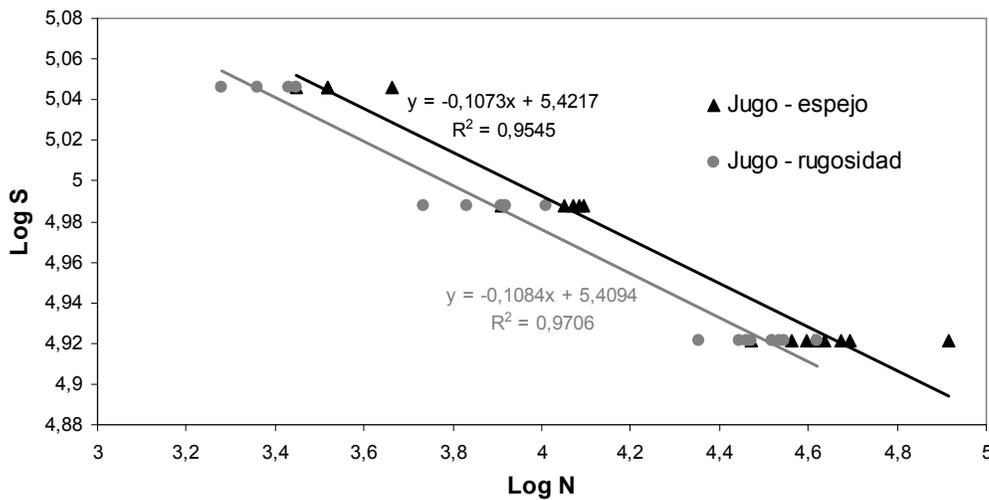
**Tabla 7.** Valores de la resistencia a la fatiga en los diferentes ensayos.

**Table 7.** Values of the fatigue limit for the different tests.

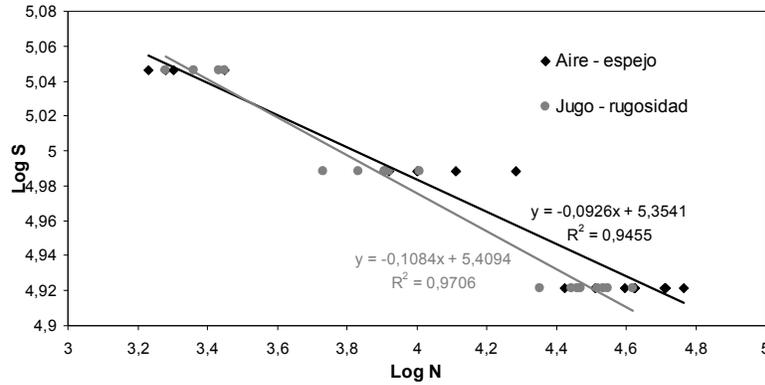
Ensayo	Resistencia a la fatiga Psi (MPa)
ambiente aire – acabado espejo	62878,19 (433,53)
ambiente aire – acabado rugoso	61080,14 (421,13)
ambiente jugo – acabado espejo	59965,30 (413,45)
ambiente jugo – acabado rugoso	57411,65 (395,84)



**Figura 3.** Curvas S–N para el acero SAE 1045 rodeado de aire: acabado espejo y alta rugosidad.  
**Figure 3.** S-N curves for the SAE 1045 steel surrounded by ar: mirror finished and low roughness quality.



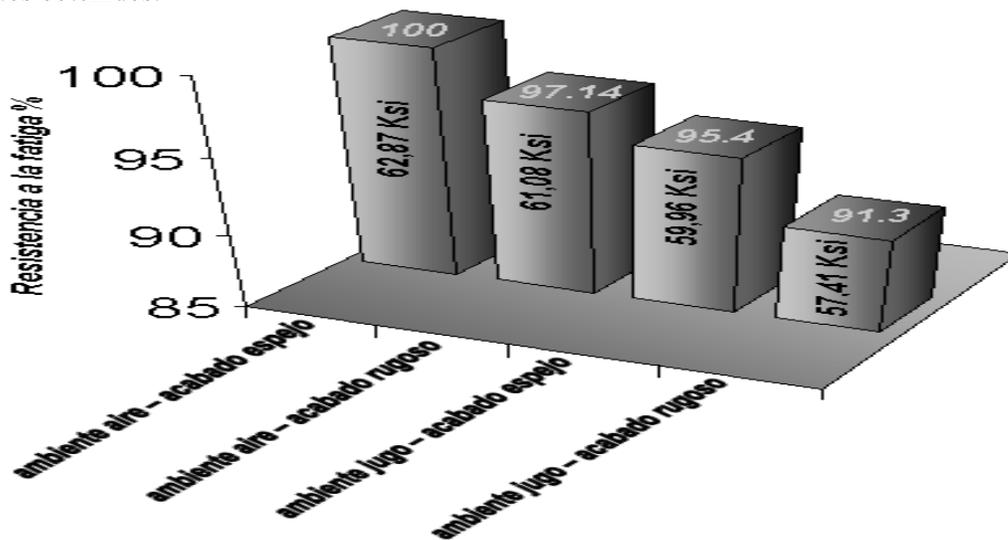
**Figura 4.** Curvas S–N para el acero SAE 1045 rodeado de jugo: acabado espejo y alta rugosidad.  
**Figure 4.** S-N curves for the SAE 1045 steel surrounded by juice: mirror finished and low roughness quality.



