

CARACTERIZACIÓN DEL ACERO 12CR1MOV(12X1MΦ)

Alexis Mora Sarmiento, Eduardo Franco Fidalgo, Frank De Los Reyes Rodríguez

Universidad de Oriente

Los efectos del tiempo y la temperatura en aceros resistentes a altas temperaturas, son considerables cuando el tiempo de explotación es excesivo. En este acero de las Líneas Principales de Vapor (LPV) ocurren cambios microestructurales que repercuten en las propiedades mecánicas, y como es lógico, en sus características a la rotura. En este trabajo se determinan las propiedades mecánicas necesarias para caracterizar el material; se analiza la superficie de fractura, determinándose las características de la rotura, además de caracterizar los carburos y la precipitación de fósforo por el límite de grano y carburos.

Palabras clave: aceros de líneas de vapor.

The effects of the time and the temperature in resistant steels to high temperatures, they are considerable when the time of exploitation is excessive, in this steel of the Main Lines of Steam changes micro-structure that rebound in the mechanical properties happen and like it is logical in their characteristics to the rupture. In this work the necessary mechanical properties are determined to characterize the material, the fracture surface is analyzed being determined the characteristics of the rupture, besides characterizing the carbides and the match precipitation for the grain limit and carbides.

Key words: steels of lines of steam.

Introducción

La Unión Nacional Eléctrica (UNE) del MINBAS cuenta con una red nacional de generación y distribución de electricidad a lo largo de todo el país. Entre las unidades de generación más comunes se encuentran las de 100 Mw de origen soviético, instaladas en las Centrales Termoeléctrica (CTE) de Renté, en Santiago de Cuba, con cuatro unidades, en la CTE Mariel, en La Habana, con cuatro unidades, y en la CTE de Santa Cruz del Norte con tres de estas unidades, para un total de once unidades de 100 Mw /1/.

En cada una de estas unidades existe una Línea Principal de Vapor (LPV), que consta de tres componentes fundamentales, tramos rectos, codos y uniones soldadas, los dos primeros fabricados del acero 12Cr1MoV (12X1MØ), que transporta el vapor sobrecalentado que sale de la caldera hasta la entrada de la turbina. En condiciones normales de explotación, este vapor se transporta a una temperatura del orden de los 545 °C y una presión del orden de las 150 atm.

Existen normas de explotación elaboradas por el fabricante y asimiladas por la UNE que establecen

parámetros permisibles de trabajo a medidas que va aumentando el tiempo de explotación /2,3/. Dicha normas se explotaron en la década del 70, del pasado siglo, cuando comenzaron a instalar estas unidades en el país.

Entre las prescripciones relacionadas con las LPV se encuentra la de prohibir su explotación cuando en la misma se detectan grietas o microgrietas /2/. Como se conoce, prescripciones similares han existido mundialmente para la explotación de centrales nucleares /4,5/, tanques de la industria química, componentes estructurales y de otros tipos en la aeronáutica y otras ramas del transporte, etcétera. Sin embargo, a principios de la década de los años 60, surgió una nueva tendencia científica, conocida como la mecánica de la fractura, con la cual es posible calcular los tamaños críticos de los defectos que pudieran causar la falla catastrófica de los componentes, en dependencia de las propiedades del material, las condiciones de carga y los mecanismos de falla /6/. Es también conocido el desarrollo científico-técnico que se ha experimentado en relación con el hecho de que los materiales en explotación envejecen (se degradan), principal-

mente cuando trabajan a elevadas temperaturas, disminuyendo su capacidad para soportar las condiciones de explotación.

Todo ello ha permitido desarrollar Sistemas de Integridad Estructural (SIE), que pronostican el tiempo de vida útil, y autorizan la explotación con grietas en las vasijas de los reactores nucleares, el fuselaje de los aviones, los cigüeñales de los buques, los tanques de sustancia tóxica de la industria química o en las estructuras de los grandes puentes, por sólo citar algunos ejemplos.

