

Estudio de corrosión bajo tensión en los aceros inoxidable 17-4PH y 17-7PH en presencia de NaCl y NaOH (20 %) a 90 °C(*)

Citlalli Gaona-Tiburcio*, Facundo Almeraya-Calderón* y Alberto Martínez-Villafañe*

Resumen

Uno de los problemas que afecta a la industria eléctrica es el de los paros no programados en las plantas generadoras de electricidad, debidos al fallo de algún componente principal: caldera, turbina y generador. En la turbina, la acción combinada de un agente corrosivo (vapor húmedo contaminado) y un esfuerzo mecánico, generalmente provocará corrosión bajo tensión (CBT). En este trabajo se analiza la susceptibilidad a la CBT de los aceros inoxidable, endurecibles por precipitación, 17-4PH y 17-7PH, ampliamente usados en alabes de turbina de vapor de centrales termoeléctricas. Las muestras se ensayaron en presencia de NaCl y NaOH (20 %) a 90 °C, y distintos valores de pH. Se empleó el ensayo CERT (Constant Extension Rate Test), a velocidades de 10^{-6} s^{-1} , complementándolo con ruido electroquímico, buscando identificar las condiciones de mayor susceptibilidad y el comportamiento de los materiales estudiados. El análisis fractográfico reveló fracturas tanto dúctiles como frágiles, pudiendo observarse agrietamientos intergranulares, característicos del mecanismo de disolución anódica del material. No obstante, el principal mecanismo por el cual se originaron los fallos fue fragilización por hidrógeno.

Palabras clave

Corrosión bajo tensión. Electroquímica. Aceros endurecibles por precipitación.

Stress corrosion cracking in 17-4PH and 17-7PH stainless steels in NaCl and NaOH (20 %) a 90 °C

Abstract

One of the problems that affects to the electric industry is the not programmed stoppages in the power plants, due to the failure of any main component: boiler, turbine and generator. In the turbine, the combined action of a corrosive agent (humid polluted vapor) and a mechanical effort, generally will result in Stress Corrosion Cracking (SCC). In this work the SCC susceptibility of the precipitation hardening stainless steels 17-4PH and 17-7PH, thoroughly used in steam turbine blades of power stations is analyzed. The specimens were tested in the presence of NaCl and NaOH(20 %) to 90 °C and different pH. The CERT test (Constant Extension Rate Test) was used, at 10^{-6} s^{-1} , supplementing it with electrochemical noise; the aim was to identify the conditions of maximum susceptibility and the performance of the studied materials. The fractographic analysis revealed ductile and brittle fracture. Intergranular crackings, characteristic of the anodic dissolution mechanism of the material was observed. Nevertheless, the main mechanism responsible the failure was hydrogen embrittlement.

Keywords

Stress corrosion cracking. Electrochemistry. Precipitation hardened steels.

1. INTRODUCCION

Uno de los problemas que más afecta a la industria eléctrica es el de los paros no programados en las plantas generadoras de electricidad, debidos al fallo de alguno de sus componentes principales: caldera, turbina o generador, entre otros. Específica-

mente hablando de la turbina, la acción combinada de un agente corrosivo (vapor húmedo contaminado) y un esfuerzo mecánico, generalmente producirá en el agrietamiento del material, el efecto llamado corrosión bajo tensión (sus siglas en inglés son SCC, Stress Corrosion Cracking). La corrosión bajo tensión ha sido experimentada en

(*) Trabajo recibido el día 18 de junio de 1999 y aceptado en su forma final el 27 de marzo de 2000.

(*) Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C. Miguel de Cervantes 120, Complejo Industrial Chihuahua. Chihuahua 31109, Chih. México

muchas unidades de turbinas de vapor, desde aquellas plantas con generadores de vapor tipo bidón operando a menos de 2000 psi (13,8 MPa) hasta las plantas con generadores de vapor supercríticos.

Se tienen datos que indican que los gastos ocasionados por reparaciones a este respecto, podrían alcanzar alrededor del medio millón de dólares diarios (tan solo en Norteamérica durante la década pasada), incrementándose la cifra dos y hasta cuatro veces más si se trataba del reemplazo de piezas o secciones completas. Lo más lamentable de todo es que muchos de estos paros forzados pueden ser catastróficos, originando también pérdidas humanas.

De 1954 a 1978, se informaron y documentaron 33 fallos en distintas unidades analizadas^[1] y en la mayoría de ellas se encontró que el mecanismo responsable del fenómeno de corrosión era una asociación de factores tales como: corrosión bajo tensión y corrosión por fatiga. En la mayoría de estos fallos se pudo apreciar un tipo de fractura frágil y agrietamientos transversales.

Los esfuerzos que causan la grieta pueden ser residuales (de procesos de fabricación como laminado, soldado, tratamiento térmico) o aplicados durante el servicio. El agente corrosivo puede ser relativamente suave y por lo tanto generará un ataque muy ligero cuando se produce la grieta. El grado de esfuerzos y la existencia de defectos jugarán un papel muy importante, así como el diseño de los equipos y los procedimientos de operación. El fallo ocurrirá como resultado de una impureza o algún procedimiento de operación irregular.

