

## ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO A FATIGA DE UN ACERO AISI 1045 EN UN AMBIENTE DE JUGO DE CAÑA DE AZÚCAR

### RESUMEN

Se ha estudiado la sinergia de la fatiga en flexión rotatoria y la corrosión por jugo de caña para un acero AISI (SAE) 1045, usando probetas normalizadas de fatiga. Para las pruebas se usó jugo de caña degradado con pH 4, típico del cuarto molino. Durante la rotación de las probetas se aplicó un flujo continuo de jugo de caña. Se hicieron comparaciones entre las pruebas normalizadas en seco y las que fueron sometidas al ambiente corrosivo. Estas últimas presentaron una disminución del 11 % en el límite de resistencia a fatiga. Estos resultados son aplicables para las zonas del eje que no están protegidas con lubricante.

**PALABRAS CLAVES:** Fatiga, corrosión, eje de molino.

### ABSTRACT

*Rotating bending fatigue and juice corrosion synergy for AISI 1045 steel was considered using standard rotating fatigue specimens. Typical fourth mill degraded juice with 4 pH was used for the trials. During rotation, a continuous flow of juice was also applied. Comparison between a dry standard test and the adapted corrosion experiment showed a reduction of 11% in the fatigue limit,  $S_n$ . This result could be applicable for zones not protected by a lubricant.*

**KEY WORDS:** Fatigue, corrosion, mill shaft.

### JAIME ANDRÉS GÓMEZ

Ingeniero Mecánico  
Universidad del Valle  
jaimeag@starmedia.com

### ADOLFO LEÓN GÓMEZ

Ingeniero Mecánico, M.Sc.  
Profesor Titular  
Universidad del Valle. Ingeniería  
Mecánica  
Grupo de Investigación en  
Mejoramiento Industrial  
fito@petecuy.univalle.edu.co

### JOHN JAIRO CORONADO

Ingeniero Mecánico, M.Sc.  
Profesor Asistente  
Universidad del Valle. Ingeniería  
Mecánica  
Grupo de Investigación en  
Mejoramiento Industrial  
johncoro@petecuy.univalle.edu.co

## 1. INTRODUCCIÓN

Los ejes de maza de molinos de caña de azúcar por lo general no presentan ningún tipo de aislamiento efectivo para separarlos del jugo de la caña. En algunos diseños de molinos es posible la presencia de material fibroso retenido en zonas críticas de los ejes con el consecuente desarrollo de Adicionalmente, la velocidad de giro de los ejes de maza es relativamente baja (entre 3 y 7 revoluciones por minuto) y los torques de accionamiento de un molino de 2.13 m de ancho pueden alcanzar los 1200 kN-m. Ante la inquietud surgida a partir de la falla prematura y en muchos casos inexplicable de algunos ejes de maza de molino de caña, se han estudiado diversas hipótesis en los campos relacionados con la resistencia de estos ejes. La presencia de fluidos corrosivos (jugo de caña), en el funcionamiento de estos ejes, puede disminuir la vida en ciclos de estos, alterando el límite de resistencia a la fatiga. Debido a lo anterior, la falla del eje puede ocurrir antes de lo previsto, es decir, la sinergia entre corrosión y fatiga contribuye a ubicar estos elementos en la vida finita. Para profundizar en este supuesto, se llevaron cabo una serie de experimentos, apoyados en investigaciones desarrolladas al respecto, por el Grupo de Investigación en Mejoramiento Industrial de la Universidad del Valle, en el marco del "Proyecto Cooperativo Agroindustrial para Reducir el Desgaste en Equipos de Preparación y Molienda de Caña de Azúcar".

El objetivo de este trabajo de investigación consistió en comparar el comportamiento ante la fatiga de un acero muy empleado en la fabricación de ejes (acero SAE 1045) en dos situaciones: una de ellas a condiciones ambientales normales (con los especímenes o probetas rodeados de aire), y la otra con la probeta rodeada por un medio ambiente corrosivo. En el segundo caso, este medio fue jugo de caña de azúcar, obtenido de la situación real de funcionamiento de estos ejes, para luego comparar los resultados de ambas pruebas. El elevado costo de manufactura de los ejes, sumado a la gravedad de la falla de un elemento como este, que al fracturarse detiene temporalmente la producción del tándem de molienda, hace necesario un estudio detallado de este problema.