Para poder aplicar los conceptos de la mecánica de fractura en estas LPV, es necesario realizar una caracterización de las propiedades del material, así como de la predominancia del tipo de fractura en este material.

Este trabajo es el resultado de una investigación en el marco de un proyecto con la UNE, desarrollado por el autor principal como parte de su trabajo de doctorado.

Materiales y procedimiento experimental

El acero 12Cr1MoV(12X1MØ) se emplea, fundamentalmente, para la fabricación de tuberías para la conducción de vapor, piezas de sujeción, recalentadores y otras sometidas a cargas mecánicas de larga duración a temperaturas moderadamente altas (no mayores de 600 °C) /7/. Se encuentra dentro del grupo de los aceros de clase ferrito perlítica, para los cuales es común el tener como fase matriz ferrita, y como fase en exceso, carburos de diversas estructuras y composición.

Como resultado de estas condiciones de trabajo, en estos materiales es común que ocurran procesos de fluencia térmica /7/, variación de la microestructura y propiedades mecánicas (producto del fenómeno de envejecimiento del material). Los experimentos necesarios para realizar la caracterización para aplicar la mecánica de Fractura son:

- Propiedades a tracción del material a temperatura ambiente y a la temperatura de trabajo del material 545 °C.
- Resiliencia para radio nulo (pregrieta) o trabajo de propagación de la grieta a temperatura ambiente y a 545 °C.
- Análisis de superficie de fractura para determinar por ciento de fibra, y así caracterizar el tipo de rotura que presenta el material de las LPV.

- Tenacidad de fractura, tanto para el material en estado predominantemente frágil (K_{IC}) como predominantemente dúctil (J_{IC}) a temperatura ambiente y a 545 °C.

Para realizar cada uno de estos experimentos, se elaboró el diseño de experimento, logrando obtener el número de iteraciones estadísticamente confiable. En todas las probetas construidas se partió de la geometría de la tubería, en el caso de las probetas de resiliencia, tenacidad de fractura y velocidad de propagación de la grieta, se realizó el preagrietamiento en la máquina de fatiga por impacto (figura 1).

Se obtiene pregrietas sin deformaciones plásticas apreciables, es decir, por deformación plana, según se indica en la norma E 1457 (figura 2).

Ensayo a tracción

Las dimensiones y la forma de las probetas están normalizadas según ASTM E139 y E111 (GOST 1497-73) /4/; se encontró con la colaboración de los laboratorios del Instituto Técnico Militar "José Martí", que tienen este tipo de instalación experimental de nacionalidad alemana en excelentes condiciones técnicas.



Fig. 1 Instalación donde se realizó el preagrietamiento a las probetas compactas.



Fig. 2 Imagen de probeta preagrietada del material nuevo a temperatura ambiente.

Tabla 1
Conclusiones del ensayo a tracción. (Autor)

Material	$R_{U}(Mpa)$	$R_{02}(Mpa)$	$E(Mpa)$	$\Psi\%$	$\sqrt{\%}$
Nuevo					
$T_{ambiente}$	660-670	380-395	235 600 – 270 000	30 - 40	9 - 9,9
545 °C	298-316	190-209	220 100 – 264 392	73 - 80	31 - 38

Determinación de la carga de trabajo máxima en la LPV

Resultado aplicando el COSMOS

Para determinar la tensión máxima de trabajo, así como los tramos más peligrosos, se utiliza el COSMOS, donde se introduce el dibujo de la LPV completa con toda la soportaría, utilizando los datos reales (archivos Renté) y los resultados experimentales a tracción.

Las LPV son montadas en el país en la década de los 70, con tubos de dimensiones típicas de (273*32 mm), de acero 12X1MØ, suministrado según TY14 – 3 – 460 – 74; incluye siete codos y 29 uniones soldadas, aunque en este trabajo no se analizarán las uniones soldadas.