Un estudio realizado por Heymann^[2] reveló que algunos alabes de turbina, fallan prematuramente por agrietamiento asistido por el ambiente. Las grietas se han encontrado en los soportes, espigas, cubiertas y raíces de los alabes, en las turbinas de vapor de baja presión. Por su ubicación, el vapor se condensa en la llamada línea de Wilson y, es ahí, donde el ambiente se considera más agresivo^[3]. Las impurezas del vapor, como Na, Fe, Cu, Si, PO₄ y CO₃, se condensan en la línea de Wilson y pueden formar rápidamente soluciones acuosas concentradas. En los análisis de los depósitos de 14 turbinas de vapor, Heymann encontró que los alabes agrietados estuvieron expuestos a ambientes que contenían cloruro de sodio y, ocasionalmente, sulfato de sodio, fosfato de sodio y compuestos de hierro.

El vapor en una turbina puede contener impurezas provenientes del sistema de enfriamiento en el condensador o del deficiente desmineralizado desarrollado. En sí, la principal fuente de impure-

zas es la adición de productos químicos para el tratamiento del agua en la caldera. Cuando la concentración de esas impurezas excede su solubilidad en el vapor, se originan costras con un alto contenido de impurezas que empiezan a precipitar en la turbina. Eso crea un ambiente corrosivo (ácido, básico o neutral) que puede iniciar formas localizadas de corrosión como el picado y la corrosión bajo tensión, reduciendo la vida de la turbina.

Por lo general, los alabes de las turbinas de vapor se fabrican de aceros inoxidables martensíticos como los tipos 403, 410 y 422, así como de aceros endurecidos por precipitación, como el 17-4PH. En vista de esto, algunos trabajos incluyen en sus evaluaciones a estos materiales. En el ámbito internacional, se han modificado las tendencias en generación eléctrica y, actualmente, en muchos de los países industrializados, ésta se realiza en plantas nucleares y, aunque sigue presentándose este fenómeno corrosivo, los sistemas metal-medio han variado y, con ello, el rumbo de las investigaciones.

En países menos desarrollados, gran cantidad de la energía eléctrica se genera en centrales termoeléctricas (70 % en México) y sigue siendo punto de interés el desarrollo de investigaciones y la búsqueda de soluciones a este respecto^[4].

Para evitar los fallos en la turbina y sus consecuencias económicas en los procesos industriales es necesario conocer las posibles condiciones ambientales bajo las cuales puede ocurrir corrosión bajo tensión en una turbina. En este trabajo de investigación el objetivo central ha sido evaluar el comportamiento y la tendencia que tienen los aceros inoxidables endurecibles por precipitación a fallar por corrosión bajo tensión, en ambientes agresivos a los que regularmente se encuentran sometidos en servicio. Después de hacer una exhaustiva revisión bibliográfica se decidió evaluar dos medios típicos, frecuentemente encontrados como impurezas en este tipo de sistemas: cloruro e hidróxido de sodio, en concentraciones y a valores de pH señalados como potencialmente críticos en trabajos e informes previos.

Algunas de las técnicas más útiles empleadas en la investigación de este tipo de fallos lo constituyen las curvas de polarización potenciodinámica, los ensayos a velocidad de deformación constante y el ruido electroquímico; por lo que también fueron empleadas en el desarrollo de este trabajo. Estas técnicas electroquímicas permiten estudiar los mecanismos que rigen el proceso de corrosión en el material, en este caso sujeto a condiciones

ambientales agresivas, similares a las que se presentan en condiciones reales de operación; así como identificar aquellas en las que se observa susceptibilidad a la corrosión bajo tensión en estos sistemas.

2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

El material objeto de estudio son los aceros endurecibles por precipitación, 17-4 PH (15Cr-4Ni) y 17-7 PH (16Cr-7Ni), cuya composición se puede observar en la tabla I.

Las soluciones de ensayo fueron tres, un medio estándar o patrón y dos soluciones con determinada concentración del contaminante previsto (agua destilada, NaCl (20 %) y NaOH (20 %)). El pH de las soluciones se controló mediante adiciones de HCl y NaOH, cuando fue necesario. Tanto para el ensayo CERT como para las técnicas electroquímicas, las soluciones fueron previamente desaireadas con nitrógeno gaseoso de alta pureza por espacio de una hora, y posteriormente se elevó su temperatura hasta los 90 °C.

Para la evaluación de las propiedades mecánicas de los aceros empleados, mediante el desarrollo de ensayos de tensión, se empleó una máquina electromecánica para pruebas de tensión, con capacidad de 5 t. El equipo empleado en las técnicas electroquímicas es un potencióstato/galvanostato de alta impedancia, que permite aplicar la mayoría de estas técnicas. En los ensayos CERT se empleó la máquina con el mismo nombre, en la que se pueden realizar ensayos de deformación a velocidad de extensión constante, alcanzando hasta 4,536 kg de capacidad, y velocidades de desplazamiento entre mordazas, comprendidas entre 10^{-5} a 10^{-8} cm/s. Para su control cuenta con un sistema analógico que supervisa carga, alargamiento, velocidad y temperatura y controla estos parámetros, evitando extralimitaciones, por medio del uso de límites mínimos y máximos preestablecidos por el usuario. Se acondicionó una tarjeta de adquisición de datos y se diseñó un *software* que permite almacenar y analizar los mismos en un banco de datos.

El montaje experimental empleado incluyó: electrodo de referencia de calomelanos, electrodo auxiliar, termómetro, electrodo de trabajo (probeta metálica) y electrolito (medio de ensayo).

Las probetas para el ensayo CERT se mecanizaron de acuerdo con el esquema de la figura 1, cumpliendo lo establecido por la norma NACE TM-177-90. Posteriormente al mecanizado, las muestras fueron tratadas térmicamente de acuerdo a lo que se presenta en la tabla II.