## 2. CONTENIDO

### 2.1. Consideraciones estadísticas

La predicción de los lugares de iniciación de las grietas de fatiga, además de los estados de carga y geometría está relacionada con la variabilidad de los materiales y de los procesos de manufactura. Como estas dos variables son difíciles de controlar (al menos la primera de ellas), las consideraciones de tipo estadístico, tanto en el diseño experimental como en el manejo de resultados de las pruebas de fatiga, son supremamente importantes. Se acepta que la distribución Log normal es la mejor opción para algunas características de material, como la tasa de crecimiento de fisuras y para

condiciones no lineales y aceleradas de deterioro de un sistema. En general, el método consiste en predecir la media y la desviación estándar del logaritmo de la vida para combinarlo con el análisis de esfuerzos y las relaciones de esfuerzo vs. número de ciclos (S-N).

En el caso de sistemas mecánicos, es difícil validar la distribución de la vida en fatiga de detalles individuales sin recurrir a grandes tamaños de muestreo. En algunos casos, el detalle de diseño más propenso a falla logra predecirse como fallado, en aproximadamente una de cada seis muestras y el resto de fallas se presentan dispersas entre las otras posibles ubicaciones. En la industria azucarera colombiana, en el caso de los ejes de maza, se reporta (Rivas et al, 2003) que la frecuencia de fallas en el escalón interno del guiño, lado accionamiento es del 85% y el 15 % restante se distribuye entre la transición del cuadrante al apoyo de la corona, la entrada del asiento de maza y el guiño del lado libre.

Cuando no es práctico disponer de un gran tamaño de muestreo, puede diseñarse la prueba para evaluar la validez de la distribución que ha sido prevista. Este es el caso que se adopta para evaluar el efecto de un medio sobre la vida en fatiga (corrosión-fatiga), o para los efectos varios en reducción del límite de fatiga. La dispersión de los resultados de vida hasta la falla, es menor en un sistema que para componentes individuales. En el caso de los ejes de maza, su falla no reviste, en general, riesgo de pérdida de vidas, aunque sí importantes efectos económicos.

Tomando tres niveles de esfuerzo en el diseño experimental ( $0.8 S_{ut}$ ,  $0.7 S_{ut}$ ,  $0.6 S_{ut}$ ) se tiene que con un 90% de nivel de confianza y un error del 5%, el coeficiente esperado de variación corresponde al 4% en el nivel de esfuerzo más alto ( $0.8 S_{ut}$ ), al 5% en el nivel intermedio ( $0.7 S_{ut}$ ) y al 7% en el nivel bajo ( $0.6 S_{ut}$ ). En el caso de encontrar coeficientes de variación mayores de los esperados en cualquiera de los niveles (muy seguramente en los niveles inferiores), se deben ensayar más probetas en el nivel que presentó la variación excedida, esto, con el fin de conservar el mismo porcentaje de error y la confianza en todos los niveles de esfuerzos.

## 2.2. Diseño de experimentos

Para determinar si la presencia de un medio corrosivo en el funcionamiento, bajo cargas cíclicas de un material, afecta la resistencia de éste, es necesario comparar su resistencia ante el fenómeno de fatiga bajo condiciones similares. Siguiendo este camino, se decidió realizar ensayos a fatiga para determinar las gráficas S-N del acero AISI 1045, en las condiciones ya mencionadas (condiciones ambientales estándar y medio ambiente corrosivo).

Debido al interés particular de esta investigación, en el caso de los ejes de maza de molinos azucareros, las condiciones de los ensayos buscarán emular lo más

aproximadamente posible las condiciones presentes en estos componentes. Por tal motivo, el fluido empleado para generar la corrosión en las probetas será jugo de caña obtenido en el proceso de molienda.

