

COMPORTAMIENTO A FATIGA DEL ACERO SAE 4140 USANDO ALTA RUGOSIDAD SUPERFICIAL Y AMBIENTE CORROSIVO

FATIGUE BEHAVIOR OF SAE 4140 STEEL WITH HIGH SURFACE ROUGHNESS IN A CORROSIVE ENVIRONMENT

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. johncoro@univalle.edu.co

Recibido para revisar Enero 22 de 2009, aceptado Marzo 18 de 2009, versión final Abril 30 de 2009

RESUMEN: En este artículo se presenta el estudio del comportamiento a fatiga del acero SAE 4140 en 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 de la resistencia a la fatiga a causa de la condición superficial fue del 1,53%, debido al ambiente corrosivo fue del 14,9% y debido a la alta rugosidad y ambiente corrosivo fue del 16,1%. Los resultados obtenidos se compararon con los encontrados para el acero SAE 1045, encontrándose que el jugo de caña y la alta rugosidad afectan en mayor grado al acero SAE 4140 en aproximadamente dos veces más que al acero SAE 1045.

PALABRAS CLAVE: Acero SAE 4140, Eje de Molino, Jugo de Caña, Rugosidad Superficial, Resistencia a la Fatiga.

ABSTRACT: The fatigue behavior of SAE 4140 steel in different treatments 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. Fatigue tests were performed in rotating bending conditions and the values of fatigue strength for the different treatments were obtained. The decrease in fatigue strength due to the rough surface treatment was 1.53%, due to the corrosive environment was 14.9% and due to the high roughness and corrosive environment was 16.1%. The results were compared with those for SAE 1045 steel. SAE 4140 steel is more affected than SAE 1045 steel in the combined presence of high surface roughness and cane juice environment.

KEYWORDS: SAE 4140 Steel, Shaft Mill, Sugar Cane Juice, Superficial Roughness, Fatigue Strength.

1. INTRODUCCIÓN

En Colombia, al igual que en muchos países con industria azucarera, está generalizado el uso de trenes de molinos para separar el jugo de la fibra contenido en la caña. La alta tasa de desgaste de los ejes, especialmente los de la maza superior del molino, es un importante problema y ha mostrado una marcada influencia en la confiabilidad de los ejes. El elevado desgaste reduce la vida en servicio del eje y obliga a la aplicación de procesos de recuperación por soldadura del eje. Las chumaceras y los ejes de molino presentan fallas concurrentes: desgaste y rayado producido por el ingreso de jugo de caña con partículas abrasivas, especialmente durante la flotación del eje, es decir, cuando el sistema oleoneumático permite el desplazamiento de la maza superior [1]. Los ejes de maza son elementos mecánicos fabricadas habitualmente de acero SAE 1045 o de acero SAE 4140. El acero SAE 4140 presenta mejores propiedades mecánicas, pero el acero SAE 1045 es más usado por ser más económico. Los ejes transmiten 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.

En trabajos anteriores se ha reportado la falla prematura de ejes de maza de molinos azucareros debido a la propagación de grietas por fatiga [1]. Se han realizado estudios que indican que la presencia del jugo de caña disminuye la resistencia a la fatiga de los ejes [2] y otras investigaciones indican que la falla de los ejes se presenta especialmente por el rayado superficial generada por el desgaste abrasivo [3]. Otros estudios encontraron disminución en la resistencia a la fatiga en muestras de acero aleado con el incremento de la rugosidad superficial [4,5]. Este y Sáenz [6] estudiaron el comportamiento a fatiga de aceros de bajo carbono, encontraron que con el aumento en el porcentaje de carbono se incrementa la resistencia a la fatiga. Moreno et al [7] evaluaron el efecto de los

tratamientos térmicos de recocido y normalizado realizado sobre los aceros AISI 4140 y AISI 4340, a través de ensayos de fatiga. El tratamiento de normalizado aumentó la resistencia a la fatiga en los dos aceros AISI 4140 y AISI 4340. En un trabajo más reciente se investigó el efecto del acabado superficial y un ambiente corrosivo (jugo de caña con pH 5,5) en el acero SAE 1045, con el objetivo de simular las condiciones de trabajo de los ejes de maza de los molinos [8].