La velocidad de deformación empleada fue de $1,3 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$, para tener mejor punto de comparación con lo establecido hasta ahora en la literatura. La precarga inicial fue de 45 kg, realizando tres ensayos por acero en cada medio, para lograr así una buena reproducibilidad de los resultados.

Tras la rotura, se realizaron mediciones del porcentaje de reducción de área (% RA) y relación de tiempo de fallo, ambos comparando el medio de prueba con respecto al medio inerte o patrón. Con esta información se hizo un análisis, empleando el diagrama de flujo de McIntyre^[5] (ver figura 2). Como datos complementarios se pueden establecer el tipo y proporción de fractura (dúctil-frágil) para lo cual se observaron las probetas fracturadas en el Microscopio Electrónico de Barrido.

Las cinco categorías especificadas por McIntyre se pueden interpretar como sigue:

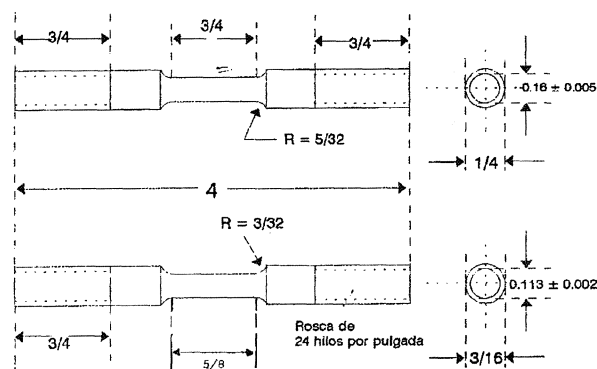


Figura 1. Esquema mostrando las probetas empleadas en los ensayos CERT.

Figure 1. Scheme of the specimens used in CERT tests.

Tabla I. Composición química de los aceros estudiados, % en peso

Table I. Chemical composition of studied steels, weight percent

Acero	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Al	Mo	Cu	Ta	Fe
17-4PH	0,006	0,42	0,02	0,027	0,23	15,37	4,75	-	0,23	3,29	0,27	Balance
17-7PH	0,064	0,80	0,023	0,001	0,33	16,39	7,21	0,875	0,40	0,36	-	Balance

Tabla II. Tratamientos térmicos realizados a las probetas en estudio

Table II. Heat treatments applied to specimens in study

Acero	Tratamiento térmico
17-4PH	Homogeneización y envejecido a 620 °C por 4 h
17-7PH	Homogeneización y envejecido a 620 °C por 4 h

- *I. Inmune:* Materiales candidatos en esta categoría no muestran evidencia de crecimiento de grietas inducidas por el ambiente en el examen al microscopio. La relación de reducción de área es igual o mayor que 0,9.
- *II. Prácticamente Inmune:* No hay evidencia de crecimiento de agrietamiento ambiental en el examen microscópico. En materiales que son prácticamente inmunes la relación de reducción de área está entre un 0,65 y 0,9.
- *III. Medianamente susceptible:* Los materiales muestran crecimiento secundario de grietas poco profundas, solamente en la región de la sección del cuerpo. La relación de reducción de área va desde 0,75 a 0,95.
- *IV. Susceptibilidad moderada:* Fracturas frágiles inducidas por el medio agresivo aparecen en la superficie final. Grietas secundarias en la sección reducida y en la región del cuello. La relación de reducción de área está entre 0,5 y 0,75.
- *V. Susceptible:* Fracturas frágiles inducidas por el medio ambiente, predominantes en la superficie final de la fractura en los materiales. Grietas secundarias extensivas aparecen sobre el cuello, pueden extenderse hacia abajo dentro de los bordes. El cuello es altamente limitado o eliminado. La relación de reducción de área es inferior a 0,5.

El % RA se calculó promediando tres mediciones del diámetro de la probeta (con un Vernier digital de precisión) en la zona del cuello (previo y posterior a la rotura), para posteriormente aplicar la relación:

$$\% RA = \left(\frac{\phi_i \phi_f}{\phi_i} \right) \cdot 100 \quad (1)$$

Las técnicas electroquímicas utilizadas, medición de potenciales de corrosión y ruido electroquímico, permitieron obtener información, tanto termodinámica como cinética, acerca del proceso de corrosión que pudiera desarrollarse en los sistemas bajo estudio.

Además, se aplicó la técnica de ruido electroquímico, realizando la lectura de 2.048 datos a intervalos de 1 s, en los distintos medios de ensayo y en el potencial libre de corrosión. Se complementó con un control continuo, a intervalos de 1 s, de las muestras ensayadas en la máquina CERT, con la finalidad de identificar el inicio, desarrollo y propagación de las grietas. Estas últimas mediciones se realizaron en tres puntos del ensayo: al inicio (región de deformación elástica), en la región media (cerca del punto de cedencia) y al final (cerca de la ocurrencia del fallo).

El análisis de los datos de ruido se realizó eliminando la tendencia a todas las series de tiempo, con la finalidad de facilitar la observación y análisis de los transitorios y evitando el enmascaramiento de la señal de ruido.

3. RESULTADOS

3.1. Ensayos de Tensión

En la tabla III se muestra un compendio de las propiedades mecánicas nominales de estos aceros, y de los resultados obtenidos en los ensayos de tensión efectuados.

Se puede observar que hay un notable incremento en la resistencia mecánica en forma global, y se puede identificar al acero 17-7PH como el más resistente.