## 2.3. Influencia de la frecuencia de los ciclos

La mayor dificultad que se presenta para simular las condiciones reales de la operación de molienda, es la influencia de la frecuencia de los ciclos en la fatiga bajo ambientes corrosivos, pues una alta velocidad de ciclaje no da lugar a una permanencia prolongada del fluido corrosivo en contacto con la superficie a corroer (Figura 1). La gran velocidad de giro hace que el líquido se acelere, separándose de la probeta, evitando en muchos casos el contacto con éste, modificando las condiciones ambientales deseadas para realizar la comparación. Los resultados obtenidos para ensayos a fatiga en medios corrosivos, varían sustancialmente con la frecuencia de los ciclos, lo cual distorsionaría los resultados en el caso de ensayar las probetas a velocidades de giro similares.

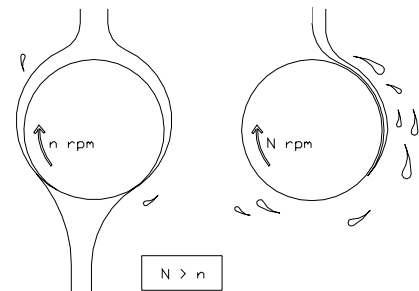


Figura 1. Efecto de la velocidad en el contacto del jugo con la superficie de la probeta

La solución más evidente sería ensayar las muestras que van a formar parte del ensayo con medio corrosivo a una velocidad de giro menor. Sin embargo, para que el fenómeno de corrosión tenga lugar de manera similar a la que se da en un molino de caña, donde las velocidades de giro son supremamente bajas, la duración de las pruebas a flexión rotatoria dificultaría la viabilidad de los experimentos. La solución adoptada, buscando simular las condiciones reales, fue la de someter a las probetas al "ataque" del fluido corrosivo (jugo de caña), durante un período determinado de tiempo, luego girarlas durante un número determinado de ciclos a una velocidad aproximadamente 50% menor que la de los ensayos en condiciones estándar, detenerlas, exponerlas de nuevo al jugo, montarlas de nuevo a la máquina, girarlas otra cantidad de ciclos sumergirlas de nuevo en el jugo, y así sucesivamente (Figura 2). Obviamente a los niveles más altos de esfuerzos, solo se podría hacer esto una o máximo dos veces (por la corta duración del ensayo), pero en los niveles de esfuerzo más bajos, si se podrían repetir varias secuencias de este tipo, así, las condiciones serían mucho más cercanas a las reales que si los ensayos fueran iguales a los realizados en condiciones estándar.