El análisis de la distribución de tensiones del primer codo arrojó que la mayor tensión se encuentra en el nodo 53720, con una tensión de $6,6 \cdot 10^7 N/m^2$.

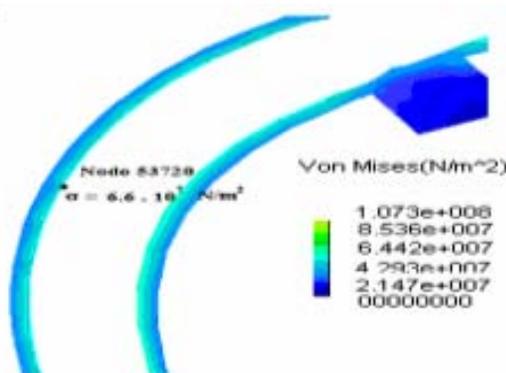


Fig. 3 Distribución de las tensiones mecánicas en el primer codo en la LPV. (Autor)

El elemento de mayor incidencia tensional y de mayor interés en este trabajo es el codo número cinco, donde actúa la mayor tensión y donde se reflejan las mayores apariciones de grietas durante la práctica, enmarcado en el nodo 212 con una tensión de $7,15 \cdot 10^7 N/m^2$. Según la distribución de las temperaturas en este elemento se puede apreciar, que es mayor en el interior de la línea con valor de 545 °C, y en el exterior con valor de 497 °C.

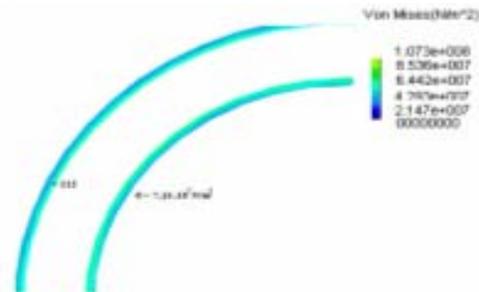


Fig. 4 Distribución de las tensiones mecánicas en el quinto codo en la LPV. (Autor).

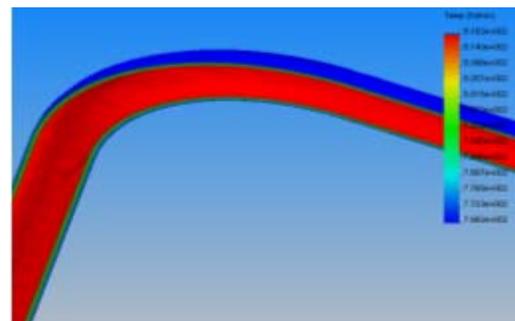


Fig. 5 Distribución de la temperatura en el quinto codo de la LPV. (Autor).

Se realizó el cálculo de las tensiones combinadas, arrojando el valor $R = 7,42 \cdot 10^7 N/m^2 = 74,2$ MPa, como tensión máxima en el nodo 212.

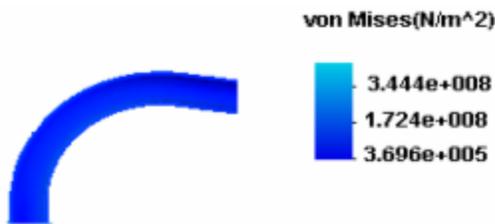


Fig. 6 Distribución de cargas combinadas (Térmicas y mecánicas). (Autor)

Resiliencia

Para establecer el grado de seguridad de un material, hay que determinar la resistencia a la rotura. Para lograr este objetivo, existe un método muy utilizado en la actualidad mediante el golpeo

de la probeta entallada, utilizando una instalación (Charpy) capaz de registrar la energía gastada en romper la probeta normalizada según ASTM E23(GOST 9454-60) para un área de la sección de rotura de $F_p=0,8 \text{ cm}^2$ donde se puede obtener el trabajo específico de rotura o la resiliencia a_k .

En los laboratorios de Resistencia de Materiales de la Facultad de Mecánica de la Universidad de Oriente, existe este tipo de instalación en excelentes condiciones.