Todas las fracturas de los ensayos de tensión fueron dúctiles, del tipo copa-cono, y por un mecanismo de coalescencia de microcavidades. Este tipo de fractura suele aparecer generalmente bajo condiciones de sobrecarga. Estas microcavidades nuclean en regiones de deformación localizada discontinua, asociada por lo general a la presencia de segundas fases, inclusiones, límites de grano y apilamiento de dislocaciones. Conforme aumenta la

Tabla III. Propiedades mecánicas típicas (condición de recocido), y experimentales de los aceros empleados

Table III. Typical (annealing condition), and experimental mechanical properties of used steels

Parámetros	Aceros			
	Teórico		Experimental	
	17-4PH	17-7PH	17-4PH	17-7PH
Esfuerzo máx (MPa)	854	754	926	1.269
Esfuerzo cedencia (MPa)	637	363	734	948

deformación en el material, las microcavidades crecen, coalescen y eventualmente forman superficies de fractura continuas^[6].

3.2. Ensayos CERT y Ruido electroquímico

En las figuras que se encuentran a continuación, se presentan las curvas esfuerzo-deformación obtenidas para las diferentes muestras ensayadas en la prueba CERT, así como las series de tiempo obtenidas durante la realización de los mismos. Se presentan tres series de tiempo por cada ensayo, correspondientes a tres puntos: deformación elástica, en torno al esfuerzo de cedencia y cerca de la ruptura o fallo de la probeta. Con esto se trata de encontrar alguna correspondencia entre la información electroquímica proporcionada por la técnica de ruido, y el comportamiento físico-mecánico del material.

Analizando las gráficas de la figura 3, correspondiente al acero 17-4PH, se puede apreciar que en cuanto a resistencia hubo una respuesta más o menos similar en todos los sistemas y, aunque aparentemente hay una marcada diferencia en su ductilidad, en realidad las reducciones de área son muy cercanas (de 18 a 22 % E y de 35 a 39 % RA). Los UTS se encuentran en el intervalo de 647 a 745 MPa.

En el acero 17-4PH en agua y cloruro de sodio se obtuvieron fracturas dúctiles en copa-cono por coalescencia de microcavidades, pero en el cloruro de sodio a pH=3, aunque también se obtuvieron fracturas copa-cono y en estrella, se notan inicios de agrietamiento y corrosión intergranular, así

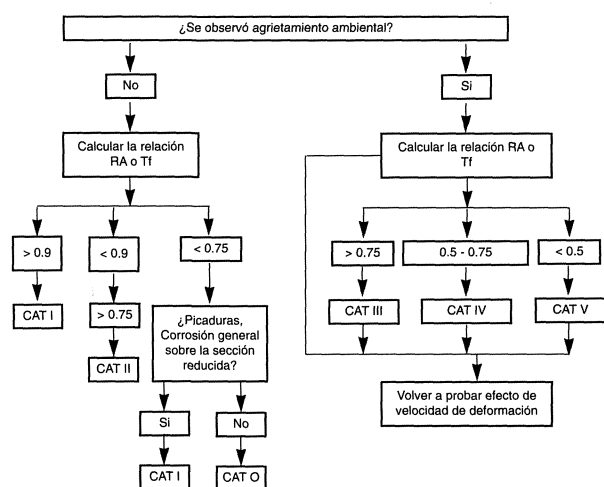


Figura 2. Diagrama de flujo de McIntyre.

Figure 2. McIntyre's flow diagram.

Rev. Metal. Madrid 36 (2000)

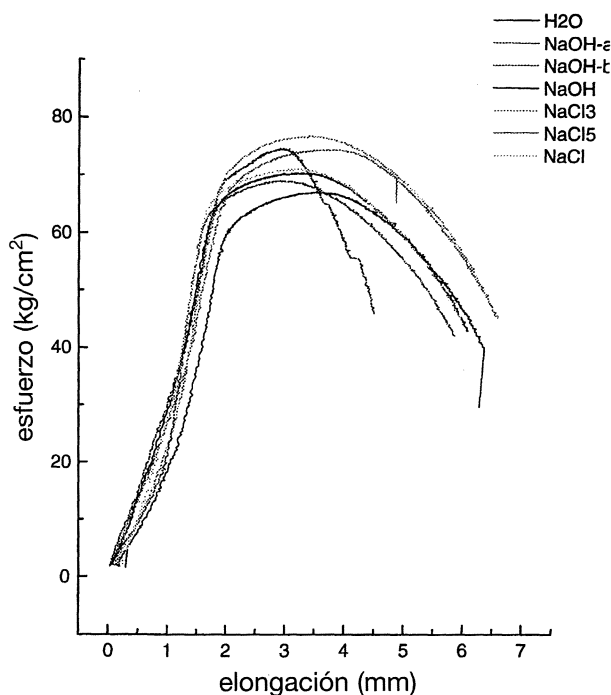


Figura 3. Curvas CERT, esfuerzo-alargamiento obtenidas para el acero 17-4PH.

Figure 3. Stress-elongation CERT plots obtained for the 17-4PH steel.

como agrietamientos secundarios en la sección del cuello. Los transitorios que se describen en las series de tiempo de este sistema, son catódicos de alta frecuencia y de mayor intensidad a partir del esfuerzo de cedencia e inicio de la deformación plástica del material. En el registro de tiempo inicial aparecen algunas fluctuaciones anódicas de muy baja amplitud a la vez que el potencial se incrementa moviéndose en dirección anódica (ver figuras 4 y 5).

Al someter este material a todas las soluciones de hidróxido de sodio se observó también la rotura copa-cono por coalescencia de microcavidades. Los transitorios de la serie de tiempo respectiva son indicativos de un proceso de disolución del material desde el principio del ensayo, aumentando principalmente en amplitud. Los transitorios de las series de tiempo respectivas son tanto anódicos como catódicos, al principio de muy baja intensidad, aumentando tanto en amplitud como en frecuencia al transcurrir el ensayo e irse deformando plásticamente.