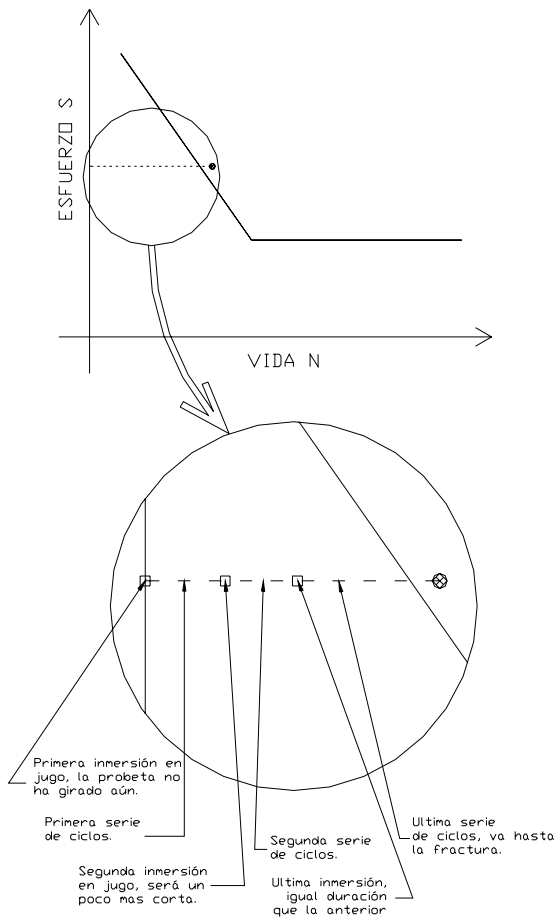


Figura 2. Procedimiento para ensayos en jugo

Con esta modificación de las pruebas, se logra que las muestras estén expuestas al jugo de caña, pero que den lugar a que haya contacto durante el tiempo suficiente. Además, en el caso de las inmersiones posteriores al primer montaje en la máquina y los correspondientes primeros ciclos, se van a generar depósitos de electrolito (jugo) en las micro grietas que posiblemente se hayan formado, esto acercará a la realidad los efectos del agente corrosivo sobre el eje de acero. Para que existiera homogeneidad en las condiciones de los ensayos, se decidió, someter cada espécimen a la misma cantidad de inmersiones en jugo y con la misma duración, sin importar el nivel de esfuerzos, estas secuencias se muestran en la tabla 1.

Nivel de Esfuerzo	Duración 1ª Inmersión	Ciclos hasta 2ª Inmersión	Duración 2ª y 3ª Inmersión	Ciclos 3ª Inmers
0.6S <sub>ut</sub>	8 horas	6750	4 horas	11250
0.7S <sub>ut</sub>	8 horas	3380	4 horas	5550
0.8S <sub>ut</sub>	8 horas	2970	4 horas	4950

Tabla 1. Duración de las inmersiones en jugo

Con el fin de evitar la ruptura de probetas sin haber completado el número de inmersiones, se utilizó como referencia el número de ciclos N hasta la fractura de la

probeta más débil de cada nivel de esfuerzos en los ensayos en aire. Se emplearon porcentajes del 30% de N para realizar la segunda inmersión y del 50% de N para realizar la tercera y última inmersión. La Figura 3 muestra el ataque corrosivo causado por el primer ciclo de inmersión en jugo de caña pH 4.

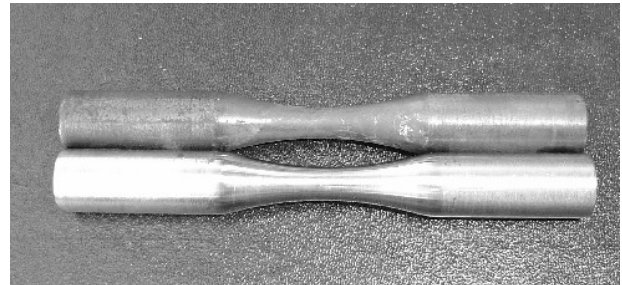


Figura 3. Probetas antes y después del primer ciclo de inmersión

### 2.4. Ensayos de fatiga

En la Figura 4 se muestra el esquema de flexión rotatoria con la probeta cargada en voladizo. Los ensayos se realizaron en una máquina de fatiga por flexión rotatoria donde las cargas son aplicadas a la probeta a través de un brazo de carga y un rodamiento de bolas, las cargas corresponden a un peso suspendido sobre una barra calibrada que está pivotada en el otro extremo de la máquina. La probeta está rotando continuamente de manera que cada punto de su sección sea sometido alternativamente a ciclos de flexión y compresión de igual magnitud y cada ciclo de estos corresponde a una vuelta del motor eléctrico de la máquina.

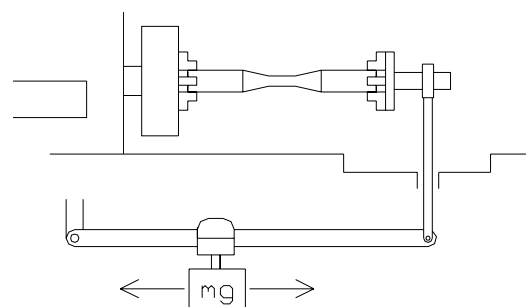


Figura 4. Esquema de carga en voladizo

En la Figura 5 se muestra el montaje realizado para el sistema de aplicación del jugo de caña sobre la probeta. La probeta se encuentra dentro de un recipiente cerrado que contiene el jugo, los accesorios son: una bomba

para recirculación y dos mangueras de entrada y salida del jugo de caña.