En dicho trabajo se presentó 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 4,60% y debido a la combinación de las dos condiciones de 8,70%. Debido a que el acero SAE 4140 también es usado en los ejes de molienda, 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 con probetas de acero SAE 4140 usando barras en la condición original (sin tratamiento térmico posterior) y los resultados fueron comparados con el acero SAE 1045 [8].

2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

El propósito de los experimentos fue estudiar el comportamiento a la fatiga del acero SAE 4140 (0,38-0,43% C; 0,75-1% Mn; <0,035% P, <0,04% S; 0,15-0,35% Si; <0,25% Ni; 0,8-1,1% Cr; 0,15-0,25% Mo). 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).

Las probetas para los ensayos fueron maquinadas a partir de un perfil redondo calibrado de media pulgada de diámetro. El tipo de probetas para ensayos de tensión que se usó fue el de sección circular. La figura 1 muestra las características geométricas de estas probetas. Se realizó el ensayo de tracción para encontrar la resistencia última de tensión (S_u) del acero SAE 4140, el valor promedio S_u fue de 149,97 Ksi (1034,03 MPa).

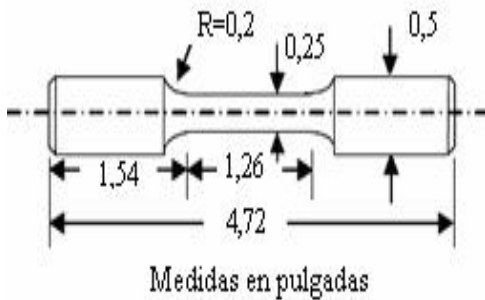


Figura 1. Probeta para ensayos de tracción
Figure 1. Sample for tension tests

Las pruebas de fatiga se realizaron en una máquina de flexión rotatoria bajo la norma ASTM E-606 [9]. Las probetas empleadas son cilíndricas con una reducción de diámetro en la zona central (ver figura 2).

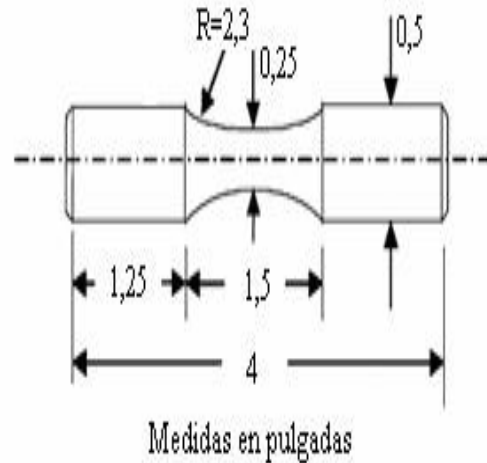


Figura 2. Probeta para ensayos de fatiga [9]
Figure 2. Sample for fatigue tests [9]

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 el procedimiento usado satisfactoriamente en trabajos anteriores [2,8] manteniendo las probetas durante un determinado tiempo en jugo de caña. El número de ciclos y la duración de cada inmersión en jugo se muestran en la tabla 1 (Donde N es el número de ciclos).

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

Se midió la topografía de la superficie de un eje de molino que falló por fatiga. Con base un análisis de semejanza se generó la rugosidad superficial en las probetas ($Ra = 1,926\mu\text{m}$), equivalente a la rugosidad superficial de los ejes de maza. Se usó la misma metodología que en las pruebas con el acero SAE 1045 [8], las probetas de fatiga fueron sumergidas en

jugo de caña antes, entre y durante las pruebas. La temperatura del jugo estuvo siempre monitoreada antes y después de cada inmersión, siguiendo el objetivo de mantener el jugo fresco. La temperatura del jugo se mantuvo siempre a 10°C. Los datos registrados durante los ensayos fueron registrados (ver tablas 2 y 3).