Este ensayo debe realizarse para radios de entalla diferentes ($r= 1, r= 0,25, r= 0$), para radio nulo o con pregrieta; se debe realizar por método analítico (extrapolación) y experimentalmente.

Tabla 2
Conclusión del ensayo de resiliencia para radio nulo.(Autor)

Material 12Cr1MoV	$a_D(\text{J/cm}^2)$, temperatura ambiente	$a_D(\text{J/cm}^2)$, 545 °C
nuevo	44-47	58-63
138 000 h	23-26	47-49

Tabla 3
Datos recopilados de los archivos de las CTE de Cuba

Material	$a_D(\text{J/cm}^2)$, temperatura ambiente	$a_D(\text{J/cm}^2)$, 545 °C
12Cr1MoV, 48 000 h/trabajo	40	61
12Cr1MoV, 98 000 h/trabajo	30	55
12Cr1MoV, 150 000 /trabajo	22	43

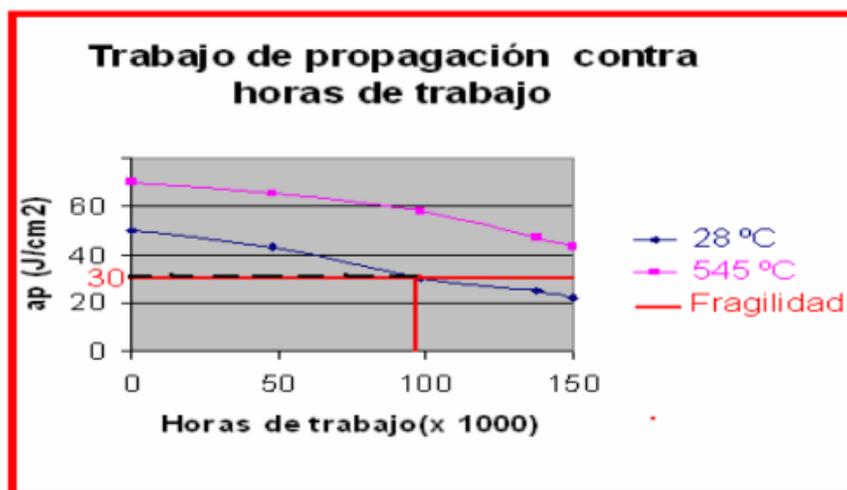


Fig. 7 Relación entre trabajo de propagación y las horas de trabajo. (Autor)

Tenacidad de fractura

La tenacidad de los materiales viene dada por la resistencia a la extensión de la fisura, lo cual implica el crecimiento y la unión de cavidades nucleadas por descohesión o fisuración de partículas de una segunda fase.

Los parámetros metalúrgicos que controlan la tenacidad están relacionados con la distribución de las partículas que se fisuran, la resistencia al

clivaje y de las intercaras a la descohesión, los procesos de localización de la deformación que aceleran la unión de las cavidades y el tamaño del grano cuando la coalescencia hace intervenir a los bordes de granos /8/.

La metodología que se utiliza fue confeccionada por J. R. Donoso y J. D. Landes /8/, llamada: *Metodología general para la construcción de la curva J-R*, basada en el formato común y conciso.

Tabla 4
Valores de JIC de los materiales ensayados. (Autor)

Material (12X1M0)	J _{IC} (N/mm)
Nuevo ensayado a 545 °C	300
Nuevo ensayado a temperatura ambiente (28 °C)	225
Envejecido ensayado a 545 °C	230
Envejecido ensayado a temperatura ambiente (28 °C)	48

Análisis de las características de la superficie de fractura de las probetas en el microscopio electrónico de barrido

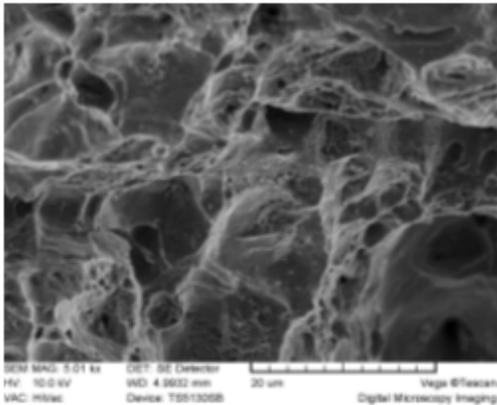


Fig. 8 Material nuevo ensayado a temperatura ambiente.