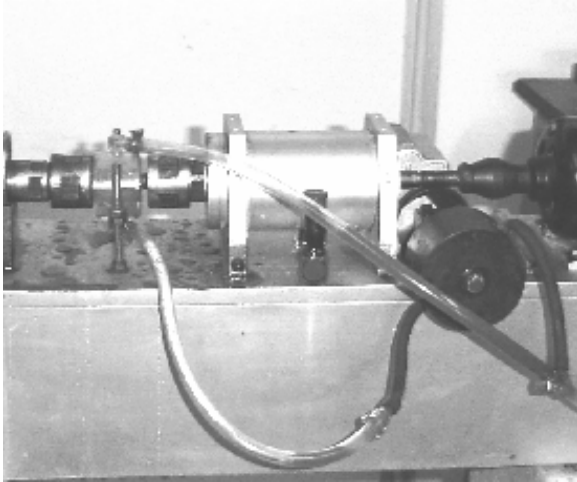


Figura 5. Sistema de goteo de jugo

**3. RESULTADOS**

**3.1. Pruebas en aire**

Los resultados obtenidos para los ensayos realizados en aire fueron bastante satisfactorios, desde el punto de vista del comportamiento estadístico de la muestra. Es decir, solo en uno de los niveles (el de 0,6  $S_{ut}$ ), fue necesario ensayar una probeta de más. En la Tabla 2, se listan diámetro y momento flector aplicado para cada probeta. Debido a las pequeñas diferencias en los diámetros de fabricación de las probetas aleatoriamente escogidas para cada nivel fue necesario hacer también ajustes en los momentos flectores aplicados. De igual manera en la Tabla 2 están registrados los resultados de vida en ciclos y los respectivos logaritmos de ambos datos, listos para ser graficados.

Prueba	Número de probeta	Diámetro (in)	S, psi	Momento flector Lb in	Log S	Ciclos	Log N
1	33	0,262	111.633	196,65	5,05	9900	4,00
2	12	0,232	111.633	137,20	5,05	9900	4,00
3	17	0,258	111.633	187,77	5,05	10800	4,03
4	29	0,264	97.679	175,84	4,99	14100	4,15
5	22	0,254	97.679	156,96	4,99	14000	4,15
6	14	0,258	97.679	164,30	4,99	12800	4,11
7	26	0,258	97.679	164,30	4,99	11100	4,05
8	15	0,269	83.725	159,99	4,92	22500	4,35
9	28	0,266	83.725	154,18	4,92	27800	4,44
10	30	0,250	83.725	128,43	4,92	23700	4,37
11	25	0,258	83.725	140,83	4,92	51100	4,71
12	20	0,254	83.725	134,53	4,92	45100	4,65
13	5	0,258	83.725	140,83	4,92	43700	4,64
14	9	0,256	83.725	137,74	4,92	151000	5,18
15	3	0,262	64.007	112,75	4,81	912500	5,96
16	31	0,256	68.515	112,72	4,84	339800	5,53

Tabla 2. Resultados para pruebas realizadas en aire

Dependiendo del nivel de esfuerzos empleado en la prueba, se espera un coeficiente de variación (CV), que es igual al 4% para el nivel más alto (0,8  $S_{ut}$ ), al 5% para el nivel intermedio (0,7  $S_{ut}$ ) y al 7% para el nivel más bajo (0,6  $S_{ut}$ ). La confiabilidad de los datos obtenidos, desde el punto de vista estadístico, se confirma comparando con los CV experimentales con los deseados (Tabla 3). Como se puede observar, el tamaño de muestra resultó ser el correcto en los tres niveles de esfuerzos.