Las curvas esfuerzo-alargamiento de las probetas de acero 17-7PH se diferenciaron agrupándose en tres comportamientos (ver figura 6). Los sistemas más resistentes alcanzaron aproximadamente 862 MPa, pero también registraron los menores alargamientos (agua y cloruro de sodio a pH natural).

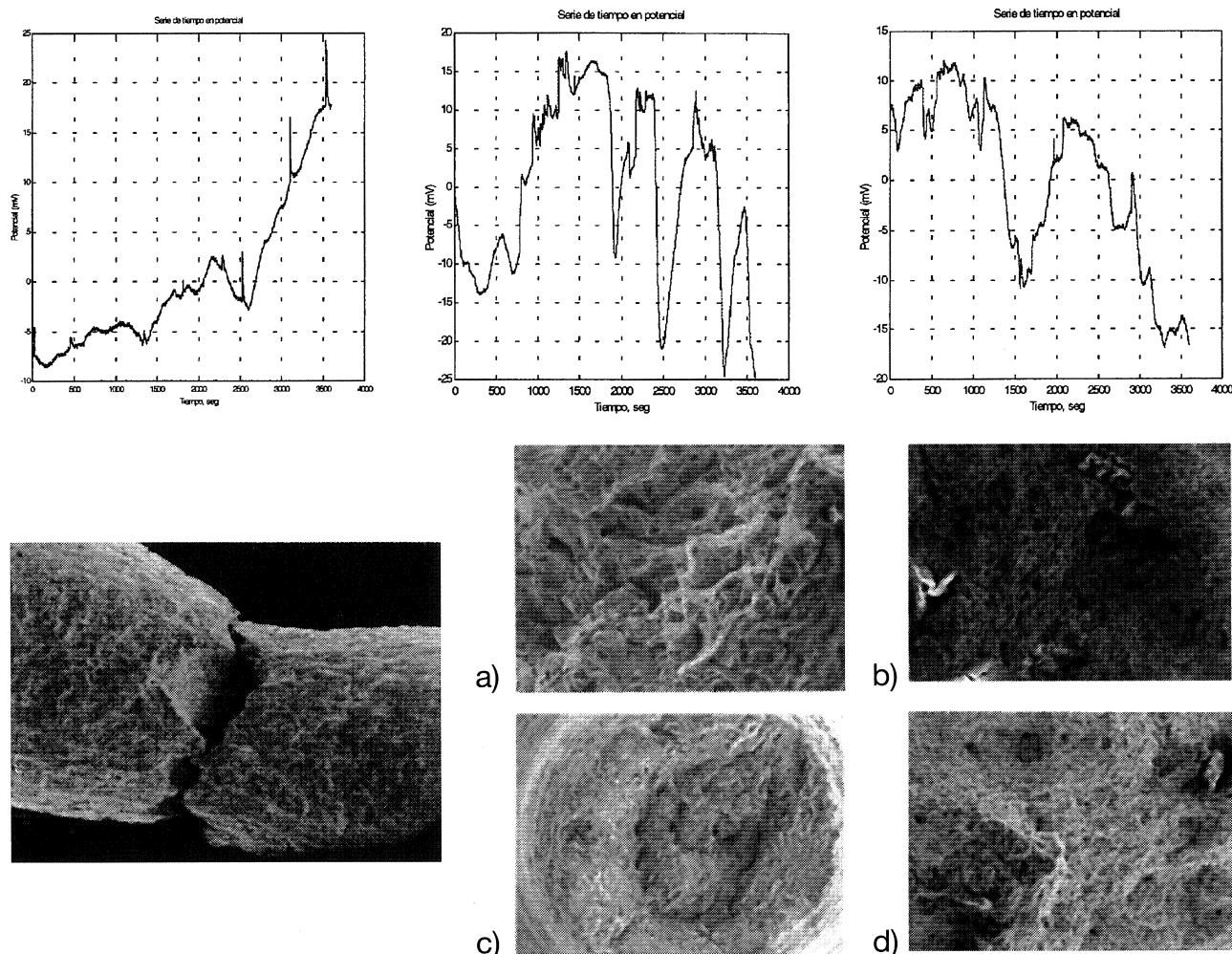


Figura 4. Gráficas de ruido en tres etapas del ensayo CERT; zona de falla (20X) y superficies de fractura de la probeta de acero 17-4PH evaluada en NaCl (20 %), pH=3, 90 °C. Sección larga: a) 33X, b) 300X; Sección corta: c) 33X, d) 300X.

Figure 4. Noise plots in three states of CERT test; failure zone (20X) and fracture surfaces of 17-4PH specimen evaluated in NaCl (20%), pH=3, 90 °C. Large section: a) 33X, b) 300X; Short section: c) 33X, d) 300X.

En el segundo grupo están las muestras evaluadas en cloruro de sodio a pH 5 y en hidróxido de sodio, donde la resistencia, siendo más bien baja, coincide con las halladas para el tercer grupo, pero su alargamiento es similar al del grupo anterior.

Analizando el desempeño de este acero se observa que, prácticamente todas las roturas se dieron en copa-cono por coalescencia de microcavidades. Sin embargo, hay que resaltar dos situaciones: tanto en NaCl a pH neutro y 3 como en NaOH a pH neutro, se observaron agrietamientos y cavidades a 300 y 400x, mientras que la rotura en cloruro de sodio a pH=5 se dio a 45° de la aplicación de la carga, siendo también fractura dúctil.