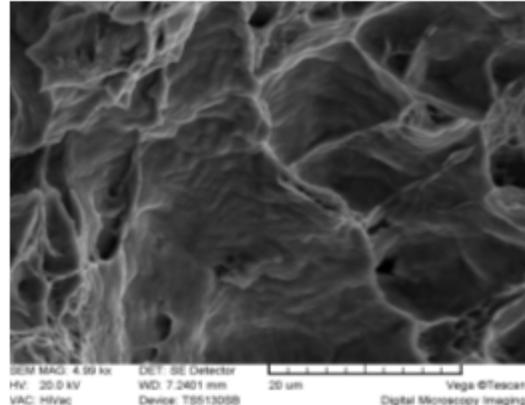


Fig. 9 Material nuevo ensayado a 545 °C.

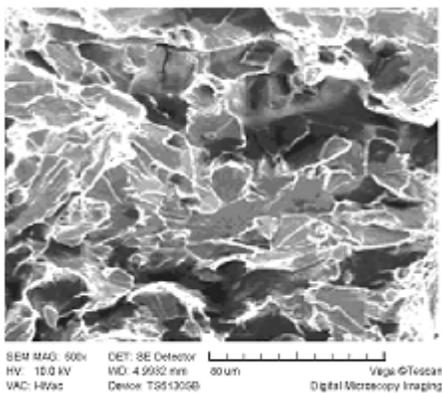


Fig. 10 Material 138 000 h de trabajo ensayado a temperatura ambiente.

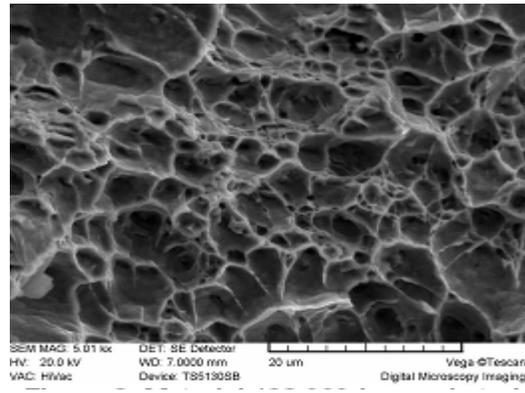


Fig. 11 Material 138 000 h de trabajo ensayado a 545 °C.

Determinación de los componentes de los carburos

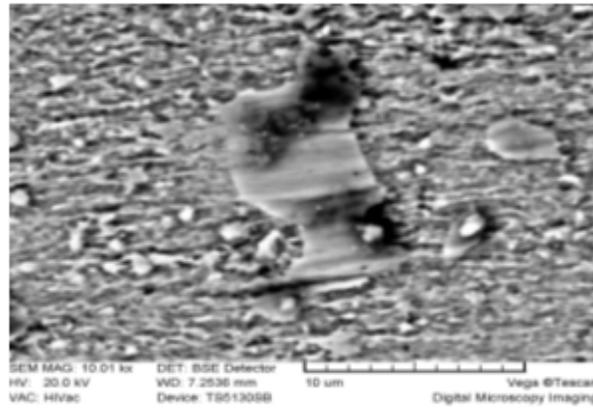


Fig. 11 Ejemplo de carburo analizado.