Tabla 2. Acero SAE 4140 ambiente jugo-acabado espejo
Table 2. SAE 4140 steel surrounded by juice and mirror finished

Prueba	Probeta	Diámetro (in)	Esfuerzo S (psi)	Momento Flector (lb-in)	Log S	Ciclos	Log N
1	N	0,254	119978	192,93	5,08	2800	3,45
2	F	0,254	119978	192,93	5,08	2800	3,45
3	Q	0,254	119978	192,93	5,08	2500	3,40
4	D	0,254	119978	192,93	5,08	2500	3,40
5	I	0,254	104981	168,81	5,02	7600	3,88
6	U	0,254	104981	168,81	5,02	6900	3,84
7	X	0,254	104981	168,81	5,02	8400	3,92
8	R	0,254	104981	168,81	5,02	8000	3,90
9	C	0,254	104981	168,81	5,02	6800	3,83
10	A	0,254	89984	144,69	4,95	31700	4,50
11	M	0,254	89984	144,69	4,95	32200	4,51
12	S	0,254	89984	144,69	4,95	31900	4,50
13	B	0,250	89984	138,07	4,95	40200	4,60
14	H	0,254	89984	144,69	4,95	27000	4,43
15	Z	0,252	89984	141,36	4,95	32300	4,51
16	G	0,254	89984	144,69	4,95	27600	4,44
17	K	0,254	89984	144,69	4,95	19900	4,30

Tabla 3. Acero SAE 4140 ambiente jugo-acabado rugoso
Table 3. SAE 4140 steel surrounded by juice and low roughness quality

Prueba	Probeta	Diámetro (in)	Esfuerzo S (psi)	Momento Flector (lb-in)	Log S	Ciclos	Log N
1	O	0,256	119978	197,45	5,08	1800	3,26
2	Z	0,256	119978	197,45	5,08	1600	3,20
3	S	0,256	119978	197,45	5,08	1900	3,28
4	H	0,254	119978	192,93	5,08	1900	3,28
5	A	0,254	104981	168,81	5,02	5100	3,71
6	P	0,256	104981	172,77	5,02	4500	3,65
7	G	0,256	104981	172,77	5,02	4200	3,62
8	C	0,254	104981	168,81	5,02	6100	3,79
9	I	0,254	104981	168,81	5,02	5200	3,72
10	X	0,256	89984	148,09	4,95	21600	4,33
11	E	0,254	89984	144,69	4,95	23800	4,38
12	T	0,254	89984	144,69	4,95	28100	4,45
13	W	0,254	89984	144,69	4,95	20800	4,32
14	R	0,254	89984	144,69	4,95	21900	4,34
15	Y	0,254	89984	144,69	4,95	22600	4,35
16	U	0,254	89984	144,69	4,95	23400	4,37
17	N	0,256	89984	148,09	4,95	20200	4,31

La particularidad de estos ensayos es que en algunos casos las muestras no resistieron el número de ciclos previos para la última inmersión y se fracturaron antes de lo previsto. Por ejemplo, en el ensayo del acero SAE 4140 ambiente jugo – acabado espejo, la prueba número 4 correspondiente a la probeta H (tabla 2) tuvo una vida en ciclos de 27000. Dado que el número total de ciclos sumados correspondiente

a esa probeta de acuerdo a los resultados que presentaron las pruebas en aire, los cuales dependían del número de ciclos hasta la fractura de la probeta más débil de ese nivel de esfuerzos es de 27520 ciclos antes de la última inmersión. Como se puede notar a esta probeta le faltó girar 520 ciclos para sumergirla por última vez en el jugo. El mismo resultado ocurrió con las pruebas presentadas en la tabla 4.

