

00576
1982

RECIBIDA EN LA BIBLIOTECA
CENTRAL DE LA UNAM
EL 20 DE ABRIL
1982

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA
DIVISION DE ESTUDIOS SUPERIORES

DESARROLLO DE UN MODELO PARA DESCRIBIR EL
AGRIETAMIENTO POR ESFUERZOS BAJO CORROSION EN
VAINAS DE CIRCALLOY

T E S I S
PARA OPTAR POR EL
GRADO DE MAESTRIA
EN CIENCIAS NUCLEARES

PRESENTA
ARTURO O. PARRA INIGUEZ

MEXICO - 1986

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

R E S U M E N.

El fenómeno denominado "interacción pastilla vaina" se puede manifestar en las barras combustibles cuando éstas se someten a incrementos de potencia considerablemente altos. Esta interacción puede producir la falla de la vaina, la que inicialmente se consideró como el resultado exclusivo de la interacción mecánica entre las vainas y las pastillas de combustible, en la actualidad se ha observado un efecto combinado de la acción de un ambiente corrosivo y de esfuerzos aplicados simultáneamente por lo que se le identifica como "falla debida a esfuerzos bajo corrosión."

En el presente trabajo se ha reunido aquella información considerada como básica para efectuar en primera instancia un estudio sobre aquellos parámetros que están involucrados en el fenómeno, haciendo una diferenciación entre los parámetros inducidos durante el proceso de fabricación de las vainas de circaloy y aquellos que se consideran que son en realidad los causantes de las fallas por esfuerzos bajo corrosión. Consecuentemente, se hace énfasis para interpretar el papel que juega el yodo y de la manera en que es posible se lleve a cabo la acción corrosiva de este elemento, asimismo para obtener las expresiones analíticas con las cuales se pueda predecir el tiempo de falla e interpretar la acción del yodo ante la falla por esfuerzo bajo corrosión.

Se derivó un modelo para el fenómeno de falla por esfuerzos bajo corrosión de vainas de circaloy, con el cual se predice el tiempo de falla en función del esfuerzo aplicado, la temperatura de la vaina, la concentración de yodo y de la fluencia neutrónica a las que se ve sometida una vaina combustible. El modelo se basa en el valor del tiempo mínimo de falla correspondiente al esfuerzo umbral de falla bajo condiciones de no irradiación y en un ambiente de yodo en exceso a la concentración de saturación.

S U M M A R Y

" Pellet-Cladding Interaction" phenomenon can be present at combustible elements when they are subject to power increases rather considered high. This interaction can be able to produce cladding cracking, which early thought as result of mechanical interaction among uranium pellets and cladding, to date it has been observed a combined effect from corrosive environment action and strength simultaneously applied, now it is identified as " Stress Corrosion Cracking ".

In this paper were collected information looked as basic to perform initial studies about all those parameters that are involved in this phenomenon, it has been necessary to separate all those parameters related with manufacture process from those actually considered as stress corrosion cracking generators. Special attention has been put to interpret the activity that iodine plays and how is it possible that corrosion take place. Likewise, attention has been taken in account to obtain analytic expressions which can predict failure time as far as simulate the iodine action in stress corrosion cracking.

A model was derived for stress corrosion cracking of circular claddings, which predict the failure time as a function of applied strength, cladding temperature, iodine concentration and neutronic fluence. This model is based on minimum failure time and threshold strength, corresponding to that failure time, both related to unirradiated condition and iodine concentrations upper the saturation value.

TESIS : DESARROLLO DE UN MODELO PARA DESCRIBIR EL AGRIETAMIENTO POR ESPUERZOS BAJO CORROSION EN VAINAS DE CIRCALOY.

CONTENIDO:

1 . - INTRODUCCION.

2 . - ANTECEDENTES:

EVIDENCIAS EXPERIMENTALES

MODELOS EXISTENTES

3. - DETERMINACION DE PARAMETROS PRINCIPALES QUE INTERVIENEN EN EL FENOMENO.

4. - DESARROLLO DEL MODELO.

5. - COMPARACION CON RESULTADOS EXPERIMENTALES.

6. - CONCLUSIONES..

ASESOR : F. JAVIER GOMEZ SANTA MARIA.

ALUMNO : ARTURO O. PARRA INIGUEZ.

C O N T E N I D O .

LISTA DE TABLAS.

TABLA 1 .- Datos experimentales correspondientes a pruebas realizadas con trames de tubos de circaloy-2 y circaloy-4, para determinar parámetros que influyen en FEC. Garlick y Wolfenden.(3)

pag. 2-3a

TABLA 2 .- Datos experimentales correspondientes a pruebas realizadas con anillos de circaloy-2, para determinar parámetros que influyen en FEC. J.C. Wood.(4)

pag. 2-3b

TABLA 3 .- Datos experimentales correspondientes a pruebas realizadas con anillos de circaloy-2 y circaloy-4 irradiados, para determinar influencia de irradiación. J.C. Wood.(5)

pag. 2-5a

TABLA 4 .- Datos experimentales correspondientes a pruebas realizadas con vainas de circaloy, para determinar la influencia del quemado ó irradiación, potencia y --rampa de potencia. Garlick y Gravenor.(13)

pag. 2-13a

TABLA 5 .- Valores del parámetro "C" , correspondiente a la --expresión que describe el comportamiento del tiempo de falla, conforme a Kreyms.(15)

pag. 2-16

TABLA 6 .- Concentraciones de umbral y de saturación de yodo, para el circaloy-4 a 633 K.

pag. 3-7

TABLA 7 .- Esfuerzos de falla en término de la fluencia neutrónica, a 590,630 y 700 K.

pag. 3-8

C O N T E N I D O .

LISTA DE TABLAS.

- TABLA 8 .- Comparación de resultados obtenidos mediante la ecuación 4-5 y 4-6 , con la información experimental reportada en la gráfica 11. Esfuerzos de falla en presencia y ausencia de yodo.
pag. 4-5
- TABLA 9 .- Valores teóricos de la profundidad de la grieta para diferentes tiempos de falla o esfuerzos de falla.
pag. 4-6
- TABLA 10.- Valores teóricos de la rapidez de reacción del yodo (promedio) expresada como el cociente del incremento del esfuerzo tangencial y el incremento de la concentración de yodo.
pag. 4-12
- TABLA 11.- Resultados teóricos del tiempo de falla correspondiente a la temperatura de 633 K y diversas concentraciones de yodo, para circaloy-4 sin irradiar.
pag. 4-23
- TABLA 12.- Valores de las constantes que relacionan al incremento en el esfuerzo de falla y el incremento en la concentración de yodo, referentes al circaloy.
pag. 4-25
- TABLA 13.- Relación entre los incrementos en el esfuerzo y en la concentración de yodo, con la concentración de yodo.
pag. 4-25
- TABLA 14.- Aspectos superficiales de los especímenes en término de la existencia de Fe y O₂ que actúan como catalizadores en la reacción Zr-I.
pag. 4-27

C O N T E N I D O .

LISTA DE TABLAS.

- TABLA 15.- Acción del yodo sobre circaloy-2 (TF/LE)
pag. 4-72
- TABLA 16.- Acción del yodo sobre circaloy-4 (TF/LE).
pag. 4-78
- TABLA 17.- Tiempo de falla para circaloy-2, y comparación con
resultados experimentales existentes.
pag. 5-3
- TABLA 18.- Tiempo de falla para circaloy-4, y comparación con
resultados experimentales existentes.
pag. 5-6

C O N T E N I D O .

LISTA DE GRAFICAS.

- GRAFICA 1.- Velocidad de fractura dependiente de la intensidad de esfuerzo, en barras de doble cantiliver expuestas a vapores de yodo a 300 C, para circaloy.
pag. 2-4a
- GRAFICA 2.- Variación del tiempo de falla respecto a la temperatura para anillos de circaloy, esforzados a 310 MPa con suficiente yodo para obtener 3×10^{-3} gramos de yodo/cm² de superficie de circaloy, referido en (3).
pag. 2-4b
- GRAFICA 3.- Variación del tiempo de falla respecto de la concentración de yodo, para circaloy bajo tensión de 310 MPa.
pag. 2-4c
- GRAFICA 4.- Esfuerzo tangencial residual en función de la temperatura de recocido en la que se muestra que la liberación de esfuerzos residuales incrementa la resistencia a FEC de anillos de circaloy.
pag. 2-4d
- GRAFICA 5.- Tiempo de falla en término del esfuerzo nominal tangencial para circaloy-2 recocido, a 593 K, no prera-
nurado.
pag. 2-5b
- GRAFICA 6.- Tiempo de falla en término del esfuerzo tangencial para circaloy-2 liberado de esfuerzos a 593 K.
pag. 2-5c
- GRAFICA 7.- Tiempo de falla en función del esfuerzo tangencial, en la cual se muestra el efecto de la temperatura de prueba sobre la FEC por yodo (0.006 g/cm^2), para circaloy-2 liberado de esfuerzos.
pag. 2-5d

C O N T E N I D O
LISTA DE GRAFICAS.

- GRAFICA 8.- Tiempo de falla en función del esfuerzo tangencial para circaloy-2 y circaloy-4, la cual muestra el efecto de la composición química sobre la susceptibilidad a FEC del circaloy, a 633 K y 6 mg/cm^2 de yodo. pag. 2-5e
- GRAFICA 9.- Tiempo de falla en función del esfuerzo tangencial, la cual muestra el efecto de muescas maquinadas sobre el comportamiento de FEC por yodo en tubos de circaloy-4 (LE) presurizados, a 633 K y 6 mg/cm^2 de yodo. pag. 2-5f
- GRAFICA 10.- Efecto de la fabricación sobre la susceptibilidad a FEC debido a yodo en circaloy-2, obtenido de dos proveedores (A y B), a 633 K y 6 mg/cm^2 de yodo. pag. 2-5g
- GRAFICA 11.- Resultados de presurización de tubos de circaloy-4 a 630 K y a concentración de yodo de: 6×10^{-4} , 6×10^{-3} $6 \times 10^{-2} \text{ g/cm}^2$, a 630 K. pag. 2-6a
- GRAFICA 12.- Resultados de presurización de tubos de circaloy-4 irradiado ($3.6 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$), expuesto a una concentración de yodo de $6 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^2$, a 630 K. pag. 2-6b
- GRAFICA 13.- Efecto de la temperatura sobre el tiempo de falla para circaloy-4 expuesto a $5 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^2$ de yodo. pag. 2-7a
- GRAFICA 14.- Tiempo de falla para tubos de circaloy, presurizados internamente, en función de la concentración de yodo (8). pag. 2-8a
- GRAFICA 15.- Tiempo de falla para tubos de circaloy, presurizados internamente, en función de la concentración de yodo (9), a las temperaturas de 623 y 673 K. pag. 2-8b

CONTENIDO.

LISTA DE GRAFICAS.

- GRAFICA 16.- FEC sobre vainas del Big Rock Point Reactor, a : 598 K, 4×10^{25} n/m² y 24 MWd/Kg(U), para circaloy-2 TF/LE.
pag. 2-8c
- GRAFICA 17.- FEC sobre vainas del Quad Cities Reactor, a: 598 K bajo 6×10^{-4} g/cm², en el intervalo de 1.3 a 1.6 ($\times 10^{25}$)n/m² y un quemado de 8.5 a 11 MWd/Kg(U), para circaloy-2 recocido.
pag. 2-8d
- GRAFICA 18.- FEC sobre vainas del H.B. Robinson Reactor, a: 598 y 633 K, 3.6×10^{25} n/m², para circaloy-4 TF/LE.
pag. 2-8e
- GRAFICA 19.- Tiempo de falla del circaloy-4 en función de la concentración de yodo a diversos esfuerzos (10).
pag. 2-9a
- GRAFICA 20.- Línea de umbral relacionando la potencia en rampa - con el quemado de elementos intactos y defectuosos. No se consideró la rapidez de la rampa. (12)
pag. 2-12a
- GRAFICA 21.- Línea de umbral relacionando el incremento en potencia y el quemado de elementos defectuosos e intactos. No se consideró la rapidez de la rampa. (12)
pag. 2-12a
- GRAFICA 22.- Porcentajes de elementos defectuosos en función de la altura sobre la línea de umbral. (12)
pag. 2-12b
- GRAFICA 23.- Porcentajes de elementos defectuosos en función de la altura sobre la línea de umbral. (12)
pag. 2-12b

C O N T E N I D O .