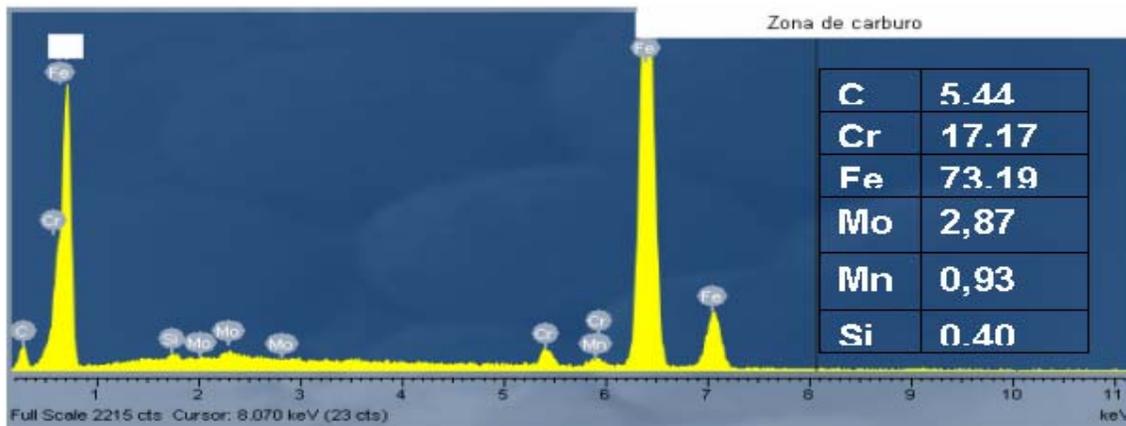


Fig. 12 Análisis de componentes del carburo.

Búsqueda de fósforo por el límite de grano y carburos para el material de 138 000 h de trabajo

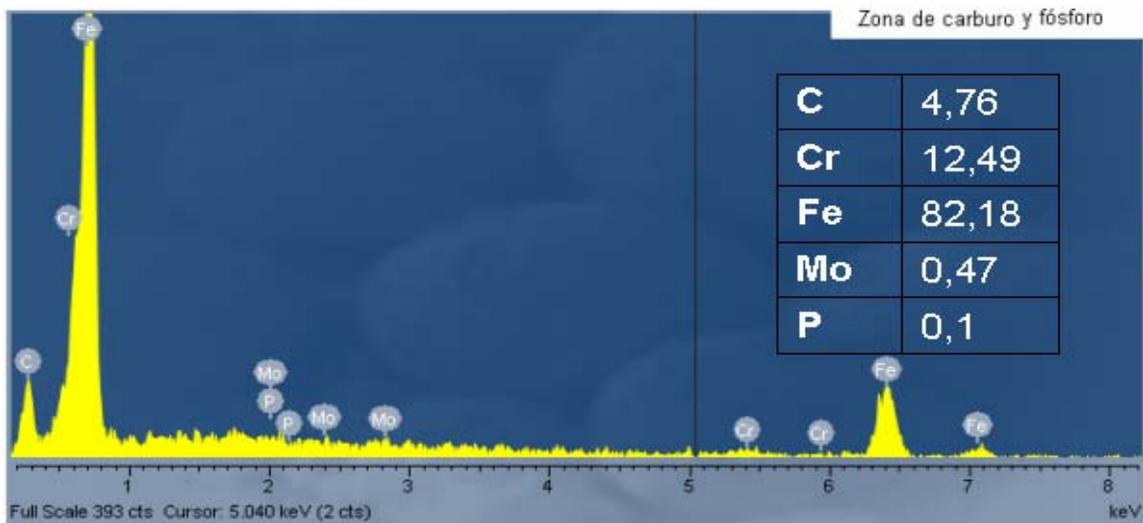


Fig. 13 Análisis que demuestra presencia de fósforo.