**Figura 5.** Curvas S–N para el acero SAE 1045 rodeado de aire-acabado espejo y rodeado de jugo-alta rugosidad.  
**Figure 5.** S–N curves for the SAE 1045 steel surrounded by ar with mirror finished and surrounded by juice with low roughness quality.

Para el acero SAE 1045, tomando como referencia el valor más alto de resistencia a la fatiga correspondiente a la prueba estándar, se observa una disminución en la resistencia a la fatiga debido a la condición superficial de 2,86%, debido a la presencia de jugo de caña de 4,6% y debido a la combinación de las dos condiciones de 8,7%, es decir, la sinergia entre el jugo de caña y la alta rugosidad superficial disminuyeron en mayor medida la resistencia a la fatiga. Por lo tanto la situación que causa mayor efecto en la resistencia a la fatiga es la sinergia entre jugo de caña y rugosidad superficial, seguido de la presencia de jugo de caña y por último la condición de rugosidad superficial. En la figura 6 se comparan los resultados obtenidos.

En la tabla 8 se presentan los resultados del análisis de varianza (ANOVA) [10] para los datos (numero de ciclos) obtenidos en los diferentes ensayos, este análisis estadístico, muestra que: como es característico del fenómeno de fatiga la dispersión es muy alta, pero la sinergia rugosidad superficial con presencia de jugo de caña es estadísticamente diferenciable del error puro, con menos de 0,01% de incertidumbre para los tres niveles de esfuerzo. Las otras fuentes de variación (acabado superficial y ambiente) no pueden ser estadísticamente diferenciadas del error, usando el criterio del 5% comúnmente usado para procesos con distribución normal.



**Figura 6.** Comparación de la resistencia a la fatiga.  
**Figure 6.** Comparison of the fatigue limit.

**Tabla 8.** Análisis de varianza, arreglo factorial *two-way* y número de ciclos de falla.**Table 8.** Analysis of variance, two-way factorial arrangement and number of cycles to failure.

Nivel de esfuerzo	Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Varianza	Razón de las varianzas	Probabilidad
0.8 Su	Acabado superficial	0,0126	1	0,0126	1,5444	23,7%
	Ambiente	0,0316	1	0,0316	3,8633	7,2%
	Sinergia	0,0020	1	0,0020	122,1364	<0,01%
	Error puro	0,0982	12	0,0082		
0.7 Su	Acabado superficial	0,0544	1	0,0544	4,8977	4,2%
	Ambiente	0,0048	1	0,0048	0,4310	52,1%
	Sinergia	0,0052	1	0,0052	89,9978	<0,01%
	Error puro	0,1778	16	0,0111		
0.6 Su	Acabado superficial	0,0140	1	0,0140	1,2699	26,9%
	Ambiente	8,4E-5	1	8,4E-5	0,0077	93%
	Sinergia	0,0011	1	0,0011	91,4283	<0,01%
	Error puro	0,3062	28	0,3062		

Las partículas abrasivas provenientes de la materia extraña producen surcos o ranuras en la superficie de los ejes de molino de caña, incrementando la concentración de esfuerzos y propiciando lugares para la nucleación de grietas. Por otro lado considerando sólo el efecto del jugo de caña con una superficie bien acabada, el jugo de caña puede depositarse en grietas existentes y acelerar su propagación. La sinergia entre corrosión y mala calidad superficial produce una gran intensificación de esfuerzos en las ranuras formadas por el desgaste causado por la materia extraña, debido a que se generan muchos lugares para la formación de grietas con depósitos de productos de oxidación y corrosión que tienen un efecto de caña, todo lo anterior propicia la formación y el crecimiento de la grieta de fatiga.