Tabla 4. Probetas que no alcanzaron el número de ciclos mínimo antes de la última inmersión
Table 4. Samples have not reached the minimum number of cycles before the last immersion

Ensayo (acero 4140)	Prueba	Probeta	Total de ciclos sumados antes de la última inmersión	ciclos de falla
ambiente jugo - acabado espejo	17	K	27520	19900
ambiente jugo - acabado rugoso	2	Z	1760	1600
ambiente jugo - acabado rugoso	7	G	5120	4200
ambiente jugo - acabado rugoso	6	P	5120	4500
ambiente jugo - acabado rugoso	5	A	5120	5100
ambiente jugo - acabado rugoso	17	N	24000	20200
ambiente jugo - acabado rugoso	16	U	24000	23400
ambiente jugo - acabado rugoso	15	Y	24000	22600
ambiente jugo - acabado rugoso	14	R	24000	21900
ambiente jugo - acabado rugoso	13	W	24000	20800
ambiente jugo - acabado rugoso	11	E	24000	23800
ambiente jugo - acabado rugoso	10	X	24000	21600

Analizando la tabla 4, se puede concluir que más del 50% del número de probetas evaluadas en el ambiente jugo – acabado rugoso fallaron antes de lo previsto, mientras que en el ambiente jugo – acabado espejo, sólo fallaron dos probetas antes de la última inmersión en el jugo. Estos resultados anticipan el efecto severo de la combinación jugo de caña y alta rugosidad superficial disminuyendo drásticamente la vida a fatiga del acero SAE 4140.

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. 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 5. 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 [10].

Tabla 5. Determinación del tamaño de la muestra
Table 5. 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 6, 7, 8 y 9 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 6. Análisis estadístico de las pruebas con acabado espejo ensayadas en el aire
Table 6. 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	3,27	0,10	2,92
0,7 Su	5	3,93	0,10	2,52
0,6 Su	7	4,71	0,15	3,16

Tabla 7. Análisis estadístico de las pruebas con acabado rugoso ensayadas en el aire
Table 7. 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	3,41	0,07	1,91
0,7 Su	5	3,93	0,10	2,49
0,6 Su	7	4,73	0,15	3,24

Tabla 8. Análisis estadístico de las pruebas con acabado espejo ensayadas con el jugo de caña
Table 8. 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	3,42	0,03	0,83
0,7 Su	5	3,88	0,04	1,03
0,6 Su	7	4,48	0,09	1,97

Tabla 9. Análisis estadístico de las pruebas con acabado rugoso ensayadas con el jugo
Tabla 9. 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	3,25	0,04	1,08
0,7 Su	5	3,70	0,06	1,69
0,6 Su	7	4,36	0,05	1,02

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con los datos obtenidos experimentalmente se trazaron gráficas esfuerzo alternante (S) contra número de ciclos (N) para cada condición y cada material. 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 escribir la ecuación de la siguiente manera:

$$\text{Log}S_f = -m\text{Log}N + b \quad (1)$$

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. En las figuras 3, 4, 5 y 6 se muestran las curvas S-N sobrepuestas para los dos aceros.