Discusión de los resultados

Como se puede observar en la tabla 1, los valores obtenidos del ensayo de tracción se comportaron como se esperaba. Los valores de R_U y R_{02} con el aumento de la temperatura disminuyeron debido a que se debilitan los enlaces atómicos, facilitando el deslizamiento cristalino /7, 9/, explicando también la ligera disminución, casi inapreciable, del módulo de Young, y el aumento de la estricción de área y la elongación relativa.

Algunos materiales clasificados como predominantemente frágil tienen valores $a_p \leq 30 \text{ J/cm}^2$, según Buty, Caci, Cizelj, Eyckmans, Fugi /10-14/; por lo que se podría pensar preliminarmente que por encima de las 98 000 h de trabajo, el material se comporta predominantemente frágil a temperatura ambiente y más si se tiene en cuenta que este material está garantizado por el fabricante 100 000 h de trabajo, y se comporta predominantemente dúctil tanto a temperatura ambiente (menos de 100 000 h de trabajo) como a la temperatura de trabajo (545 °C) en cualquier estadio de trabajo de este material, tomando en consideración los valores del trabajo de propagación de la grieta.

El material nuevo a temperatura ambiente se comporta predominantemente como dúctil, teniendo en cuenta que materiales dúctiles, como (ASTM A 533, ASTM A 508) según literatura /15/ tienen valores de J_{IC} entre 200 y 300 N/mm, y en este caso el valor de $J_{IC} = 225 \text{ N/mm}$.

El material nuevo a 545 °C tiene un valor de $J_{IC} = 300 \text{ N/mm}$, lo cual es lógico ya que a medidas que aumenta la temperatura, aumenta la ductilidad debido, fundamentalmente (en este caso que no existe cambio de fases) a el aumento de la movilidad atómica, aumento de las vacantes y los defectos; y por lo tanto, el material tiene mayores cualidades para deformarse, considerándose como predominantemente dúctil.

El material envejecido a temperatura ambiente tiene un valor de $J_{IC} = 48 \text{ N/mm}$, por lo que se considera predominantemente frágil. En la literatura universal /16,17/, para valores de $J_{IC} < 100 \text{ N/mm}$ se consideran frágiles.

El material envejecido a 545 °C tiene un valor de $J_{IC} = 230 \text{ N/mm}$, por lo que se puede considerar predominantemente dúctil.

En las superficies de fractura analizadas a través del microscopio electrónico de barrido, se puede observar claramente cómo el material de las LPV, siempre que trabaje a temperatura de trabajo (545 °C) se comportará con rotura predominantemente dúctil, al igual que en material nuevo a temperatura ambiente, no siendo así en el material envejecido de 138 000 h de trabajo a temperatura ambiente, el cual muestra una rotura predominantemente frágil, de tipo intergranular. También se puede observar cómo la grieta en ningún instante atraviesa el carburo, sino que lo bordea en todo momento. Se determina que existe la presencia de carburos cementítico con cromo y molibdeno, no encontrándose la presencia de vanadio en el carburo, debido, fundamentalmente, a la poca difusión de este por debajo de los 600 °C. Se coincide con el padre de este acero en que por encima de las 100 000 h de trabajo, existe precipitación de fosforo por el límite de carburos y granos.

Conclusiones

Como se puede apreciar, el acero 12Cr1MoV es un material ferrítico-perlítico, resistente a altas temperaturas. Con el transcurso del tiempo en explotación, va desapareciendo la perlita, lo que trae consigo la coalescencia y coagulación de carburos de tipo cementítico con presencia de cromo y molibdeno. Además, se puede observar cómo el material a temperatura de trabajo presenta una gran tenacidad mostrando el sobredimensionamiento de diseño utilizado por los rusos. En este caso, aunque el material no trabaja a temperatura ambiente, a esta temperatura existe una fragilización del material envejecido debido, fundamentalmente, a las precipitaciones de carburos y la presencia de fósforo por los límites de granos. Con los valores determinados de resistencia a la tracción, los valores de tensiones máximas y la tenacidad de fractura, se realiza una caracterización adecuada del material para su utilización posteriormente en la determinación de la vida útil en este material.