LISTA DE GRAFICAS.

- GRAFICA 24 .- Influencia de la irradiación sobre el esfuerzo tangencial para circaloy-2, con ausencia de yodo a 590 K, 630 K, 700 K.(14). pag. 2-13b
- GRAFICA 25.- Factor Y de calibración de intensidad de esfuerzo en función de a/w . pag. 2-15a
- GRAFICA 26.- Predicción de FEC para tubos de circaloy-4 presurizado según Kreyns. pag. 2-16a
- GRAFICA 27.- Dependencia en la temperatura de FEC por yodo de tubos de circaloy-4. pag. 2-18a
- GRAFICA 28.- Esfuerzo de falla en función del tiempo de falla del circaloy-2. pag. 4-1a
- GRAFICA 29.- Esfuerzo de falla en función del tiempo de falla del circaloy-4. pag. 4-1b
- GRAFICA 30.- Esfuerzo de falla en función del tiempo para circaloy-2 y circaloy-4, escala log-log. pag. 4-2a
- GRAFICA 31.- Decremento en el esfuerzo tangencial de falla en función del incremento en la concentración de yodo. pag. 4-12a
- GRAFICA 32.- Rapidez de variación del decremento del esfuerzo tangencial de falla en función de la concentración de yodo. pag. 4-14b
- GRAFICA 33.- Rapidez de variación del incremento de la concentración de yodo en función de la concentración de yodo. pag. 4-13b
- GRAFICA 34.- Tiempo de falla en función de la concentración de yodo para circaloy-4. pag. 4-16a
- GRAFICA 35.- Esfuerzo y tiempo de falla en función de la concentración de yodo para circaloy-4.(Predicción) pag. 4-24a

C O N T E N I D O .

LISTA DE GRAFICAS.

- GRAFICA 36.- Relación entre la razón de cambio en el esfuerzo y la concentración de yodo.
pag. 4-25a
- GRAFICA 37.- Rapidez de reacción en función de la concentración de yodo.
pag. 4-25a
- GRAFICA 38.- Esfuerzos y tiempos de falla para circaloy-2 TF/LE a diversas condiciones de fluencia neutrónica, concentración de yodo y temperatura. (Escala log-log)
pag. 4-31a
- GRAFICA 39.- Esfuerzo y tiempo de falla para circaloy-4 TF/LE bajo diversas condiciones de fluencia neutrónica, concentración de yodo y temperatura. (Escala log-log).
pag. 4-31b
- GRAFICA 40.- Relación entre la fluencia y el tiempo de falla para circaloy-2 y circaloy-4, ambos TF/LE.
pag. 4-32a
- GRAFICA 41.- Comportamiento del circaloy-2 (TF/LE) a las temperaturas de 593 K y 633 K, a las fluencias y concentraciones de yodo indicadas conforme a lo expresado en la ecuación 4-87. (Predicción)
pag. 4-58a
- GRAFICA 42.- Comportamiento del circaloy-4 (TF/LE) a 593 K, a las fluencias y concentraciones de yodo indicadas, conforme a lo expresado mediante la ecuación 4-89. (Predicción)
pag. 4-62a
- GRAFICA 43.- Comportamiento del circaloy-4 (TF/LE) a 633 K, a las fluencias y concentraciones de yodo indicadas, conforme a lo expresado mediante la ecuación 4-89. (Predicción)
pag. 4-62b

CONTENIDO.

LISTA DE GRAFICAS.

- GRAFICA 44.- Comportamiento del circaloy-4 (TF/LE) a 593 y 633 K a las fluencias y concentraciones de yodo indicadas, conforme a lo expresado mediante la ecuación 4-89. (Predicción) pag. 4-62c
- GRAFICA 45.- Acción de yodo sobre circaloy-2 (TF/LE) a 593 K a las fluencias y concentraciones de yodo que se indican. (Predicción). pag. 4-84a
- GRAFICA 46.- Acción del yodo sobre circaloy-2 (TF/LE) a 633 K, a las fluencias y concentraciones de yodo que se indican. (Predicción) pag. 4-84b
- GRAFICA 47.- Acción del yodo sobre circaloy-4 (TF/LE) a la temperatura de 633 K, a las fluencias y concentraciones que se indican. (Predicción) pag. 4-84c
- GRAFICA 48.- Acción del yodo sobre circaloy-4 (TF/LE) a la temperatura de 593 K, a las fluencias y concentraciones que se indican. (Predicción) pag. 4-84d
- GRAFICA 49.- Comparación teórica del efecto del fenómeno FEC sobre circaloy-2 y circaloy-4, ambos (TF/LE) a las fluencias y concentraciones indicadas, a la temperatura de 593 K. (Predicción) pag. 5-10a
- GRAFICA 50.- Comparación teórica del efecto del fenómeno FEC sobre circaloy-2 y circaloy-4, ambos (TF/LE) a las fluencias y concentraciones indicadas, a la temperatura de 633 K. pag. 5-10b
- GRAFICA 51.- Comparación de resultados teóricos según ecuación 4-87. y datos experimentales, a la temperatura de 593 K para circaloy-2. pag. 5-10c
- GRAFICA 52.- Comparación de resultados teóricos según ecuación 4-89 y datos experimentales a la temperatura de 633 K, para circaloy-4. pag. 5-10d

N O M E N C L A T U R A .

- C_I Concentración de yodo en gramos de yodo por centímetro cuadrado de superficie de circaloy, referida simplemente como la concentración expresada en g/cm^2 .
- C_{IS} Concentración de saturación de yodo, a partir de la cual una concentración mayor no influye apreciablemente en el fenómeno FEC.
- C_{IU} Concentración umbral de yodo, a partir de la cual se manifiesta la participación del fenómeno FEC.
- F Fluencia neutrónica en n/m^2 , referida también como fluencia, simplemente.
- F_0 Fluencia umbral en presencia de yodo, a partir de la cual se manifiesta un decremento en el esfuerzo de falla en presencia de yodo, en n/m^2 .
- F_u Fluencia umbral en ausencia del yodo, a partir de la cual se manifiesta un incremento en el esfuerzo de falla en ausencia de yodo, en n/m^2 .
- FEC Falla debida a esfuerzos bajo corrosión, en el presente referida al yodo como agente corrosivo.
- t_f Tiempo de falla, en h.
- t_{Ciu} Tiempo de falla a la concentración umbral de yodo, en h.
- t_{Cis} Tiempo de falla a la concentración de saturación de yodo, en h.
- t_F Tiempo de falla correspondiente al esfuerzo umbral, en condiciones de irradiación, en h.
- t_{F0} Tiempo de falla correspondiente al esfuerzo umbral en condiciones de no irradiación, en h.
- t_θ Tiempo de falla que corresponde a la intersección de las curvas que representan al esfuerzo de falla en ausencia y en presencia de yodo, o sea $\nabla_{\theta}^{ir} = \nabla_{FEC}^{ir}$.

NOMENCLATURA.

- TF Trabajado en frío.
- LE Liberado de esfuerzos.
- ∇ Esfuerzo aplicado en MPa.
- ∇_{θ} Esfuerzo de falla en ausencia de yodo y con material no irradiado; $\nabla(t_f, C_I=0, F=0, T)$, en MPa.
- ∇_{θ}^{ir} Esfuerzo de falla en ausencia de yodo y con material irradiado; $\nabla(t_f, C_I = 0, F, T)$, en MPa.
- ∇_{FEC} Esfuerzo de falla en presencia de yodo y con material no irradiado; $\nabla(t_f, C_I, F = 0, T)$, en MPa.
- ∇_{FEC}^{ir} Esfuerzo de falla en presencia de yodo y con material irradiado; $\nabla(t_f, C_I, F, T)$, en MPa.
- ∇_{FECU} Esfuerzo umbral para la FEC, en condiciones de no irradiación; a la concentración de saturación;
 $\nabla(t_f, C_{IS}, F = 0, T)$, en MPa.
- ∇_{FECU}^{ir} Esfuerzo umbral para la FEC, en condiciones de irradiación, a la concentración de saturación;
 $\nabla(t_f, C_{IS}, F, T)$, en MPa.

COMPOSICION DEL CIRCALOY-2 y CIRCALOY-4

ELEMENTO	CIRCALOY-2		CIRCALOY-4	
	TAPA	FONDO	TAPA	FONDO
Sn	1.53 %	1.49 %	1.52 %	1.39 %
Fe	0.14 %	0.14 %	0.20 %	0.19 %
Cr	0.11 %	0.10 %	0.12 %	0.11 %
Ni	0.05 %	0.05 %	----	----
IMPUREZAS EN ppm				
Al	50	47	38	35
B	0.25	0.25	0.2	0.2
C	120	140	110	120
Cd	0.25	0.25	0.2	0.2
Ca	10	10	10	10
Cl	5	5	5	5
Cb	50	50	50	50
Co	10	10	10	10
Cu	13	18	17	17
H	5	5	7	5
Hf	92	74	44	44
N	37	36	33	34
Ni	--	--	35	35
P	8	8	--	--
O	1250	1370	1260	1270
Mg	10	10	10	10
Mn	25	25	25	25
Mo	10	10	25	25
Si	69	73	81	69
Ti	25	25	25	25
Ta	100	100	100	100
W	25	25	25	25
V	25	25	25	25
U	1	1.2	1	0.9
Pb	25	25	50	50

1. - INTRODUCCION .

La energía nuclear ha tenido éxito en la generación de electricidad debido a la concepción de los reactores nucleares, que junto con los sistemas de retención y tratamiento de desechos radiactivos, constituyen un sistema de barreras que - proporcionan una protección eficiente a la población y al medio ambiente.

La energía contenida en los núcleos atómicos de ciertos isótopos de elementos pesados, tales como U-235 y U-233, es extraída mediante el proceso de fisión en el cual el núcleo se divide, liberando gran cantidad de energía, en dos núcleos correspondientes a isótopos de elementos más ligeros denominados productos de fisión que en general son radiactivos. Ya que este proceso se lleva a cabo en un reactor nuclear a razón de 10¹⁵ veces por segundo, es una fuente considerable de radioisótopos cuyas vidas medias se encuentran en el intervalo de fracciones de segundo a decenas de años.

En consecuencia dichos productos de fisión deben ser retenidos para evitar que se dispersen provocando que la población sea expuesta a la radiación ionizante que emiten. Es por esto que la contención en las plantas nucleares juega un papel primordial que se ha concebido bajo el concepto de barreras, - constituidas por la vaina o encamisado de las barras combustibles, la vasija del reactor, la contención primaria y el edificio del reactor. De esta manera se evita que los productos de fisión gaseosos, volátiles y en forma de partículas se fuguen de manera incontrolada.

La vaina de una barra combustible además de ser la primer barrera de contención, es el material estructural que contiene al combustible (normalmente UO₂ en forma de pastillas cilíndricas) manteniendo la geometría del núcleo del reactor, -

esencial para la criticidad.

El circonio se ha seleccionado para la fabricación de vainas para barras de combustibles debido a su baja sección eficaz para la captura de neutrones y a sus propiedades mecánicas. Su uso no obstante ha manifestado problemas que inducen a fallas atribuidas a efectos de la interacción entre la vaina y el combustible contenido en ellas. Las aleaciones mas usadas son el Circaloy-2 y el Circaloy-4, normalmente referidas como circaloy simplemente.