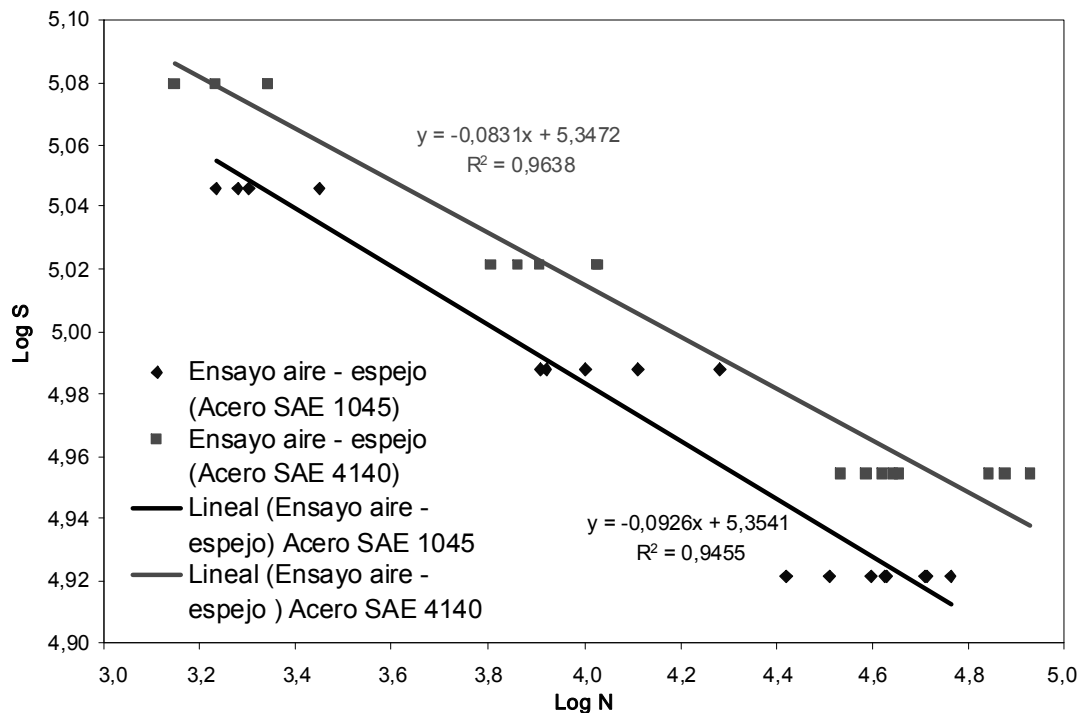


Figura 3. Curvas S-N para el acero SAE 1045 y SAE 4140 rodeado de aire: acabado espejo
Figure 3. S-N curves for the SAE 1045 and SAE 4140 steel surrounded by air: mirror finished

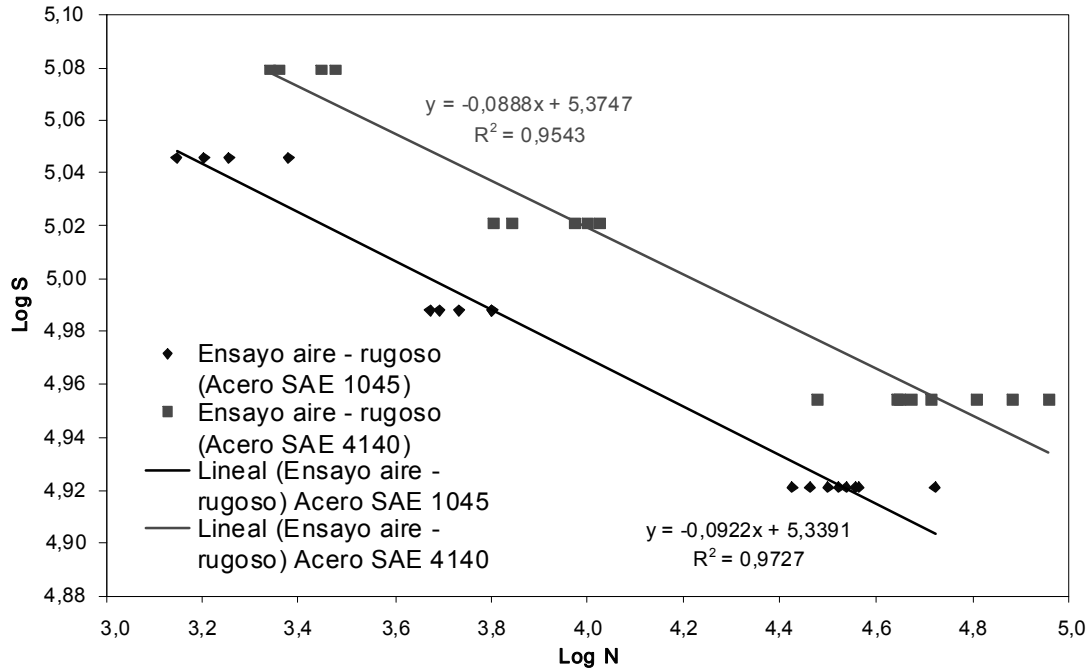


Figura 4. Curvas S–N para el acero SAE 1045 y SAE 4140 rodeado de aire y alta rugosidad
Figure 4. S-N curves for the SAE 1045 and SAE 4140 steel surrounded by air and low roughness quality