Nivel de esfuerzo	CV límite	Prome-dio	Desviación Estándar	CV Experimental
0.8 $S_{ut}$	0,04	4,008231	0,0218172	0,005443
0.7 $S_{ut}$	0,05	4,11197	0,0483692	0,011763
0.6 $S_{ut}$	0,07	4,621862	0,2842158	0,061494

Tabla 3. Estadística del tamaño de muestra, pruebas en aire

Los datos obtenidos se grafican en escala logarítmica obteniendo la curva S-N de la cual se puede extraer datos como la vida a un esfuerzo dado y la línea de tendencia. (Ver Figura 6).

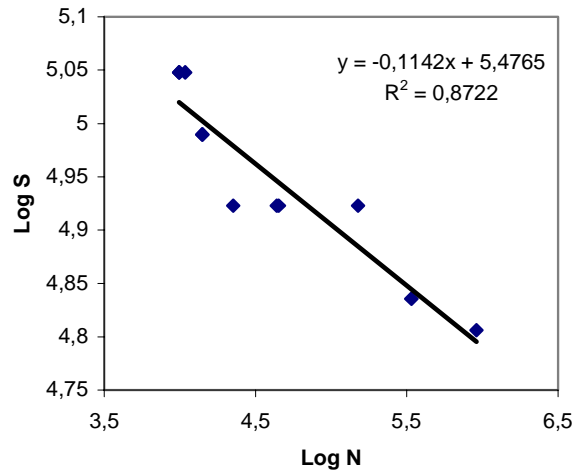


Figura 6. Curvas S-N para ensayos en aire

**3.2. Pruebas en jugo**

Al igual que los ensayos realizados en aire, los realizados en jugo arrojaron unos resultados bastante satisfactorios desde el punto de vista estadístico, aún mejores que los de los ensayos en aire. Es decir, la dispersión de los datos fue mucho menor en todos los niveles de esfuerzos. En la Tabla 4 se presenta la duración de las inmersiones y el desarrollo de los ciclos de cada probeta durante las pruebas.

Nivel de esfuerzos	# de Probeta	Hora de 1 entrada al tanque	Hora salida hacia 1 ciclo	ciclos sumados	Hora de 2 entrada al tanque	Hora salida hacia 2 ciclo	ciclos sumados	Hora de 3 entrada al tanque	Hora salida hacia 3 ciclo				
60% Sut	4	12:35 p.m.	8:35 a.m.	6750	12:35	02:39	11250	02:42	03:42				
	23				12:40	02:42		02:44	03:44				
	21				12:44	02:43		02:46	03:57				
	8				12:49	02:48		02:54	03:59				
	32				01:01	03:00		03:02	04:04				
	11				01:06	03:04		03:06	04:07				
	0				01:11	03:07		03:10	04:14				
70% Sut	2			12:35 p.m.	8:35 a.m.	3330	12:09	02:09	5550	02:11	03:08		
	24						12:15	02:16		02:20	03:16		
	16						12:18	02:21		02:24	03:19		
	1						12:22	02:24		02:26	03:21		
80% Su	19					12:35 p.m.	8:35 a.m.	2970	11:58	01:58	4950	02:03	02:59
	10								12:03	02:03		02:06	03:01
	7								11:53	01:53		01:58	02:53

Tabla 4. Ciclos de inmersión y giro de las probetas

Los datos registrados durante estos ensayos fueron registrados de igual manera que los anteriores (Tabla 5).

Prueba	Número de probeta	Diámetro (in)	S, psi	Momento flector Lb-in	Log S	Ciclos	Log N
1	10	0,254	111.633	179,38	5,05	8150	3,91
2	7	0,230	111.633	133,86	5,05	6850	3,84
3	19	0,261	111.633	195,75	5,05	9050	3,96
4	2	0,266	97.679	180,08	4,99	16550	4,22
5	16	0,258	97.679	164,30	4,99	11650	4,07
6	1	0,258	97.679	164,30	4,99	10950	4,04
7	24	0,258	97.679	164,30	4,99	11550	4,06
8	8	0,191	83.725	57,18	4,92	41550	4,62
9	21	0,250	83.725	128,43	4,92	48450	4,69
10	23	0,258	83.725	140,83	4,92	47550	4,68
11	4	0,260	83.725	144,20	4,92	46050	4,66
12	11	0,256	83.725	137,74	4,92	49550	4,70
13	32	0,260	83.725	144,13	4,92	39450	4,60
14	0	0,262	83.725	147,49	4,92	39650	4,60