El fenómeno denominado "INTERACCION PASTILLA VAINA (IPV)" se puede manifestar en las barras combustibles cuando éstas se someten a incrementos de potencia considerablemente altos. Esta IPV puede producir la falla de la vaina, la que inicialmente se consideró como el resultado exclusivo de la interacción mecánica entre las vainas y las pastillas, en la actualidad se ha observado un efecto combinado de la acción de un ambiente corrosivo y de esfuerzos aplicados simultáneamente, por lo que se le identifica como FALLA DEBIDA A ESFUERZOS BAJO CORROSION (PEC).

A partir de 1964 cuando se obtuvo la primera indicación de este tipo de falla, en el "High Performance UO₂ Program" - conducido por General Electric y respaldado por la USAEC y EURATOM (1), se llevaron a cabo una serie de investigaciones tendientes a esclarecer las causas que la ocasionan. Se han efectuado pruebas con especímenes de circaloy obtenidos de vainas irradiadas y de tubos fabricados para tal fin, bajo diversas condiciones a fin de identificar los parámetros que intervienen en el fenómeno y los valores límites bajo los cuales existe - una probabilidad alta de ocurrencia de dicha falla.

En el presente trabajo se ha reunido aquella información considerada como básica para efectuar en primera instancia un estudio sobre aquellos parámetros que están involucrados en el fenómeno, haciendo una diferenciación entre los parámetros inducidos durante el proceso de fabricación de las vainas de cir caloy y aquellos que se consideran que en realidad son los causantes de las fallas por esfuerzos bajo corrosión. Consecuentemente se hace énfasis para interpretar el papel que juega el yodo y de la manera en que es posible se lleve a cabo la acción corrosiva de este elemento, asimismo para obtener las expresiones analíticas con las cuales se pueda predecir el tiempo de falla e interpretar la acción del yodo ante la falla por esfuerzos bajo corrosión.

2 . - A N T E C E D E N T E S .

En este capítulo se proporcionan los resultados experimentales de mayor relevancia en el estudio de la acción simultánea de esfuerzos y corrosión provocada por yodo sobre especímenes de circaloy bajo diversas circunstancias. En forma cronológica se hace referencia a los trabajos presentados en diversos foros científicos relacionados con la FEC y se resumen brevemente las formas en que se llevaron a cabo, así como las conclusiones a que llegaron los autores.

La información se presenta por separado en dos secciones; A - en donde se relacionan aquellos trabajos involucrados con los parámetros que se investigaron respecto a su influencia sobre la acción corrosiva del yodo, así como de las tensiones aplicadas a fin de determinar los valores de umbral. Esta sección a su vez se separa en dos partes, la primera con la información obtenida en pruebas realizadas en laboratorios, fuera de reactores nucleares y la segunda con información relacionada con parámetros de operación de reactores que intervienen en este proceso.

En la sección B - se mencionan los modelos tendientes a expresar la forma en que se crean y se propagan las fallas hasta lograr la fractura de las vainas de circaloy.

A. - EVIDENCIAS EXPERIMENTALES.

A.1- PRUEBAS EN LABORATORIOS.

Los primeros indicios de la existencia de un proceso de falla en las barras combustibles con vainas de circaloy, que - estuviera relacionado con los materiales del combustible y la vaina, fueron obtenidos en 1964 por General Electric en su programa "High Performance UO₂", durante el cual se observaron pequeñas grietas en los elementos operados a potencias pico del orden de 180 KW/m, encontrando altas concentraciones del producto de fisión yodo depositadas en tales zonas afectadas (1).

En 1966 Rosenbaum, Davis y Pon (2) en su estudio relacionado con la interacción del yodo sobre el circaloy-2, sujeto a esfuerzos de tensión, concluyeron que el proceso de falla analizado podía designarse como un fenómeno de esfuerzos bajo corrosión en el cual deben estar presentes simultáneamente el esfuerzo y el ambiente corrosivo, así mismo notaron que la morfología de la superficie agrietada era muy similar a aquella - detectada en las fallas de los combustibles nucleares operados en reactores.

En 1971 Garlik y Wolfenden (3) reportan los resultados de sus experimentos enfocados al estudio de la resistencia - del circaloy a la falla debida a esfuerzos bajo corrosión (FEC), para ésto utilizaron anillos de circaloy-2 y circaloy-4 fabricados por reducción de tubos en dos pasos sobre mandril seguido por tratamiento térmico a 713 K y 833 K durante 5 horas, así como anillos de circaloy trabajado en frío y liberado de esfuerzo mediante tratamiento térmico a 748 K, obteniendo respectivamente esfuerzos de cedencia de 676 MPa, 814 MPa y 586 MPa a -- temperatura ambiente. Se analizó el comportamiento de los tubos, reducido sobre mandril y el trabajado en frío, tratados térmicamente en el intervalo de temperatura de 773 K a 1123K, ex-

puestos a yodo en el intervalo de presión de 146 Pa a 2387 Pa y a temperaturas de prueba en el intervalo de 523 K a 873 K.

La mayoría de las pruebas se llevaron a cabo en la manera descrita por Rosenbaum, sometiendo anillos de circaloy a tensión mediante mandriles, dentro de una cápsula Pyrex conteniendo diferentes concentraciones de yodo, a las temperaturas de experimentación antes mencionadas. En la tabla 1 se resumen los resultados obtenidos para las diversas variables sujetas a estudio. En el examen de la microestructura encontraron que las fallas estaban alineadas radialmente y se iniciaban en la pared interior, que las trayectorias eran predominantemente transgranulares y que no existía evidencia de una deformación plástica extensa en la punta de éstas o al final en donde la falla fue dúctil.

En 1972 Wood (4) publicó resultados experimentales referentes a factores que afectan el proceso de PEC, así como sus valores críticos o de umbral. Las experiencias se llevaron a cabo con circaloy-2 y circaloy-4 fabricados bajo diferentes condiciones de trabajo en frío, de reducción y de recocido, encontrando que los especímenes más susceptibles a la PEC fueron aquellos trabajados en frío, mismos que se usaron para establecer los valores críticos y de referencia. El esfuerzo crítico resultó ser de 217 MPa bajo una concentración de yodo de 0.020 gramos de yodo por centímetro cuadrado de su superficie de circaloy (g/cm^2), equivalente a 0.004 g/cc.

En la tabla 2 se resumen las variables que influyen primordialmente en este fenómeno, indicándose los valores críticos tanto para especímenes irradiados como no irradiados. La técnica consistió en poner bajo tensión a anillos de circaloy, partidos longitudinalmente, mediante cuñas insertadas en las ranuras, los cuales se expusieron al yodo a diversas temperaturas dentro de cápsulas Pyrex. Para determinar la contribución

TABLA 1
AUTOR: A. GARLICK Y P.D. WOLFENDEN (1971) - (3)
MATERIAL: CIRCALOY - 4 Y CIRCALOY - 2
MUESTRAS: TRAMOS DE TUBOS
MEDIO DE TENSION: MANDRIL
CONDICIONES EXPERIMENTALES

DEL MATERIAL (K, h) ^o	TR/LE(713,5)	TR/LE(788,5)	TF/LE(748,5)	TR/LE(713,5)	TF/LE(748,5)	TR/LE(713,5)
TEMPERATURA (K)	593 - 628	593 - 628	613	523 - 613	613	613
PRESION INTERNA DE I ₂ (Pa)	1333 - 2667	1333 - 2667	1333 - 2667	1333 - 2667	1333 - 2667	1463 - 2380 ^o
TIEMPO DE PRUEBA (h)	≈ 24	≈ 18	≈ 16	≈ 22	≈ 16	≈ 24
ESFUERZO - CEDENCIA (MPa)	634	614	586	634	586	
TENSION APLICADA (MPa)	200 - 500	400 - 500	420	400 - 420	420	~ 420
IRRADIACION (n/m ²)	0	0	0	0	0	0
DECAPADO QUIMICO	HNO ₃ · HF					
ESPESOR DE ZrO (μm)	1	1	1	1	1	1
TAMANO DE GRANO (μm)						
TEMPERATURA · RECOCIDO (K)				773 - 973	923 - 1123	
TIEMPO · RECOCIDO (h)				1	1	

RESULTADOS EXPERIMENTALES

VARIABLES	TEMPERATURA	SUCEPTIBILIDAD	SUCEPTI- BILIDAD	TEMPERATURA RECOCIDO	TEMPERATURA RECOCIDO	CONCENTRA- CION DE YODO
VALOR CRITICO	T _c = 823 K	NO EXISTE	EXISTE	T _c ≈ 923 K	T _c = 1123 K	2400 Pa
ESFUERZO CRITICO	420	> 450	< 420	> 420	< 420	420
OBSERVACION	CESA LA FALLA	NO FALLO	HUBO FALLA	NO FALLO	HUBO FALLA	

PRESION A LA TEMPERATURA DE PRUEBA Pa

 o PRESION INICIAL DE I₂ EN Pa A 613 K

 o (K, h) TEMPERATURA Y TIEMPO DE RECOCIDO DURANTE LA FABRICACION DEL TUBO
 TR / LE TUBO REDUCIDO Y LIBERADO DE ESFUERZOS
 TF / LE TRABAJADO EN FRIJO Y LIBERADO DE ESFUERZOS

TABLA 2

AUTOR: J. C. WOOD (1972) - (4)

MATERIAL: CIRCALOY - 2

MUESTRAS: ANILLOS

MEDIO DE TENSION: CUÑA

CONDICIONES EXPERIMENTALES

DEL MATERIAL	TF/LE	TF/LE	TF/LE	TF/LE,TR	TF/LE	TF/LE	TR _y TR40%
TEMPERATURA (K)	573	573	493-573	573	573	573	573
I ₂ CONCENTRACION (g/cm ²)	2 × 10 ⁻² ①	2 × 10 ⁻²	3 × 10 ⁻³	2 × 10 ⁻²	10 ⁻⁵ -2 × 10 ⁻²	10 ⁻²	3 × 10 ⁻³ -2 × 10 ⁻²
TIEMPO DE PRUEBA (h)	100	100	40	290	1000	100 - 170	5
ESFUERZO - CEDENCIA (MPa)	522	522	522	522	522	310 - 131	520-720
TENSION APLICADA (MPa)	310	49-290	310	200-315	310	CEDENCIA	450
IRRADIACION (n/m ²)						SI/NO	(2a7) × 10 ²⁴
DECAPADO QUIMICO HNO ₃ · HF			SI			SI/NO	
CATALIZADOR	Fe/O ₂		Fe			Fe	O ₂
TAMANO DEL GRANO (μm)				7-8		7-17	
TEMPERATURA RECOCIDO (K)						593-973	
TIEMPO RECOCIDO (h)						2	

RESULTADOS EXPERIMENTALES

VARIABLE	CATALISIS	TENSION	TEMPERATURA	TEXTURA	CONCENTRACION YODO	TEMPERATURA RECOCIDO	IRRADIACION
VALOR CRITICO	Fe/O ₂	217 MPa	493 K		2 × 10 ⁻⁵ g/cm ²	923 K	
OBSERVACION	HUBO FALLA	T _{FEC} > 217 ①	T _{FEC} > 493 K	NO INFLUYE	T _{FEC} > 2 × 10 ⁻⁵	T _{FEC} < 923 K	NO INFLUYO

① EQUIVALENTE A 4 × 10⁻³ g/cc (APROX. 81 MPa a 573 K)