Nomenclatura

K_{IC}	Factor de intensidad de tensiones (Mpa. m ^{1/2})
J_{IC}	Tenacidad de fractura (N/mm)
R_U	Tensión última (Mpa)
R₀₂	Tensión que representa una deformación en el material del 0,2 % (Mpa)
E	Módulo de young (Mpa)
ψ	Extricción de área (%)
√	Elongación relativa (%)
F_p	Área de la sección (m ²)
r	Radio de entalla de probetas para impacto (mm)
a_p	Trabajo de propagación de la grieta(J/cm ²)
a_f	Trabajo de formación de la grieta (J/cm ²)
C	% de carbono
Cr	% de cromo
Fe	% de hierro
Mo	% de molibdeno
P	% de fósforo

Bibliografía

1. Colectivo de autores, Informe de la Regeneración de la Unidad N° 3 de la CTE Renté, 2003.
2. Norma de mantenimiento. NRIB 002: 98 utilizada en Renté para las labores de mantenimiento, 1998.
3. Norma de mantenimiento NRIB 002: 98 utilizada en Renté para las labores de mantenimiento, 1998.
4. Mora Sarmiento Alexis. Atestación de Aspirantura a Doctorado. 2004.
5. Alexis, Mora Sarmiento, "Selección y desarrollo de métodos e instalaciones experimentales para caracterizar el comportamiento del acero 12Cr1MoV (12X1MØ) de las Líneas Principales de Vapor (LPV), con vista a su posterior cálculo de vida útil", Tesis presentada en opción al título académico de Master en Ciencias Técnicas, Cuba, 2007.
6. _____, "Elaboración de un proyecto para la determinación del envejecimiento y pronóstico de vida en la LPV en la unidades de 100 Mw", Proyecto III, Universidad de Oriente, 2003.
7. A. P. Guliav, *Metalografía*, t. I y II, Editorial Mir Moscú, 1978.
8. J. R. Donoso; J. D. Landes, "A Unifying Principle for Evaluating Fracture Toughness in the Elastic and Plastic Regimes with Planar fracture Specimens, Fatigue and Fracture Mechanics": 30th Volumen, ASTM 1360, P.C Paris and K.L Jerina, Eds., American Society for Testing and Materiales, West Conshohocken, 2000,págs. 34-50.
9. Callister, Materials Science and Engineering, USA, Soporte Magnético, 1998.
10. Buty Rajashtadt, *Aceros y aleaciones para altas temperaturas*, Editorial Mir Moscú, 1976.
11. Caci Zhang, Mechanical Component Life Time Estimation Based on Accelerated Life, Estatal Engn, Erie, PA 16563 EE.UU, 2003.
12. Mavko, Cizelj, "Descripción de la propagación de grietas por corrosión tensión en tuberías de generadores de vapor hechas de Inconel 600", en <http://0-06359-922-1.scientific.net/>, 1995.
13. Marc Eyckmans, "Evaluating the Condition & Remaining Life of Older Power Plants", en www.Evaluating the condition & remaining life of older power plants, 2002.
14. Akio Fugi, "The Estimation of High Temperature Creep Damage Around the Crack of Cr-Mo-V, Japan", en Akio T,Mitsubishi Ind Co Pesado Ltd, Nagasaki R&D Ctr,Fukahori Machi 5- 717 -1, Nagasaki 8510392,Japón, 1994.
15. J. R. Donoso; J. D. Landes, *Op. Cit.*, 47, 1994, págs. 619-628.
16. J. D. Eshelby, *In prospects of Fracture Mechanics*, Sih Van Elast, Broek, Ed., Noordhoff, 1974, págs. 66-84.
17. J. D. G. Sumpter; C. E., Turner, In Cracks and Fracture, ASTM STP 601, 1976, págs. 3-18
18. ASTM E 111-97. Standard Test Method for Young's Modulus, Tangent Modulus, and Chord Modulus, 1997.