Tabla 5. Resultados para pruebas realizadas en jugo

De manera similar a lo realizado con el caso de los ensayos en aire, se verificó el tamaño de la muestra examinada, dependiendo del nivel de esfuerzos empleado en la prueba, se compararon los CV experimentales con los esperados (Tabla 6).

Nivel de esfuerzo	CV límite	Promedio	Desv.Est.	CV Exper.
0.8 Sut	0,04	3,9012	0,0611	0,0157
0.7 Sut	0,05	4,0968	0,0822	0,0201
0.6 Sut	0,07	4,6477	0,0423	0,0091

Tabla 6. Estadística del tamaño de la muestra para pruebas en jugo

Al igual que en el caso anterior, los resultados fueron satisfactorios con el número de muestras escogidas inicialmente.

Siguiendo la misma metodología del caso de los ensayos en aire, a continuación se muestran los gráficos S-N para los ensayos en jugo, también se emplea la escala logarítmica (Figura 7).

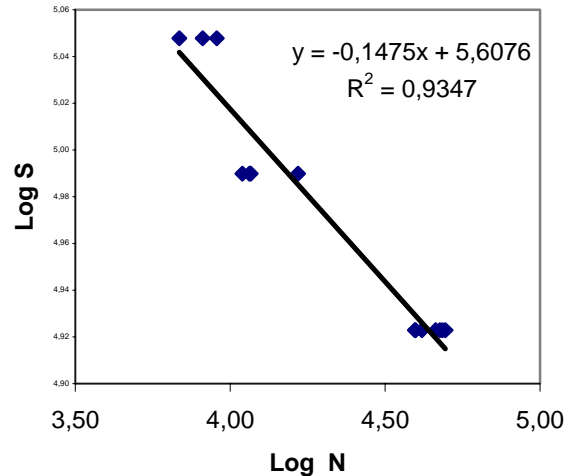


Figura 7. Grafico S-N para pruebas en jugo

### 3.3. Cálculo de vida finita

Con los puntos obtenidos de los datos experimentales, se trazó una gráfica S-N para cada caso de ensayo. Además, relacionaron con una línea de tendencia, con la cual se representa el comportamiento aproximado de la resistencia a la fatiga a diversos ciclos del material, en las dos condiciones evaluadas. En el rango de vida finita, es decir, entre  $10^3$  y  $10^6$  ciclos, la línea corresponde a la ecuación 1.

$$Y = -mx + b \tag{1}$$

Donde  $y$  corresponde a  $\text{Log } S_f$  siendo  $S_f$  el esfuerzo aplicado a una vida determinada,  $x$  corresponde a  $\text{Log } N$  siendo  $N$  la vida en ciclos,  $m$  y  $b$  son parámetros dependientes de las características de cada material. Se puede reescribir la ecuación de la siguiente manera.

$$\text{Log } S_f = -m \text{Log } N + b \tag{2}$$

Si se desea conocer el número de ciclos que resistirá teóricamente una muestra, igual a las ensayadas a un nivel de esfuerzos dentro de los límites de la vida finita se puede emplear la siguiente ecuación.