② TF/LE TRABAJADO EN FRIO Y LIBERADO DE ESFUERZOS

TR - TUBO REDUCIDO

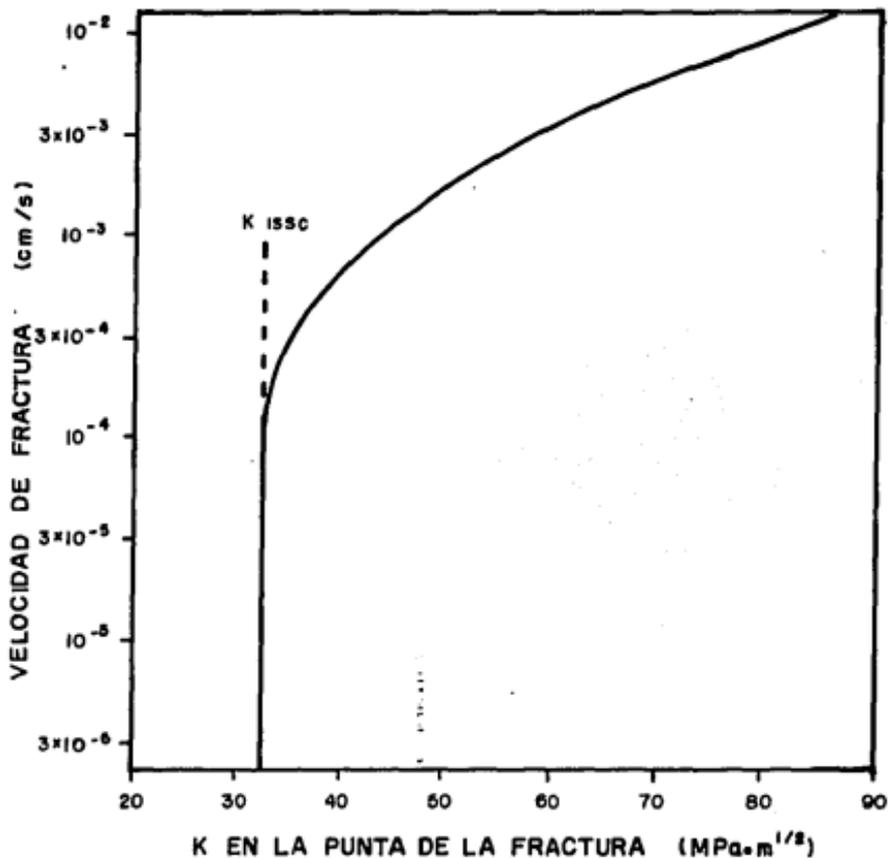
de la velocidad de falla y la intensidad de esfuerzo, se usaron barras con doble cantiliver para determinar el valor crítico para un espesor grueso en comparación con el de las vainas.

En la morfología de la fractura se observó que era esencialmente transgranular y que la estructura no jugó un papel importante en el mecanismo de falla por esfuerzos bajo corrosión. En las gráficas de la 1 a la 4 se muestran los comportamientos de:

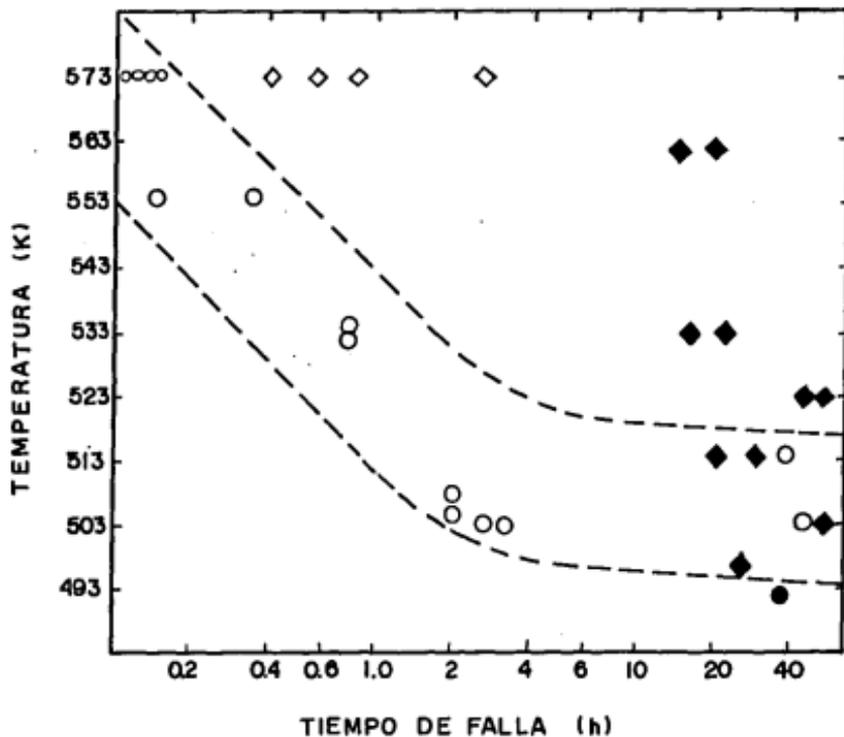
- a - velocidad de falla respecto de la intensidad de esfuerzo.
- b - Temperatura de prueba respecto del tiempo de falla.
- c - Concentración de yodo respecto del tiempo de falla.
- d - Esfuerzos residuales respecto de la temperatura de recocido.

En 1974 Wood (5) presentó información referente a la influencia de la composición del circaloy, esfuerzos residuales e historia de irradiación, sobre el mecanismo de FEC. Las pruebas se llevaron a cabo en forma similar a lo reportado en 1974 (4), incluyendo nuevos especímenes con diferentes grados de irradiación con neutrones de energía mayor a 1 Mev, en las cuatro condiciones siguientes:

- a - vainas procedentes de elementos combustibles de reactores de potencia irradiados en el intervalo de 7.7×10^{23} a 1.9×10^{25} n/m², con temperaturas interna y externa de la vaina de 613 K y 573 K respectivamente.
- b - Elementos combustibles simulados, sin combustible UO₂, irradiados en el intervalo de 2.4×10^{24} a 3.8×10^{24} n/m², que se montaron en un elemento combustible, a una temperatura interior de 563 K.
- c - Tubos sin UO₂ irradiados en el intervalo de 9.8×10^{24} a 11.6×10^{24} n/m².

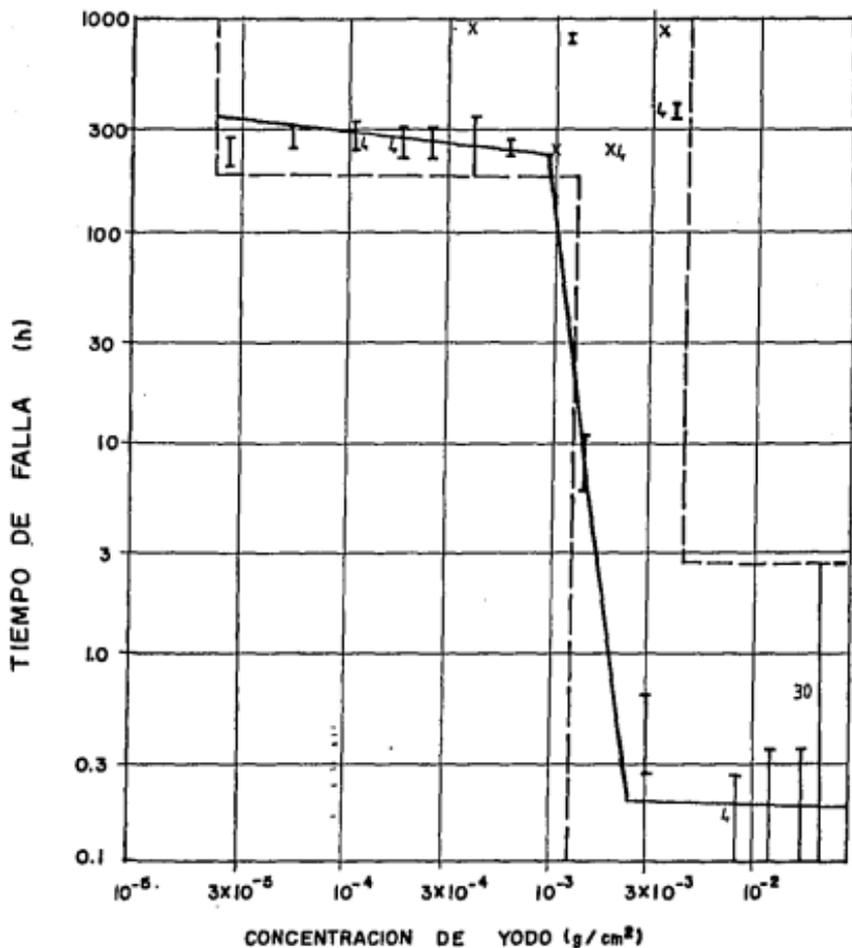


GRAFICA 1- VELOCIDAD DE FRACTURA DEPENDIENTE DE LA INTENSIDAD DE ESFUERZO, EN BARRAS DE DOBLE CANTILIVER EXPUESTAS A VAPORES DE YODO A 300 °C PARA CIRCALOY.



GRAFICA 2.- VARIACION DEL TIEMPO DE FALLA RESPECTO A LA TEMPERATURA PARA ANILLOS DE CIRCALOY, ESFORZADOS A 310 MPa CON SUFICIENTE YODO PARA OBTENER 3×10^{-3} g/cm² DE SUPERFICIE DE CIRCALOY, REFERIDO EN (3).

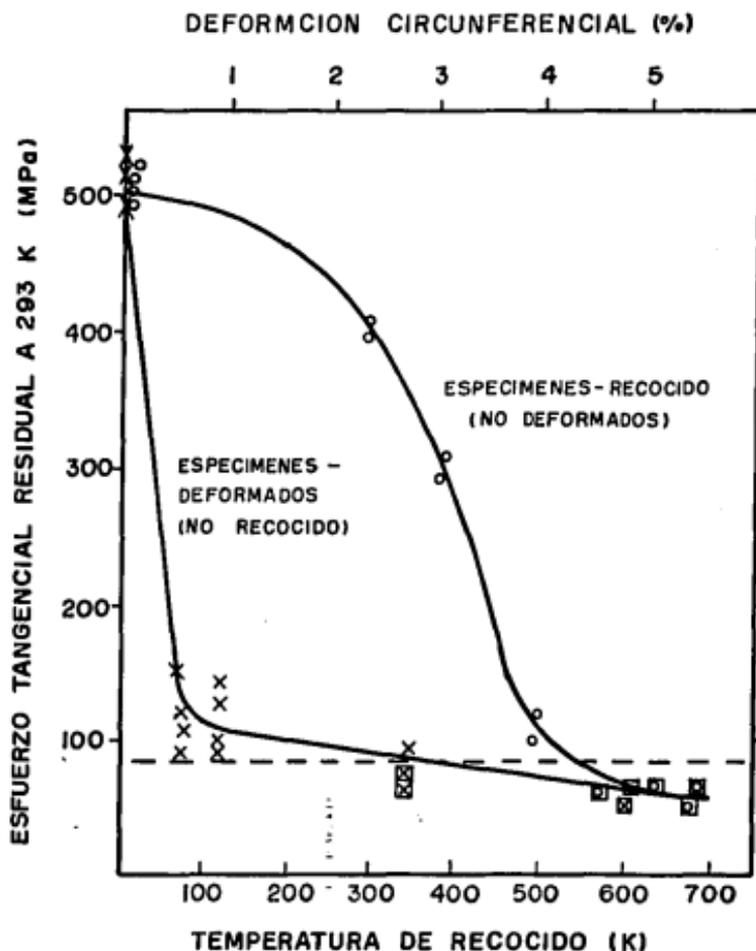
SUPERFICIE	FALLADO	NO FALLADO
NO TRATADA QUÍMICAMENTE	○	●
TRATADA QUÍMICAMENTE	◇	◆



GRAFICA-3.- VARIACION DEL TIEMPO DE FALLA RESPECTO DE LA CONCENTRACION DE YODO, PARA CIRCA-LOY BAJO TENSION DE 310 MPa.

— — — INFORMACION EXPERIMENTAL

———— CORRELACION TEORICA



GRAFICA 4:- ESFUERZO TANGENCIAL RESIDUAL EN FUNCION DE LA TEMPERATURA DE RECOCIDO EN LA QUE SE MUESTRA QUE LA LIBERACION DE ESFUERZOS RESIDUALES INCREMENTA LA RESISTENCIA A FEC DE ANILLOS DE -- CIRCALOY

d - anillos empacados con grafito pulverizado irradiados a 10^{24} n/m², en un reactor de prueba a 558-578 K de temperatura.