La figura 7 corresponde a la evaluación del acero 17-7PH en cloruro de sodio a pH natural, a 90 °C. Como puede observarse, se trata de una fractura copa-cono desarrollada por un mecanismo de coalescencia de microcavidades, que muestra

transitorios catódicos de alta frecuencia, principalmente.

De acuerdo con estos resultados, el acero que más resistencia mostró ante estos medios de ensayo fue el 17-4PH, con el 25% de pérdida en lo que se refiere a resistencia mecánica a la tensión.

En la tabla IV se recogen los resultados obtenidos de estos ensayos, donde I es el índice de susceptibilidad, calculado con las expresiones:

$$I_{RA} = \% RA_m / \% RA_i \quad (1)$$

$$I_{Em} = Em_{\max m} / Em_{\max i} \quad (2)$$

$$I_{Tf} = Tf_m / Tf_i \quad (3)$$

subíndices:

m = medio de prueba

I = medio patrón o inerte

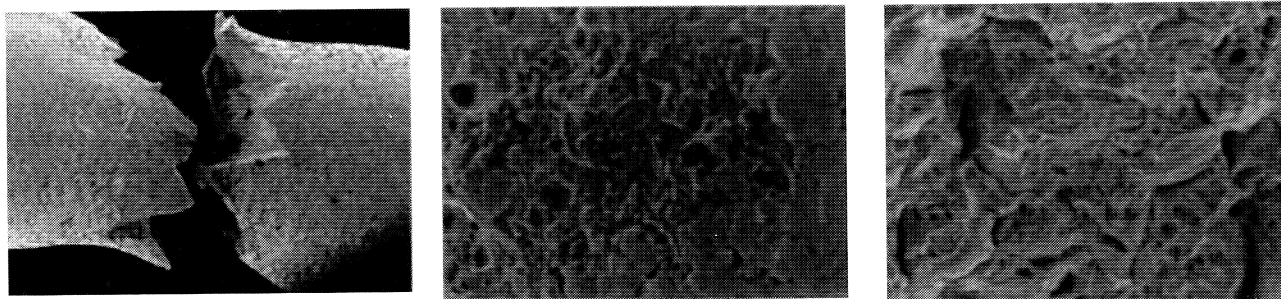


Figura 5. Zona de falla (20X) y superficies de fractura de otra muestra de acero 17-4PH evaluada en NaCl (20 %), pH=3, a 90°C. 33 y 40X respectivamente.

Figure 5. Failure zone (20X) and fracture surfaces of another 17-4PH specimen evaluated in NaCl (20 %), pH=3, 90 °C. 33 and 40X respectively

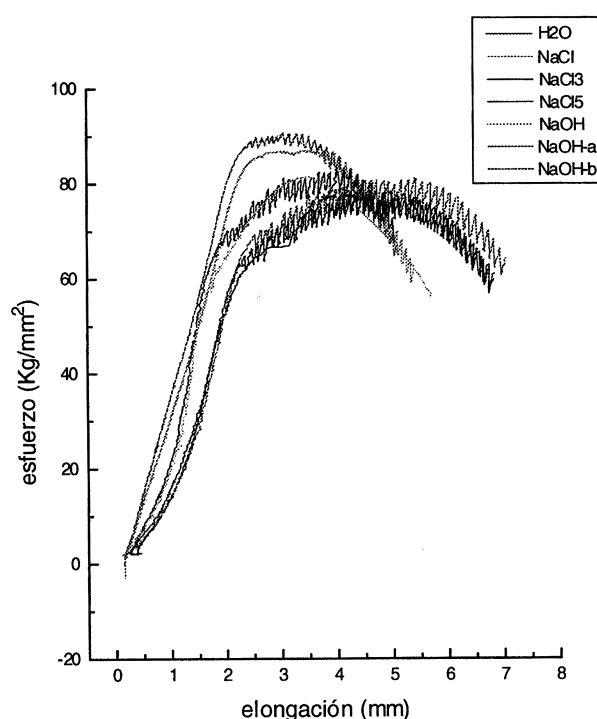


Figura 6. Curvas CERT, esfuerzo-alargamiento obtenidas para el acero 17-7PH.

Figure 6. Stress-elongation CERT plots obtained for 17-7PH steel.

La categoría se determinó de acuerdo con la clasificación de McIntyre, e I_s se refiere al valor promedio de los tres índices calculados.

O sea, en este trabajo se determinaron los índices de susceptibilidad en función de la reducción de área, del tiempo de fallo y del alargamiento máximo para, con dichos datos, calcular a su vez, un índice de susceptibilidad promedio (I_s). No obstante, la determinación de categorías de acuerdo con el diagrama y la clasificación de McIntyre, se hace en función del radio de reducción, es decir, de la reducción de área.

Se han obtenido los tres índices con fines comparativos, pero también para tratar de contar con un mayor número de parámetros que pudieran facilitar y a su vez aportar precisión a la evaluación, puesto que en realidad se puede encontrar cierta ambigüedad en el método de McIntyre. La evaluación de una muestra puede variar entre las categorías I y III, tan solo dependiendo de si se presenta o no, agrietamiento, no importando que su I_{RA} sea de 0,75 o superior a 0,9. Más aún, una pieza puede clasificarse entre las categorías I, II, III y IV dependiendo más del desarrollo de agrietamientos y del tipo de los mismos que del índice, el cual pudiera estar entre 0,65 y 0,9 sin, con ello, redituarse en diferencia alguna en la asignación de categorías.