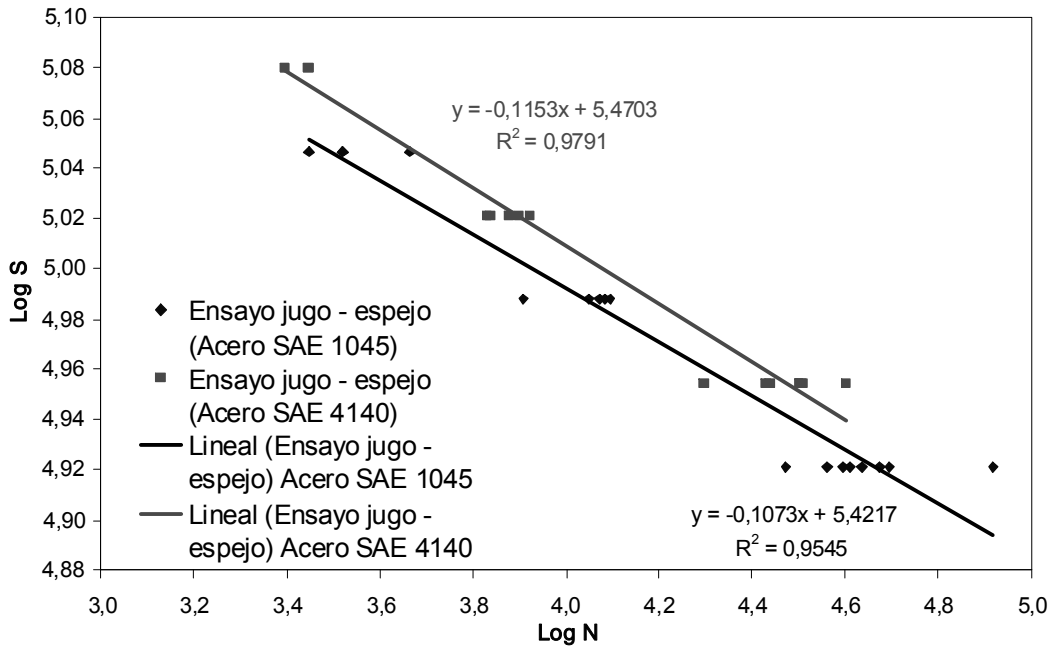


Figura 5. Curvas S–N para el acero SAE 1045 y SAE 4140 rodeado de jugo y acabado espejo
Figure 5. S-N curves for the SAE 1045 and SAE 4140 steel surrounded by juice with mirror finish