Los resultados se resumen en la tabla 3. Es de notarse que las muestras de referencia no expuestas a yodo en cantidades en exceso a las ya contenidas en las vainas, como resultado de su uso en el reactor nuclear, no fueron susceptibles a - FEC.

También determinó que en presencia de UO_2 los especímenes fallaron por FEC a fluencias mayores a 2×10^{24} n/m², y que por abajo de 8×10^{23} n/m² no hubo fallas de este tipo. El cambio en el comportamiento coincide con el efecto de incremento del valor del esfuerzo de falla, el cual fue de 5% - en el intervalo de $(0.5 - 2) \times 10^{24}$ n/m² y de 17% en el intervalo de $(2 - 3.5) \times 10^{24}$ n/m².

En 1980 D. Cubicciotti y colaboradores (6), presentaron información referente a los efectos de la temperatura de prueba, composición de la aleación y el agrietamiento superficial, sobre la susceptibilidad del circaloy a la FEC por yodo. Esta información se presenta en las gráficas de la 5 a la 10.

Así mismo reportan las experiencias adquiridas respecto de las técnicas de manufactura de tubos destinados a vainas para barras combustibles. Compararon material de dos proveedores que usaron métodos diferentes de fabricación ajustados a los estándares usuales ASTM B 353. Los especímenes se probaron tal y como se recibieron, así como después de pulirlos y liberarlos de esfuerzos, en ambientes con 0.006 gramos de yodo por cm² de superficie de circaloy a 593 K. El efecto de las variables analizadas se determinó en base al esfuerzo tangencial de falla respecto al tiempo de prueba o al tiempo requerido para la falla. El esfuerzo de estallamiento para los materiales analizados fueron 496 MPa y 490 MPa.

TABLA 3

AUTOR: J. C. WOOD (1974)-(5)

MUESTRA: ANILLOS

MATERIAL: CIRCALOY - 2 Y CIRCALOY - 4 MEDIO DE TENSION: CUÑA.

CONDICIONES EXPERIMENTALES

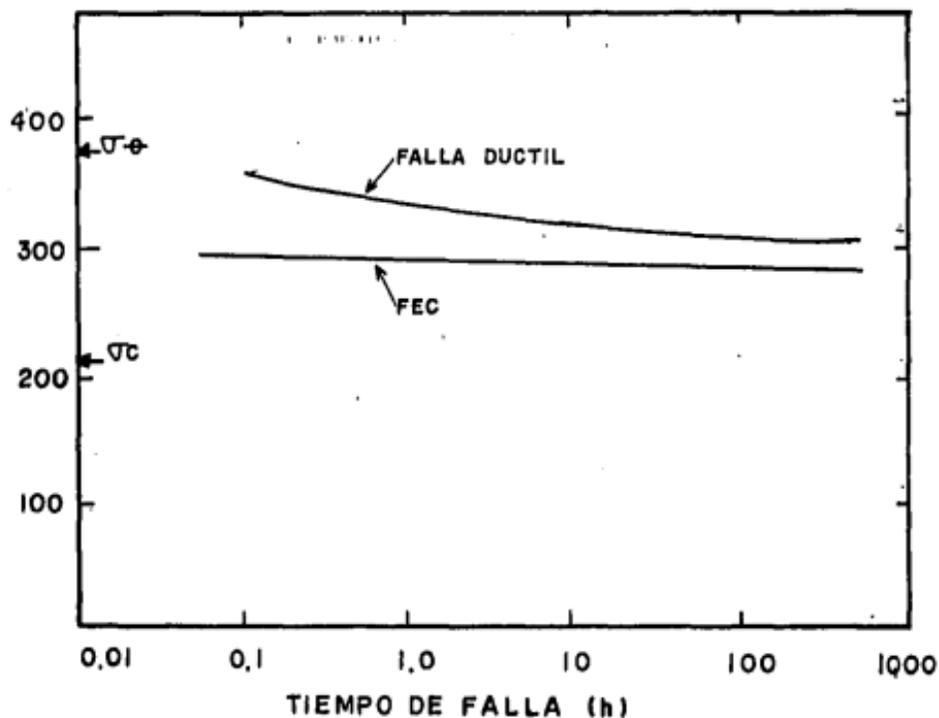
DEL MATERIAL	TR-LE y TR	TR-LE	TR-LE	MUESTRA - CONTROL *
TEMPERATURA (K)	573	573	573	573
I ₂ CONCENTRACION (mg/cm ²)	20	20	20	0
TIEMPO DE PRUEBA (h)	1000	10 - 20	28	10
TENSION APLICADA (MPa)	350 - 370	300 - 500	350 500	CEDECENCIA.
ESFUERZO-CEDECENCIA A 300K (MPa)	548 - 690	558	690	550
IRRADIACION (n/m ²)		10.77 - 19.110 ²⁴	(6.1 - 7.2)10 ²⁴	(2.1 - 19)10 ²⁴
AGENTE QUIMICO		UO ₂ - H ₂ O	AIRE	UO ₂
CATALIZADOR	Fe	AIRE	AIRE	AIRE
TAMAÑO DEL GRANO (μm)			2 - 6	
TEMPERATURA-RECOCIDO (K)	823	823	773-948	
TIEMPO - RECOCIDO (h)	2 - 4	4	4	
GRADQ DE RECOCIDO (%)	60 68	60	68	

RESULTADOS EXPERIMENTALES

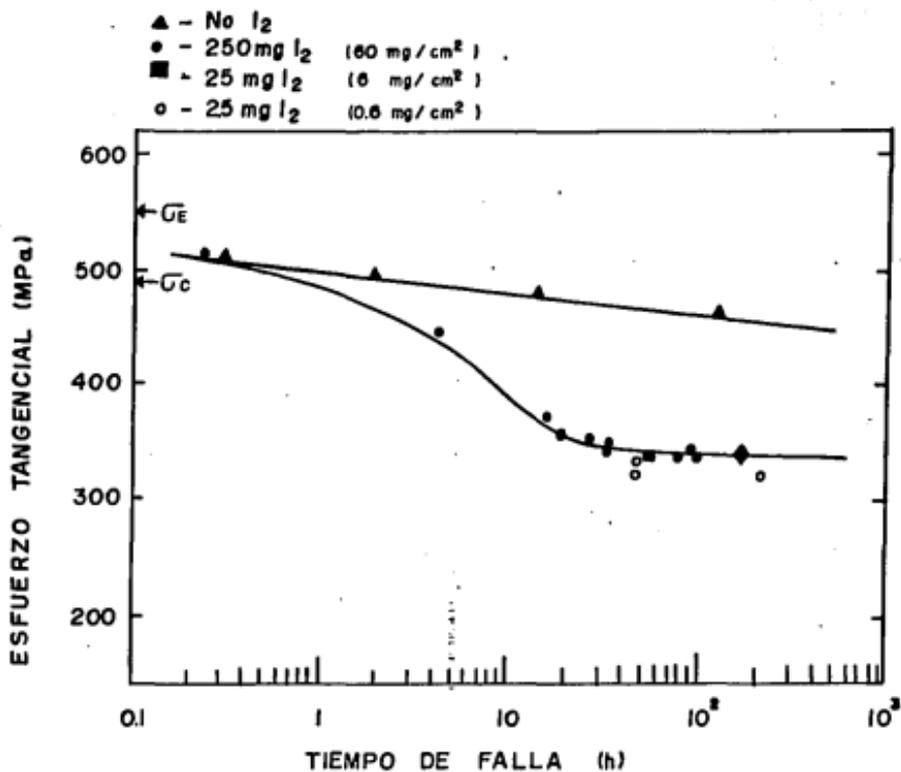
VARIABLE	ESFUERZO DE CEDECENCIA	FLUENCIA	FLUENCIA	SUCEPTIBILIDAD
VALOR CRITICO TR (60)	350-370 MPa	8x10 ²⁴ n/m ²	7.2x10 ²⁴ n/m ²	∅ FALLA
ESFUERZO CRITICO TR (68)	410 MPa	410 ± σ FEC=440	450 ± σ FEC=500	

* OBTENIDOS DE ELEMENTOS COMBUSTIBLES IRRADIADOS SIN LIMPIAR SUS SUPERFICIES INTERNA Y EXTERNA.

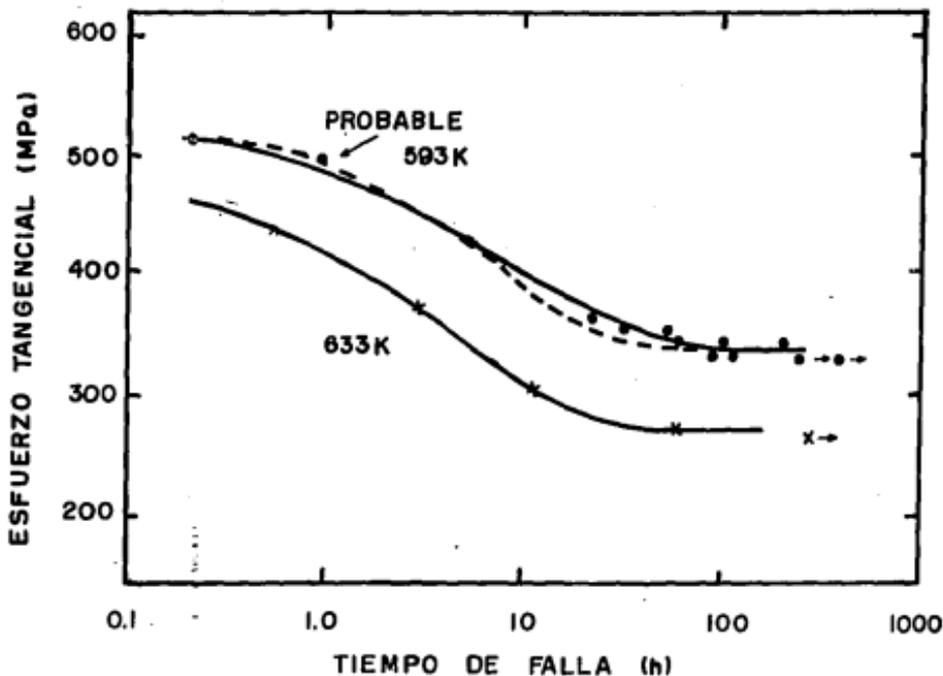
ESFUERZO TANGENCIAL NOMINAL (MPa)



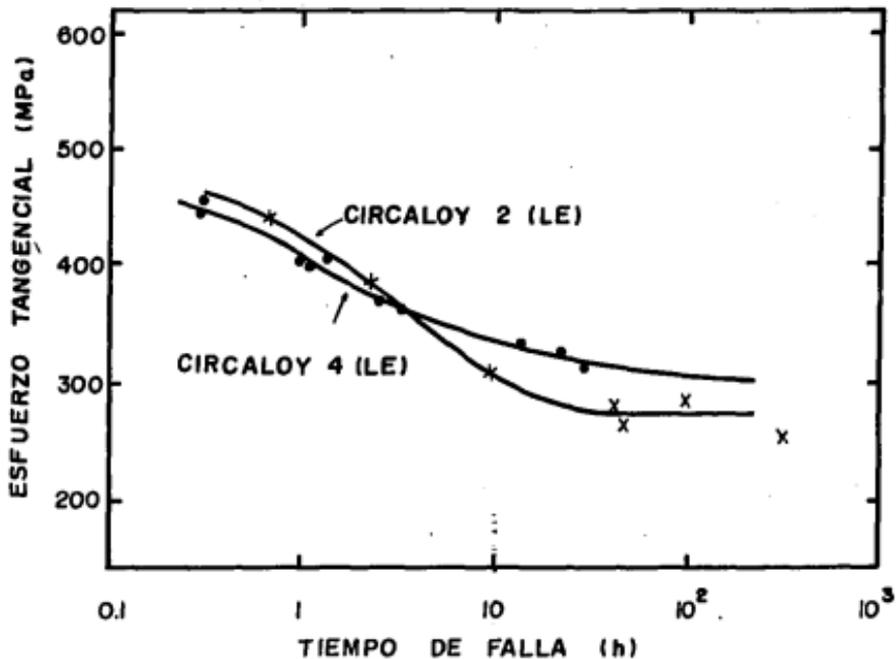
GRAFICA 5.- TIEMPO DE FALLA EN TERMINO DEL ESFUERZO NOMINAL TANGENCIAL PARA CIRCALOY-2 RECOCIDO, A 593 K. NO PRERANURADO.