Analizando el caso de la muestra de acero 17-4PH, evaluada en NaCl a pH=3, que aparentemente correspondería a una categoría II o, si acaso III, la razón para haberle asignado una categoría IV, siendo sus índices de $I_{RA} = 0,75$, $I_{TF} = 0,81$, $I_{Em} = 0,84$ e $I_s = 0,80$ es, que en la misma se observaron grietas secundarias, tanto en la región del cuello como en la sección reducida. Por ello, considerando este último dato y el que su I_{RA} es de 0,75, se le asignó dicha categoría IV, aseverando con ello que los demás índices no reflejaron el comportamiento exacto de la muestra.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- El ruido electroquímico puede emplearse para detectar los procesos de nucleación y propagación de grieta en los procesos de corrosión bajo tensión de los aceros inoxidable, operando bajo condiciones ambientales similares a las que rigen dentro de una turbina de vapor. Las fluctuaciones de magnitud elevada en las series de tiempo pueden asociarse a eventos importantes de rotura localizada de la película pasiva. Pero,

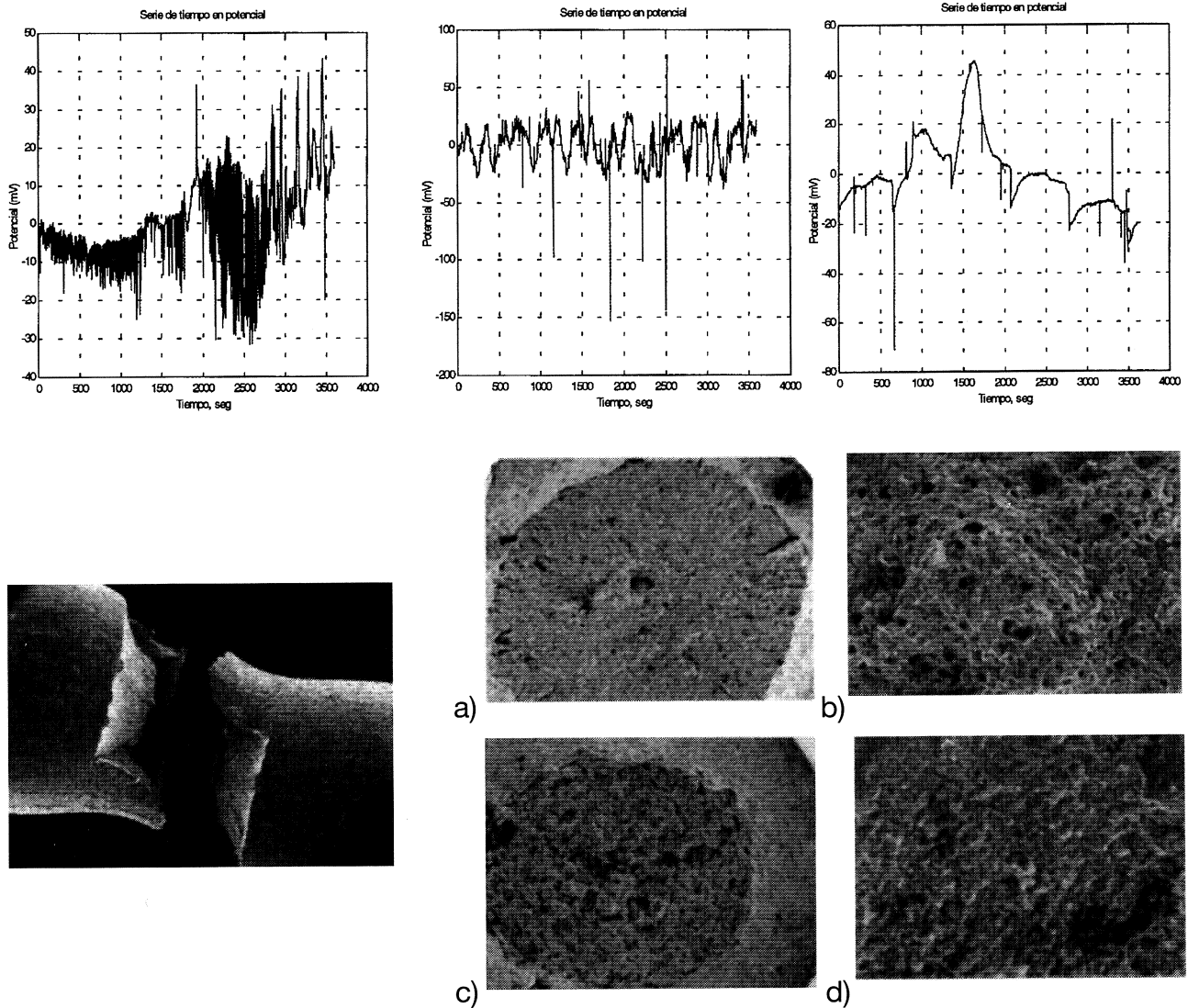


Figura 7. Gráficas de ruido en tres etapas del ensayo CERT; zona de falla (20X) y superficies de fractura de la probeta de acero 17-7PH evaluado en NaCl [20%] a 90 °C. Sección larga: a) 35X, b) 300X; Sección corta: c) 33X, d) 400X.