Gómez *et al* [2] encontraron un límite de resistencia a fatiga de 52,795 Ksi (364.01 MPa) para el acero SAE 1045 en ambiente jugo-acabado espejo (pH de 4), en el presente estudio se encontró una resistencia a la fatiga de 59,965 Ksi (413,45MPa) con un pH del jugo de 5,5. Dicha diferencia tiene su origen en el pH del jugo de caña usado en cada estudio, en esta investigación se utilizó jugo de

caña que fue mantenido a 10°C para poder aproximarse a las condiciones reales de

operación, el jugo utilizado usado por Gómez *et al* fue mantenido a temperatura ambiente (degradado) así que el ataque en las probetas fue más agresivo. La explicación a la diferencia del 12% en el límite de resistencia a fatiga en los dos trabajos se debe a que en la primera condición el acero SAE 1045 se encuentra probablemente en la región de corrosión del diagrama de *Pourbaix*, mientras que en la segunda condición el pH mayor podría llevar al acero a entrar en la región de pasivación.

Se pretende que los resultados de este estudio sean aplicados para el diseño de ejes de maza de molinos azucareros. Para ello se presentan los resultados obtenidos como un factor de reducción de resistencia en fatiga o factor debido a efectos varios  $K_f$ , este factor, es el cociente de la resistencia a la fatiga encontrada en los ensayos con jugo y superficie rugosa con la encontrada en los ensayos en aire con acabado espejo. De esta manera se pueden obtener varios factores, dependiendo de la condición de ensayo:

$$K_f = \frac{S_{e(\text{aire-rugoso})}}{S_{e(\text{aire-espejo})}} = 0,9714$$

$$K_f = \frac{S_{e(\text{jugo-espejo})}}{S_{e(\text{aire-espejo})}} = 0,9537$$

$$K_f = \frac{S_{e(\text{jugo-rugoso})}}{S_{e(\text{aire-espejo})}} = 0,9131$$

Estos valores, podrán utilizarse en el dimensionamiento de elementos de máquinas al introducirlos como factor de reducción de la resistencia a la fatiga, dependiendo de las condiciones de trabajo, ya sea en condiciones rugosidad superficial alta, ambiente corrosivo de jugo de caña o la combinación de éstas.

#### 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

-Los resultados comprobaron que existe una relación entre la disminución de la resistencia a la fatiga del acero SAE 1045, la presencia de jugo de caña de azúcar y la alta rugosidad superficial.

-La disminución en resistencia a la fatiga para la sinergia entre superficie rugosa y ambiente corrosivo fue del 8,7% resultado estadísticamente representativo con menos de 0,01% de incertidumbre.

-Se recomienda que en un futuro se diseñen sistemas de sellado en el proceso de molienda más eficientes que los que existen actualmente ya que es el jugo de caña el mayor responsable en la disminución de la resistencia a la fatiga en los ejes de maza de los molinos de caña; y el ingreso de materia extraña es el responsable del aumento en la rugosidad superficial que también representa un riesgo en la vida a fatiga de los ejes.

#### 5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el aporte financiero de COLCIENCIAS y del Ingenio Manuelita y la colaboración de Cenicaña.

#### REFERENCIAS

[1] RODRÍGUEZ, S.A., CORONADO, J.J. ARZOLA, N. Predicción de vida remanente en ejes de maza superior de molino de caña. Ingeniería e Investigación, 26, 78-85, 2006.

[2] GÓMEZ, J.A., GÓMEZ, A.L. CORONADO, J.J. Análisis del Comportamiento a Fatiga de un Acero AISI 1045 en un Ambiente de Jugo de Caña de Azúcar. Scientia et Técnica, 27, 81-86. 2005.

[3] CORONADO, J.J. Análisis del Desgaste para el Par Bronce-Acero en un Molino de Caña de Azúcar, Ingeniería y Competitividad, 6, 75-82, 2004.

[4] AROLA, D. WILLIAMS, C.L. Estimating the fatigue stress concentration factor of machined surfaces, International Journal of Fatigue, 24, 923-930, 2002.

[5] ITOGA, H. TOHAGI, K. NAKAJIMA, M. KO, H. Effect of surface roughness on step-wise S-N characteristics in high strength steel. International Journal of fatigue, 25, 379-385, 2003.

[6] TORO, A. SINATORA, A. TANAKA, D.K. TSCHIPTSCHIN A.P. Corrosion-erosion of nitrogen bearing martensitic stainless steels in seawater-quartz slurry. Wear, 251, 1257-1264, 2001.

[7] PETERSON, R. E. Stress Concentration Factors. John Wiley & Sons, 1975.

[8] Standard Recommended Practice for Constant - Amplitude Low - Cycle Fatigue Testing, Annual book of ASTM standards, E 606 - 80, 1980.

[9] LIPSON, C., NARENDRA S. Statistical Design and Analysis of Engineering Experiments. New York, McGraw-Hill, 1973.

[10] BOX, G., HUNTER, W., HUNTER, J. Statistics for experimenters. New York, John Wiley & Sons, 1976.