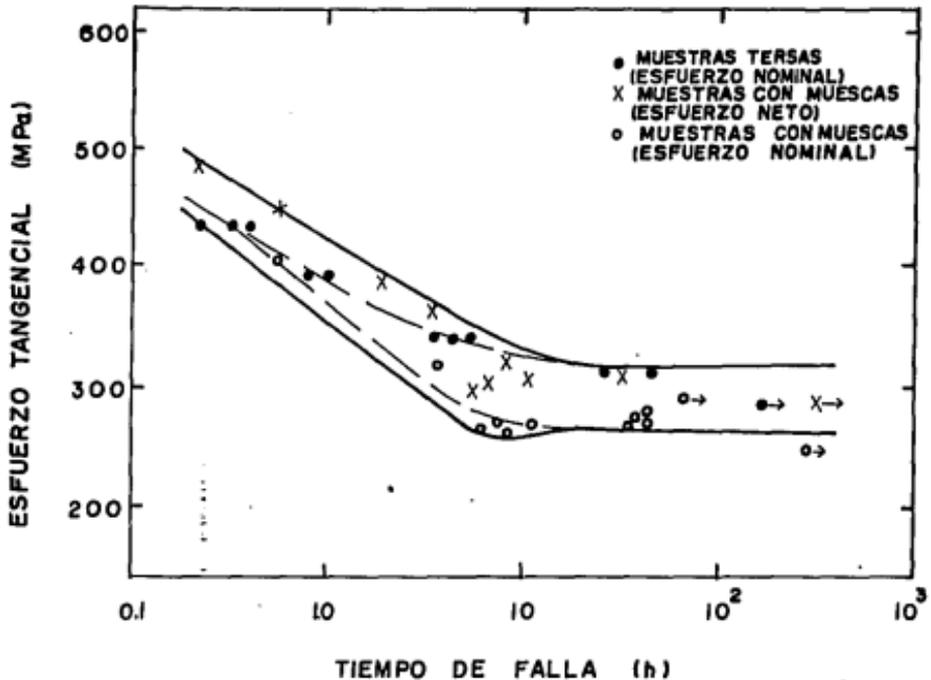
GRAFICA 6 - TIEMPO DE FALLA EN TERMINO DEL ESFUERZO TANGENCIAL PARA CIRCALLOY -2 (LIBERADO DE ESFUERZOS) A 593 K



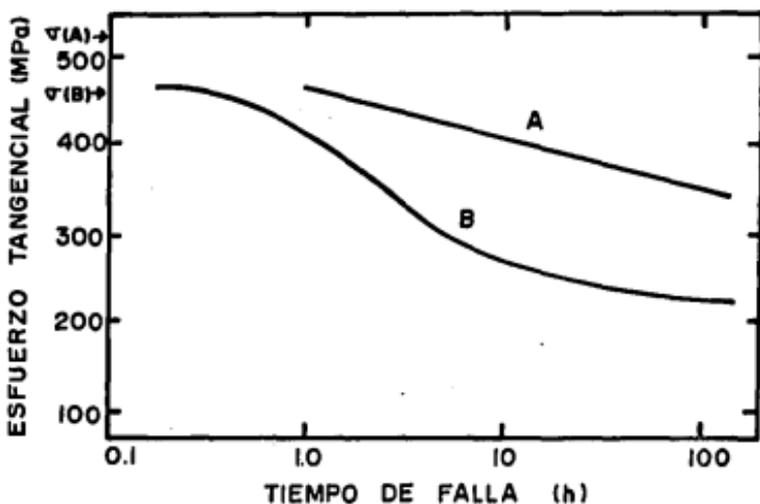
GRAFICA 7.- TIEMPO DE FALLA EN FUNCION DEL ESFUERZO TANGENCIAL, EN LA CUAL SE MUESTRA EL EFECTO DE LA TEMPERATURA DE PRUEBA SOBRE LA FEC POR YODO (0.006 g/cm^2), PARA CIRCALOY -2 LIBERADO DE ESFUERZOS.



GRAFICA 8: TIEMPO DE FALLA EN FUNCION DEL ESFUERZO TANGENCIAL, PARA CIRCALOY -2 Y CIRCALOY -4 LA CUAL MUESTRA EL EFECTO DE LA COMPOSICION QUIMICA SOBRE LA SUCEPTIBILIDAD A FEC, DEL CIRCALOY, A 633 K Y 6 mg/cm² DE YODO.



GRAFICA 9- TIEMPO DE FALLA EN FUNCION DEL ESFUERZO TANGENCIAL, LA CUAL MUESTRA EL EFECTO DE MUESCAS MAQUINADAS SOBRE EL COMPORTAMIENTO DE FEC POR YODO EN TUBOS DE CIRCALOY-4 (LE) PRESURIZADOS, A 633 K Y 6.0 mg/cm^2 DE YODO.



GRAFICA 10 - EFECTO DE LA FABRICACION SOBRE LA SUCEPTIBILIDAD A FEC DEBIDO A YODO EN CIRCALLOY-2, OBTENIDO DE DOS PROVEEDORES (A y B), A 633 K Y - 6 mg/cm² DE YODO.

D. Cubicciotti y R.L. Jones (7) resumen en 1978 información de pruebas a 630 K con anillos de circaloy-4 liberado de esfuerzo y a 590 K con anillos de circaloy-2 liberado de esfuerzo y recocido. Para el circaloy-4 se incluyeron pruebas con vainas irradiadas bajo una fluencia neutrónica estimada de 3.6×10^{25} n/m², obtenidas del reactor H.B. Robinson, cuyas condiciones superficiales fueron tersa y preranurada. El circaloy-2 fue probado en condición tal y como se recibió. Las concentraciones de yodo en el ambiente fueron de 0.00006, 0.0006 y 0.006 g/cm² de superficie de circaloy.

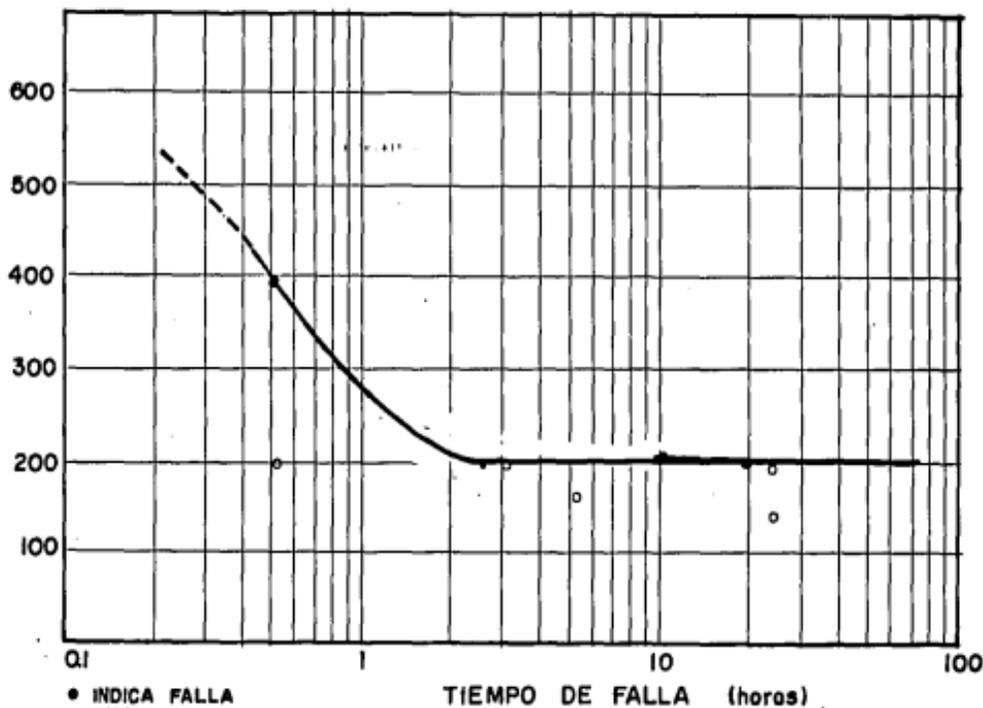
Los resultados se muestran en las gráficas 11 y 12 para el circaloy-4 y en la 6 para circaloy-2.

En el circaloy-4 se identificaron dos tipos de falla en los especímenes preranurados, cuya mayoría fueron del tipo orificio diminuto, y únicamente dos fueron del tipo rajadura axial. La fractografía mostró regiones de falla por FEC bien definidas orientadas radialmente, iniciándose en la preranura y terminando en un corte dúctil, cuya trayectoria fue transgranular. En la metalografía de las secciones transversales de la superficie de falla se observaron tres regiones, en las corregpondientes a FEC en general fueron aproximadamente paralelas a la dirección radial (perpendicular al esfuerzo tangencial) en tanto que las partes dúctiles de la falla fueron inclinadas a 45° de la dirección radial.

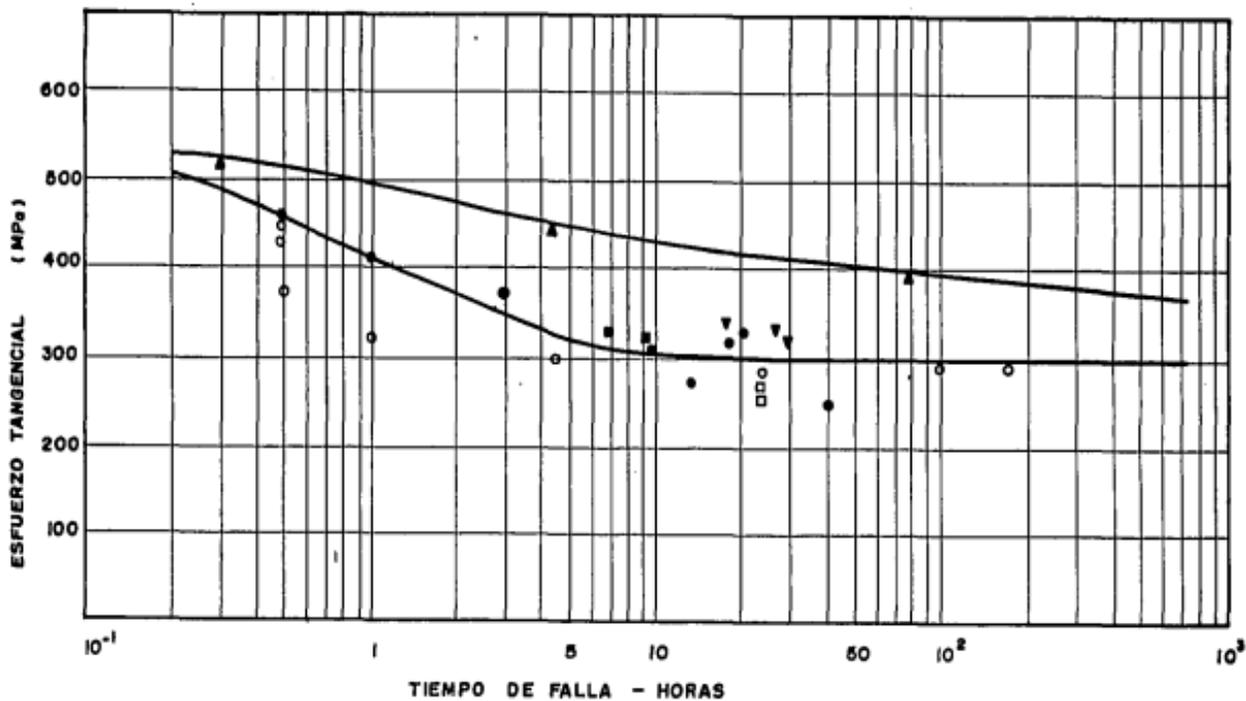
En los especímenes no ranurados, probados en condiciones similares, el menor esfuerzo tangencial fue de 305 MPa correspondiendo un tiempo de falla de 100, presentándose los dos tipos de falla antes mencionados.