Figure 7. Noise plots in three states of CERT test; failure zone (20X) and fracture surfaces of 17-7PH specimen evaluated in NaCl [20%] to 90 °C. Large section: a) 35X, b) 300X; Short section: c) 33X, d) 400X.

coincidiendo con las observaciones realizadas por otros autores, se encontró que las fluctuaciones de potencial de un material con susceptibilidad a la corrosión bajo tensión, son anódicas y reflejan un incremento en intensidad y frecuencia posterior a la carga máxima. Cerca de la rotura final, las fluctuaciones tienen menor intensidad pero mayor frecuencia. Este fenómeno de incremento en la actividad electroquímica, muy posiblemente puede deberse a que la película de óxido pasivante sobre la superficie de la muestra empieza a romperse en torno al inicio de la deformación plástica del material. Algo similar ocurre cuando se presenta un fuerte transitorio en el momento de la fractura, puesto que

hay contacto directo instantáneo entre el electrolito y la superficie metálica nueva.

- La mejor forma para predecir la iniciación y propagación de grietas por corrosión bajo tensión es analizar las series de tiempo, puesto que el análisis espectral hasta ahora no se puede considerar como una herramienta suficientemente poderosa. Existen aún muchos parámetros que afectan las señales obtenidas y no han sido suficientemente discernidas las formas de control adecuadas.
- El fenómeno de picadura juega un importante papel en el deterioro de la ductilidad de los aceros inoxidables. Tal descenso puede atribuirse a una reducción en la relación de

Tabla IV. Resultados obtenidos de los ensayos CERT. % RA=porcentaje de reducción de área, Tf=Tiempo de rotura, $E_{m\acute{a}x}$ =alargamiento máximo, I_s =Índice de susceptibilidad correspondiente

Table IV. Obtained results of CERT tests. % RA=Surface area reduction percent, Tf=Failure time, $E_{m\acute{a}x}$ =Maximum elongation, I_s =Corresponding susceptibility index

Material	Medio	pH	%RA	I_{RA}	Tf	I_{Tf}	$E_{m\acute{a}x}$	% E	I_{Em}	Fractura	I_s	Categoría
17-4PH	agua		45,58	–	51.786	–	6,575	0,26	–	copa-cono	–	–
	NaCl		41,22	0,90	47.460	0,91	6,045	0,24	0,91	copa-cono parcial	0,90	I
	NaCl	3	35,01	0,75	42.320	0,81	5,570	0,22	0,84	copa-cono	0,80	IV
	NaCl	5	36,88	0,80	46.800	0,90	6,225	0,24	0,94	copa-cono parcial	0,88	I
	NaOH		39,47	0,86	47.340	0,91	6,103	0,24	0,92	copa-cono	0,89	II
	NaOH	3	39,04	0,85	46.080	0,88	4,506	0,18	0,68	copa-cono parcial	0,80	II
	NaOH	5	41,60	0,91	49.920	0,96	6,51	0,26	0,99	copa-cono parcial	0,95	I
17-7PH	agua		34,63	–	51.600	–	5,49	0,21	–	copa-cono	–	–
	NaCl		31,87	0,92	39.375	0,76	5,32	0,21	0,96	copa-cono parcial	0,88	I
	NaCl	3	29,90	0,86	51.300	0,99	7,015	0,28	1,3	copa-cono	1,05	I
	NaCl	5	18,11	0,52	40.200	0,77	5,353	0,21	0,97	45°	0,75	II
	NaOH		30,90	0,89	44.700	0,86	5,465	0,21	0,99	copa-cono parcial	0,91	I
	NaOH	3	29,00	0,83	52.800	1,02	6,898	0,27	1,25	copa-cono	0,96	II
	NaOH	5	27,52	0,79	51.240	0,99	6,995	0,27	1,27	copa-cono parcial	1,01	II

carga de la sección transversal del material, debido precisamente a la formación de picaduras.

- Por lo que respecta a la corrosión bajo tensión, el acero que resultó más susceptible fue el 17-4PH en NaCl pH=3, a 90 °C. En contraste, el acero 17-7PH podría ser un buen candidato a emplear bajo estas condiciones de servicio, pues su comportamiento fue globalmente adecuado, su categoría de susceptibilidad correspondió a un acero prácticamente inmune (quedando sujeto a la continuación de investigaciones sobre el tema). Las condiciones más críticas para corrosión bajo tensión se dieron a pH 3 y 5, donde por lo regular se obtuvieron las mermas más considerables.
- Las fractografías constituyen una parte medular en el diagnóstico de las evaluaciones, pues la clasificación de McIntyre depende en gran medida de la inspección visual. Una rotura puede cambiar drásticamente de categoría, tan solo dependiendo de este parámetro, en un amplio intervalo de valores de la relación de ductilidad.

Agradecimientos

Deseamos expresar nuestro agradecimiento al Conacyt por el apoyo brindado para la elaboración de esta investigación a través del Proyecto 25568-A.

Referencias

- [1] R. VISWANATHAN and R.I. JAFFEE, *ASME J. Eng. Gas Turbines and Power* 107 (1985) 642–651.
- [2] F.J. HEYMANN, V.P. SWAMINATHAN and J.W. CUNNINGHAM. *Steam turbine blades: considerations in design and a survey of blade failures*. EPRI report No. CS/1967, California, USA, 1981.
- [3] W.T. LINDSAY, *Power Eng.*, Mayo (1979) 68-72.
- [4] S.R. FUENTES, *Boletín IIE* 8 (1984) 160–171.
- [5] D.R. MCINTYRE, R.D. KANE and S.M. WILHELM, *Corrosion*, 44 (1988) 920-926.
- [6] V. KERLINS, *Metals Handbook Fractography*, vol 12, 9th ed., Ed. ASM, Ohio, EE.UU., 1997, pp. 12-71.