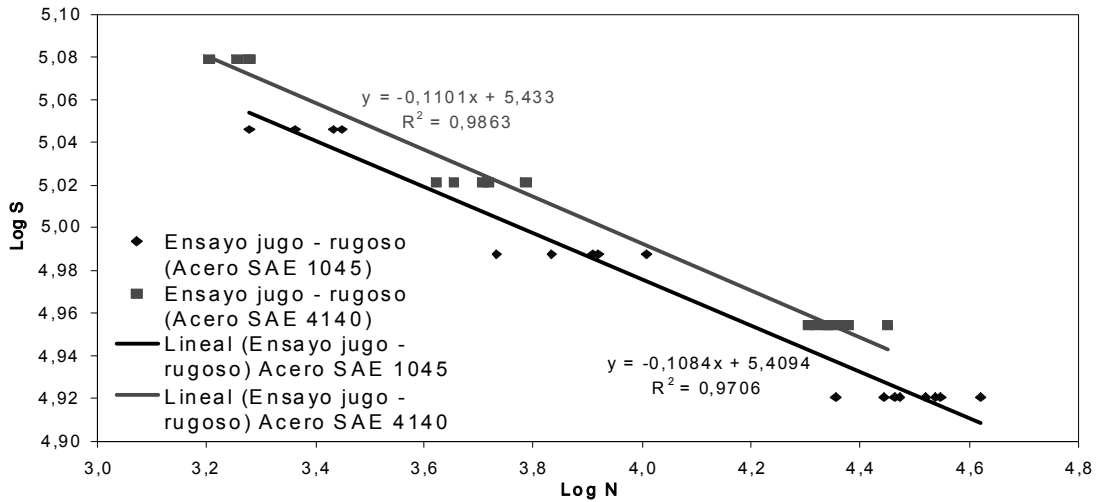


Figura 6. Curvas S-N para el acero SAE 1045 y SAE 4140 rodeado de jugo y alta rugosidad
Figure 6. S-N curves for the SAE 1045 and 4140 steel surrounded by juice with low roughness quality

La tabla 10 presenta los valores de resistencia a la fatiga tanto para el acero SAE 4140 como para el acero SAE 1045 (10^6 ciclos) para todas las condiciones ensayadas. El acero SAE 4140 presentó una resistencia a la fatiga superior al acero SAE 1045 en las condiciones ensayadas: 10% superior en la condición aire-acabado espejo, 12% en la condición aire-acabado rugoso y 3% superior al acero SAE 1045 en la condición de alta rugosidad superficial-ambiente corrosivo, es decir, cuando los ejes de molino de caña no poseen un sistema de sellado. En la

condición jugo-acabado espejo la resistencia a la fatiga fue similar. Aunque el acero SAE 4140 presentó una resistencia a la fatiga superior al acero SAE 1045 en el momento de seleccionar un material para estas condiciones se debe considerar los costos del material, ya que el acero SAE 1045 es más económico. Además se debe considerar si el eje posee un sistema de sellado que impida el ingreso de jugo de caña y partículas abrasivas.

Tabla 10. Valores de la resistencia a la fatiga en los diferentes ensayos
Table 10. Values of the fatigue limit for the different tests

Ensayo	Acero	Resistencia a la fatiga Psi (MPa)
ambiente aire – acabado espejo	SAE 1045	62878,19 (433,53)
ambiente aire – acabado rugoso	SAE 1045	61080,14 (421,13)
ambiente jugo – acabado espejo	SAE 1045	59965,30 (413,45)
ambiente jugo – acabado rugoso	SAE 1045	57411,65 (395,84)
ambiente aire – acabado espejo	SAE 4140	70566,73 (486,54)
ambiente aire – acabado rugoso	SAE 4140	69486,43 (479,09)
ambiente jugo – acabado espejo	SAE 4140	60048,20 (414,02)
ambiente jugo – acabado rugoso	SAE 4140	59210,67 (408,24)

La disminución de la resistencia a la fatiga del acero SAE 4140 a causa de la condición superficial fue del 1,53%, debido al ambiente corrosivo fue del 14,9% y debido a la alta rugosidad y ambiente corrosivo fue del 16,1%.

El material al que más le afecta la presencia de una rugosidad superficial burda es el acero SAE 1045 [8], el efecto es aproximadamente dos veces mayor que en el acero SAE 4140. Sin embargo, al material que más le afecta la presencia de un ambiente corrosivo (jugo de caña) es el acero SAE 4140, el efecto es aproximadamente tres veces mayor que en el acero SAE 1045. Por último al material que más le afecta la presencia de la sinergia de estas dos condiciones de agresividad es el acero SAE 4140, el efecto es aproximadamente dos veces mayor que en el acero SAE 1045. Lo cual produjo una resistencia a la fatiga similar bajo esta condición para los dos aceros.

La condición de ensayo que presenta el efecto más perjudicial en la resistencia a la fatiga considerando las dos condiciones de agresividad por separado para cada uno de los aceros es la presencia de un ambiente corrosivo, en este caso jugo de caña (guarapo); valga la pena aclarar que entre los dos materiales al que más le afecta la presencia del jugo de caña es el acero SAE 4140. Una explicación a la mayor reducción de la resistencia a la fatiga del acero SAE 4140 comparada con el acero SAE 1045 en presencia de jugo de caña es que el incremento de la resistencia a la tensión aumenta la resistencia a fatiga, pero disminuye la resistencia a la corrosión por fatiga. Materiales con alta resistencia mecánica resisten la nucleación de grietas por fatiga, pero después de formadas crecen más rápido, comparada con materiales de baja resistencia mecánica [11].