Para el circaloy-4 proveniente del reactor H.B. Robinson el esfuerzo mínimo observado fue de 200 MPa para los especímenes probados en presencia de yodo, así como para uno probado -

ESFUERZO TANGENCIAL (MPa)



GRAFICA No. 12.- RESULTADOS DE PRESURIZACION DE TUBOS DE CIRCALOY - 4 IRRADIADO (3.6×10^{25} n/m²), EXPUESTO A UNA CONCENTRACION DE YODO DE -6×10^{-5} g/cm², A 630 K.



GRAFICA II- RESULTADOS DE PRESURIZACION DE TUBOS DE CIRCALLOY- 4 A 630 K Y A CONCENTRACION DE YODO 0.0(\blacktriangle), 6×10^{-4} (\blacktriangledown), 6×10^{-3} (\blacksquare) y 6×10^{-2} (\bullet) g/cm³ A 630 K.

\blacktriangle \bullet \blacksquare \blacktriangledown INDICAN FALLA

\circ \square \triangleright INDICAN NO FALLA

en presencia del combustible que poseía sin agregarle yodo. En las fallas se encontró yodo sobre las paredes de la grieta, su fractografía indicó FEC, la cual se debió al yodo agregado o a los yoduros residuales que permanecieron hasta antes de la prueba, mostrando tendencia a la división transgranular y rasgaduras plásticas asociadas con este fenómeno. Las configuraciones de las superficies de las fallas fueron similares a la de los especímenes no irradiados. El valor de la intensidad de esfuerzos asociada fue de $7.9 \text{ MPa}/\text{m}^{1/2}$.

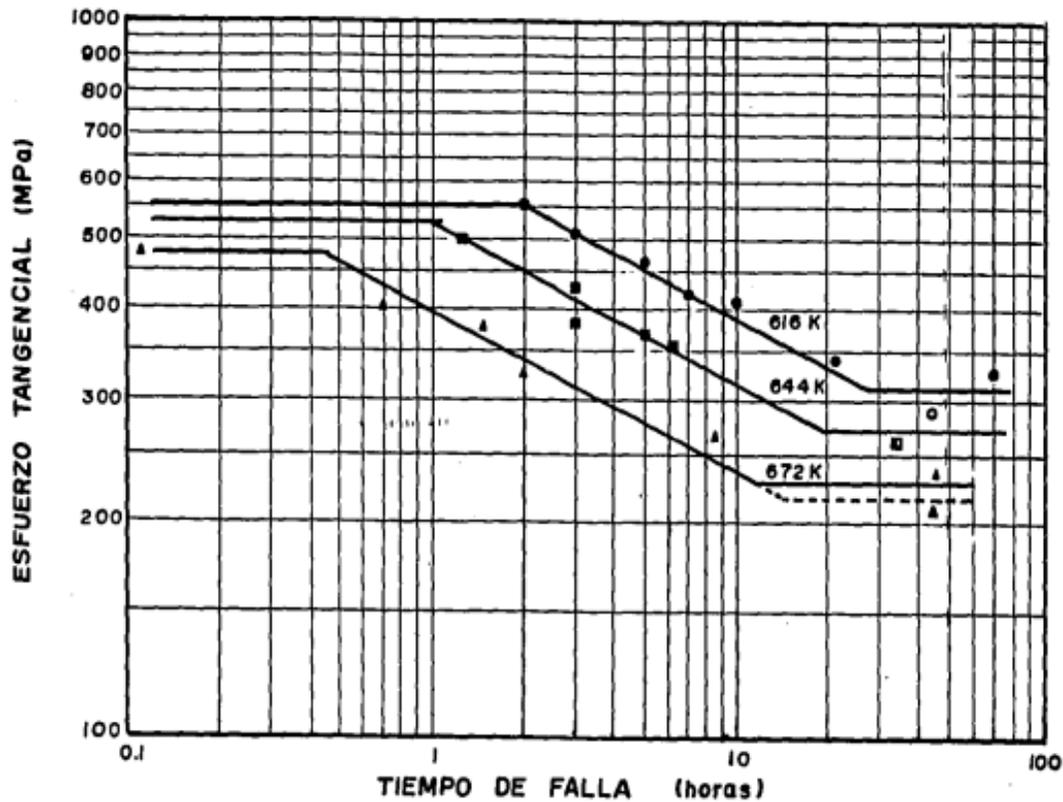
Para el circaloy-2 se presentaron también los dos tipos de falla, el orificio diminuto a bajos esfuerzos y la rajadura axial a altos esfuerzos. La apariencia en la región FEC fue similar a la del circaloy-4 y al final mostraron huecos alargados característicos del corte dúctil independientemente del tipo de falla.

Unos especímenes de circaloy-2 fueron recocidos a 770K durante 5 horas incrementándose la capa de óxido a $1.5 \times 10^{-6} \text{ m}$, al someterlos a prueba a 590 K en presencia de $0.006 \text{ g}/\text{cm}^2$, también presentaron los dos tipos de falla pero la región de FEC no penetró tanto en la vaina y contuvo más huellas de crecimiento intergranular que los especímenes no recocidos.

Entre sus conclusiones señalan que el esfuerzo tangencial es una variable más útil que la intensidad de esfuerzo para predecir las condiciones que inducen a FEC en tubos de circaloy sometidos a presurización interna.

En relación al efecto de la temperatura, Cubicciotti presenta información referente al circaloy-4 expuesto a un ambiente de yodo de $5 \times 10^{-5} \text{ g}/\text{cm}^2$, y a las temperaturas de 616, 644 y 672 K, la cual se representa en la gráfica.13.

Tucker y colaboradores (8) en 1976 presentaron información concerniente a experiencias llevadas a cabo con circaloy-4 no irradiado y liberado de esfuerzos; mediante presuri-



GRAFICA 13 - EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE EL TIEMPO DE FALLA PARA CIRCALLOY-4 EXPUESTO A 5×10^{-5} g/cm².

zación interna para generar esfuerzos tangenciales de 173 y - 345 MPa, bajo ambientes de yodo en el intervalo de 5×10^{-7} a 4×10^{-4} gramos de yodo por centímetro cuadrado de superficie de circaloy, a temperaturas de 630, 655 y 672 K.

Los tubos de circaloy se fabricaron en dos pasos de reducción en frío obteniendo dos lotes de especímenes, uno reducido al 66% y el otro al 71%, ambos liberados de esfuerzos, a 980 K durante 3 horas en el primer paso de fabricación y en el segundo paso a 700 K durante 5.5 horas. La profundidad de las estrías debidas al proceso de fabricación estuvieron en el intervalo de 2.05 a 6.5 micras.

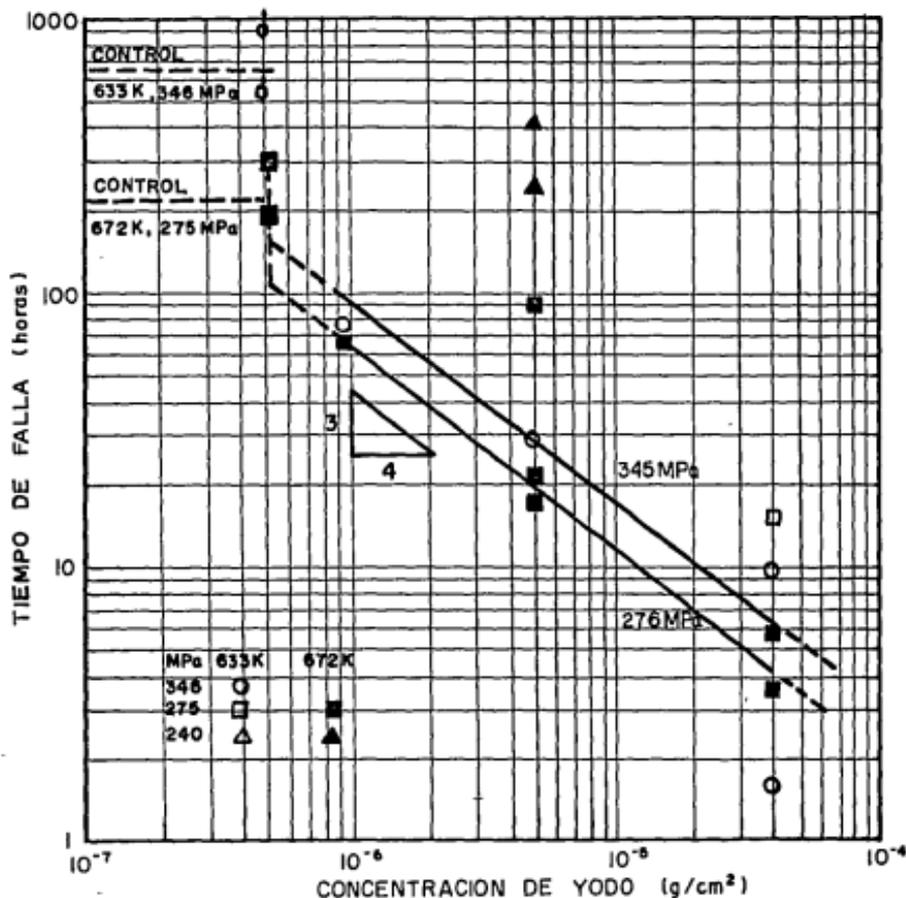
En la gráfica 14 se muestra la correlación entre el -- tiempo de falla y la concentración de yodo, para la que se obtuvo una expresión de la forma:

$$\frac{da}{dt} \propto C_I^{3/4}$$

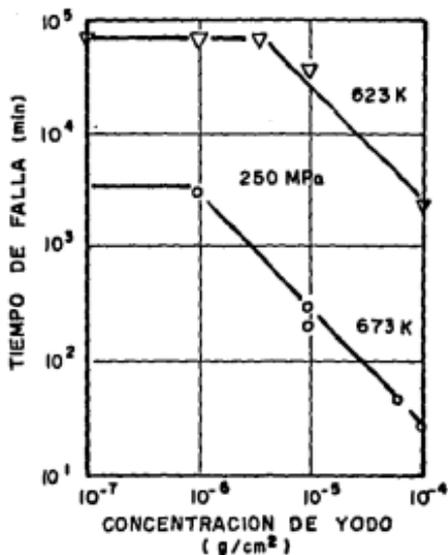
en donde da/dt representa la rapidez de avance de la grieta, C_I la concentración de yodo.