$$N = \frac{\left( \frac{10^b}{S_f} \right)}{m} \tag{3}$$

De la ecuación anterior, igualando el número de ciclos a  $10^6$  (límite empleado para vida finita) se obtiene el límite de la resistencia a la fatiga. Este valor es comparable a los ya conocidos para este tipo de materiales en ensayos similares. Además, se pueden comparar los resultados de las pruebas en aire con los de las pruebas en jugo. La ecuación de la línea obtenida en los ensayos en aire es la siguiente:

$$y = -0,1188x + 5,4847 \quad (4)$$

La ecuación de la línea obtenida en los ensayos en jugo es la siguiente:

$$y = -0,1475x + 5,6076 \quad (5)$$

Para estas dos ecuaciones, tomando N como  $10^6$  se obtienen los siguientes valores de resistencia a la fatiga:

$$S_{e(\text{aire})} = 59142,543 \text{ psi}$$

$$S_{e(\text{jugo})} = 52795,876 \text{ psi}$$

Pensando en la futura aplicación de estos resultados para el diseño de nuevos elementos mecánicos, fundamentalmente ejes, se van a manejar dos hipótesis: la primera, consistirá en manejar los resultados obtenidos como un factor de reducción de resistencia a la fatiga, introduciéndolo como  $k_f$  o factor debido a efectos varios. Este factor sería el cociente entre la resistencia presentada por las muestras en los ensayos en jugo y la presentada por los ensayos en aire, así:

$$k_f = \frac{S_{e(\text{jugo})}}{S_{e(\text{aire})}} = \frac{52795,88}{59142,54} = 0,893 \quad (6)$$

Este valor, podría utilizarse tentativamente en el dimensionamiento de nuevos ejes al introducirlo como un factor reductor de la resistencia a la fatiga, debido a las condiciones corrosivas presentes en el funcionamiento de estos ejes. La segunda alternativa propuesta, consiste en trazar una nueva línea de tendencia, utilizando el primer punto de la línea de tendencia de la curva S-N para los ensayos realizados en aire y el último punto de la línea de tendencia de la gráfica S-N para los ensayos realizados en jugo, esto, partiendo del hecho de que los ejes no van a estar corroídos desde el comienzo, lo cual si sucedió en las pruebas realizadas en jugo.

#### 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las pruebas señalaron la existencia de una relación entre la disminución de la vida a fatiga de un material y

la presencia de fluidos corrosivos en su medio ambiente de funcionamiento.

Los resultados obtenidos abren toda una serie de posibilidades para modificar el dimensionamiento de ejes en ambientes corrosivos.

Se presentó una disminución de aproximadamente 11% en el límite de resistencia a fatiga, en probetas de acero SAE 1045 en un ambiente corrosivo de jugo de caña de azúcar.

Se recomienda ampliar la cobertura de estos estudios a otros materiales y otras condiciones. Se facilitaría utilizando como base los ya realizados, mejorando así los posibles efectos sobre el incremento de la duración de elementos mecánicos en este tipo de ambientes corrosivos.

#### 5. AGRADECIMIENTOS

El Grupo de Investigación en Mejoramiento Industrial de la Escuela de Ingeniería Mecánica (Universidad del Valle), en el marco del "Proyecto Cooperativo Agroindustrial para Reducir el Desgaste en Equipos de Preparación y Molienda" que se lleva a cabo en el Ingenio Manuelita S.A., con la participación de CENICAÑA, agradece los aportes del personal de estas organizaciones y el apoyo financiero de COLCIENCIAS, que ha posibilitado este trabajo.

#### 6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] CORONADO, J. J., RIVAS, J. S., GÓMEZ A. L. "Estudio tribológico en chumaceras y ejes de Molino de caña de azúcar" Dyna. No 144. 1-8, 2004.
- [2] KUMAR, R., SHUKLA, N. P. "Protection of mild steel from corrosion by sugar cane juice" International Sugar Journal. Volume 97. 168-184.
- [3] MONDUÍ, R., LLANES, T. "Wear and corrosion in the crushing plant of sugar factories" Factory Engineering. 248-252, 1989.
- [4] RIVAS, J. S., RODRÍGUEZ, S. A. GÓMEZ, A. L. "Estudio de los factores que afectan la confiabilidad de los ejes de molino de caña", VI Congreso Colombiano de la Asociación de Técnicos de la Caña de Azúcar. Cali, Colombia. 24, 25 y 26 septiembre, 137-149, 2003.