Los resultados obtenidos se presentan como un factor de reducción de resistencia en fatiga o factor debido a efectos varios K_f . 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.

$$K_f = \frac{S_{e(aire-rugoso)}}{S_{e(aire-espejo)}} = 0,98 \quad (2)$$

$$K_f = \frac{S_{e(jugo-espejo)}}{S_{e(aire-espejo)}} = 0,85 \quad (3)$$

$$K_f = \frac{S_{e(jugo-rugoso)}}{S_{e(aire-espejo)}} = 0,84 \quad (4)$$

El mecanismo de fractura del material ensayado, fue similar al encontrado por Moreno et al [7] en el acero SAE 4140 en la condición original, mixto por coalescencia de cavidades con presencia de microhoyuelos (dimples) y facetas de clivaje.

4. CONCLUSIONES

La disminución de la resistencia a la fatiga del acero SAE 4140 a causa de la condición superficial fue del 1,53%, debido al ambiente corrosivo fue del 14,9% y debido a la alta rugosidad y ambiente corrosivo fue del 16,1%.

Los ensayos para calcular la resistencia a la fatiga en el acero SAE 4140, que involucraban la presencia de jugo en las pruebas, indicaron que la presencia de una rugosidad superficial burda afectó de una manera sustancial la resistencia a la fatiga donde más del 50% del número de probetas evaluadas fallaron antes de lo previsto; puesto que en comparación con los mismos ensayos, pero con el acero SAE 1045 en ninguna de las pruebas se presentó esta situación.

El material al que más le afecta la presencia de una rugosidad superficial burda es el acero SAE 1045, al material que más le afecta la presencia de un ambiente corrosivo es el acero SAE 4140 y al material que más le afecta la presencia de la sinergia de estas dos condiciones es el acero SAE 4140, el efecto es aproximadamente dos veces mayor que en el acero SAE 1045.

El acero SAE 4140 presentó una resistencia a la fatiga superior al acero SAE 1045 en las condiciones ensayadas, pero el acero SAE 1045

es más económico. Por tanto un análisis de costos contra resistencia a la fatiga se debe realizar antes de seleccionar un acero para una determinada condición.

5. AGRADECIMIENTOS

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

REFERENCIAS

- [1] GÓMEZ A.L. CORONADO J.J. VÁLDES J.A. Desgaste de Máquinas de Preparación y Molienda de Caña de Azúcar. Serie Procesos Industriales. Cenicaña. 2008.
- [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] MORENO, F.R. SALAZAR, W.J. SÁENZ, L.A. Evaluación del comportamiento mecánico a la fatiga en aceros AISI 4340 y AISI 4140 tratados térmicamente con recocidos y normalizados. *Revista Ingeniería UC*. 12, 40-45, 2005.
- [7] ESTE, P. SÁENZ, L. Evaluación de la resistencia a la fatiga y límite a fatiga de aceros de medio y bajo carbono. *Revista Ingeniería UC*, 11, 69-75, 2004.
- [8] CEBALLOS W.F. GÓMEZ A.L. CORONADO J.J. Sinergia entre alta rugosidad superficial y ambiente corrosivo en el comportamiento a la fatiga del acero SAE 1045. *Dyna*, No. 154, 91-100, 2008.
- [9] Standard Recommended Practice for Constant – Amplitude Low – Cycle Fatigue Testing, Annual book of ASTM standards, E 606 – 80, 1980.
- [10] LIPSON, C., NARENDRA S. *Statistical Design and Analysis of Engineering Experiments*. New York, McGraw-Hill, 1973.
- [11] FONTANA, M.G., *Corrosion Engineering*. Third Edition, New York, McGraw-Hill, 1986.