Yaggee y colaboradores (9) presentan en 1980 la información resultante de las experiencias realizadas con vainas de circaloy irradiado, procedentes de los reactores; H.B. Robinson, Quad Cities y Big Rock Point, con quemados de 6 a 30 MWd/kg-U y fluencias entre 10^{24} a 6×10^{25} n/m². Las pruebas se llevaron a cabo a concentraciones de yodo de 0.0006 a 0.06 g/cm², en el intervalo de temperatura de 593 a 633 K, los esfuerzos tangenciales aplicables estuvieron comprendidos entre 150 y 500 MPa. Esta información se presenta en las gráficas de la 15 a la 18 correspondientes a:

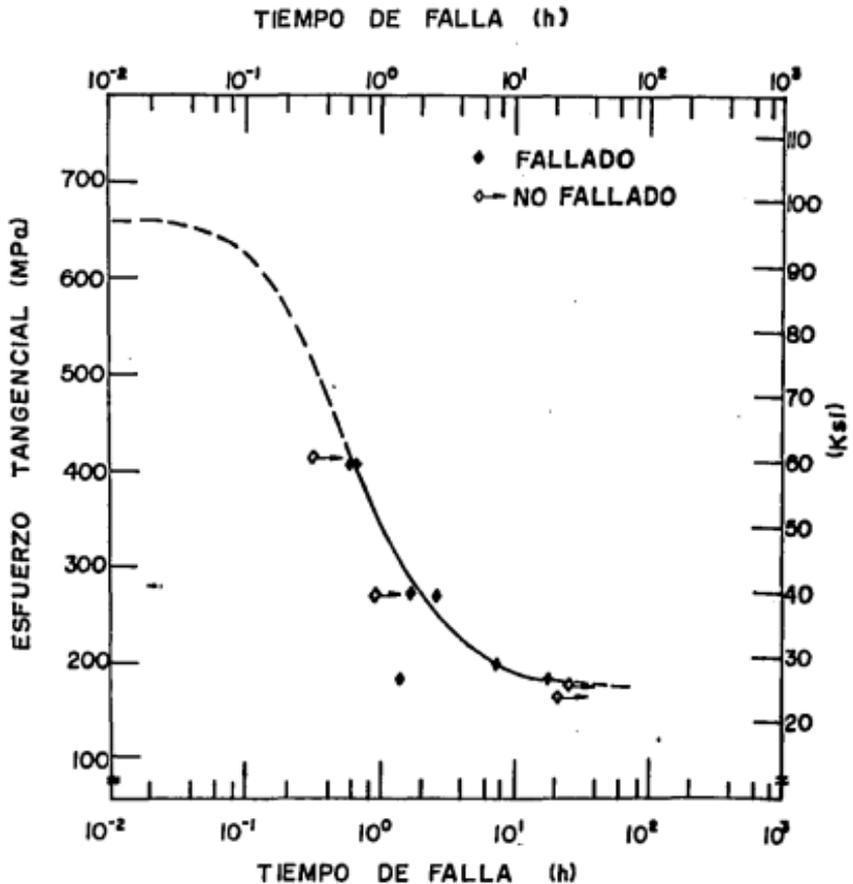
- 15 - Tiempo de falla en función de la concentración de yodo a 623 y 673 K bajo 250 MPa.
- 16 - FEC sobre vainas de "B.R.P. Reactor" a 598K y 4×10^{25} n/m².
- 17 - FEC sobre vainas de "Quad Cities Reactor" a 598 K, a 6×10^{-4} g/cm² y a 1.6×10^{25} n/m².



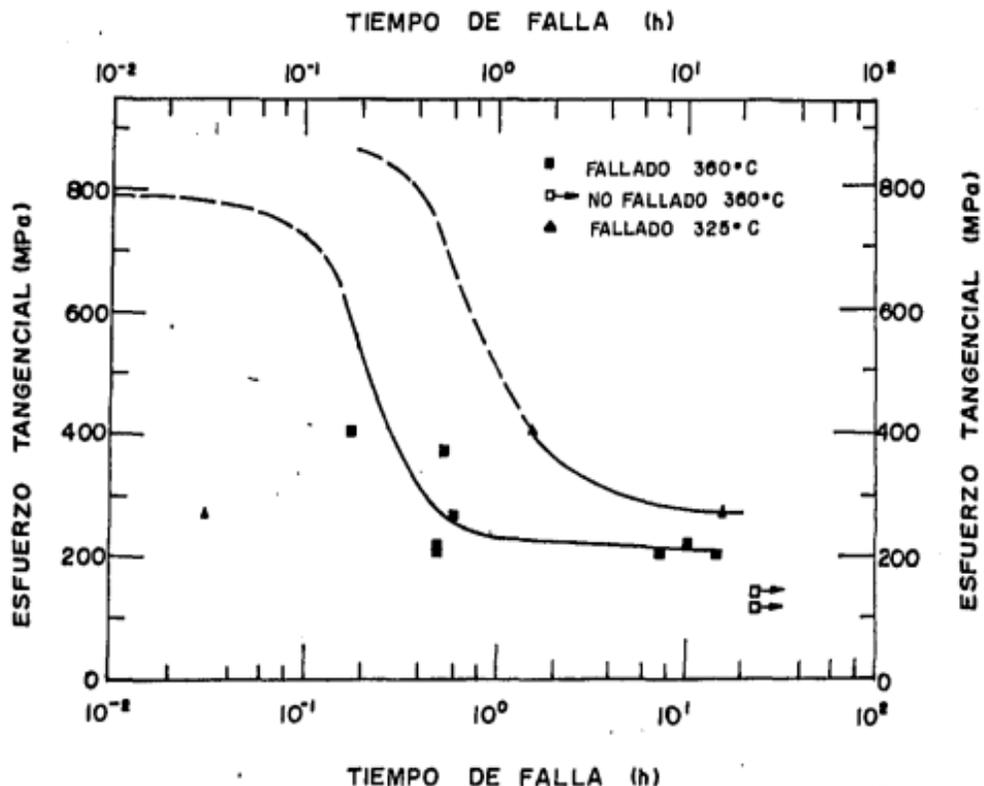
GRAFICA 14 - TIEMPO DE FALLA PARA TUBOS DE CIRCALOY, PRESURIZADOS INTERNAMENTE, EN FUNCION DE LA CONCENTRACION DE YODO. (8)



GRAFICA 15.- TIEMPO DE FALLA EN FUNCION DE LA CONCENTRACION DE YODO, A LAS TEMPERATURAS INDICADAS. (9)



GRAFICA 17: FEC SOBRE VAINAS DE QUAD CITIES REACTOR A: 598 K, BAJO 6×10^{-4} g/cm², EN EL INTERVALO DE 1.3 A 1.6×10^{25} n/m² Y UN QUEMADO DE 8.5 A 11 MW_e/Kg U. (CIRCALOY - 2 RECOCIDO).



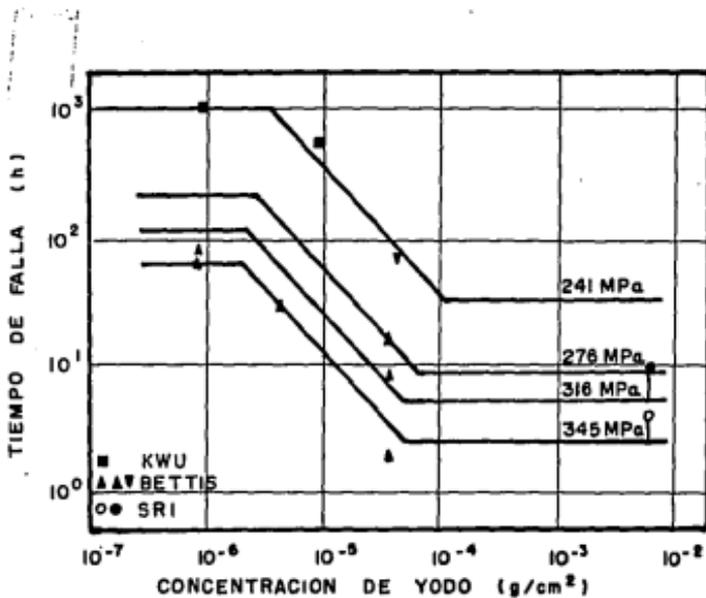
GRAFICA .18.-FEC SOBRE VAINAS DE HBR, A: 598 K Y 633 K, A $3.6 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$.
(CIRCALOY - 4 Y TF/LE)

18 - PEC SOBRE VAINAS DE H.B.R. Reactor a 598 y 633 K y 3.6×10^{25} n/m².

Miller y colaboradores (10) utilizan en 1981 la información de Yaggee relacionada con el comportamiento de vainas de circaloy procedentes de los reactores Quad Cities (C.C) H.B. Robinson (HBR) y Big Rock Point (BRP), en la que se conjugan la concentración de yodo, irradiación, temperatura y las variables relacionadas con la fabricación.

En la gráfica 19 se proporcionan los resultados obtenidos por tres centros de investigación (SRI, KWU, BETTIS) correlacionando el tiempo de falla con la concentración de yodo en el intervalo de 10^{-7} a 10^{-2} g/cm², para esfuerzos tangenciales de 241, 276, 316 y 345 MPa.

En relación al comportamiento del esfuerzo tangencial - respecto del tiempo de falla, para circaloy-2 y circaloy-4 a concentraciones mayores a 10^{-4} g/cm² y a las temperaturas de 590 y 633 K, respectivamente, usaron la información proporcionada por Cubicciotti (6,7)



GRAFICA 19: TIEMPO DE FALLA DEL CIRCALLOY-4 EN FUNCIÓN DE LA CONCENTRACION DE YODO A DIVERSOS ESFUEROS.(10)

A.2 - PRUEBAS EN REACTORES NUCLEARES.

Otro factor al que se le ha dado primordial importancia en este proceso de falla es el correspondiente al incremento de potencia tipo rampa y que ha sido objeto de investigación por diversas organizaciones internacionales vinculadas con la industria nuclear, a fin de establecer los umbrales para este tipo de falla en lo tocante a la velocidad de incremento de potencia.

En Studvick Suecia (11) se relacionó el incremento de potencia con el de la interacción pastilla-vaina y por consiguiente con el fenómeno FEC.

En Italia se probaron barras de combustibles tipo Cirene, en el PWR de Agesta con quemados en el intervalo de 2 a 2.5 MWd/Kg-U para los cuales se determinó un umbral de 20 KW/m a una rapidez de rampa de 300 W/m-s, para que ocurra el fenómeno FEC. Determinaron que a niveles superiores de potencia a ese umbral en 10 KW/m, la profundidad de la falla incipiente era proporcional al tiempo que se mantuvo el nivel de potencia alto, con lo cual concluyeron que la propagación de la falla está controlada por la rapidez.

Davis y colaboradores (1) reportaron los trabajos efectuados en el reactor de pruebas en General Electric (GETR), en los que utilizaron tres conjuntos de barras experimentales contruidas con barras combustibles tipo Dresden-1, así como con una barra de veneno (Al_2O_3, Gd_2O_3). El primer conjunto de barras construidas con la vaina que no estuvo expuesta a yodo (procedentes de la barra de veneno) irradiadas a 3.7×10^{21} n/m² se cargaron con UO_2 fresco. El segundo conjunto a base de vainas expuestas a yodo (procedentes de las barras de combustible irradiado) cargados con UO_2 fresco también. El tercer conjunto de control, se obtuvo de barras combustibles irradiadas que -

mantuvieron la integridad en sus constituyentes, y fallaron a rampas de potencia moderadas, en tanto que el primer conjunto resistieron rampas a niveles de potencia que excedieron 60 - KW/m, por lo que concluyeron que la irradiación no es primordial en este tipo de fallas, IPV. Posteriormente usaron elementos combustibles a base de vainas frescas y pastillas conteniendo productos de fisión simulados, los cuales presentaron FEC en forma reproducible, así mismo emplearon vainas - frescas con pastillas anulares de UO_2 frescas, rellenas con combustible altamente irradiado como fuente de productos de fisión (UO_2 con quemado de 15 Gwd/ ton.) que se operaron a 30 KW/m, las cuales resistieron rampas a altos niveles de potencia (60 KW/m) sin evidencias prácticas de fallas incipientes, después de hacer ajustes en el potencial oxígeno correspondiente a altos niveles de quemado del combustible de manera de lograr los niveles que se dan en barras combustibles, los especímenes fallaron a las 12 horas de prueba cuando la potencia se incrementó a 53 KW/m y a las 4 horas cuando el incremento fué de 60 KW/m.

Concluyeron que en la falla IPV la potencia pico posterior a una rampa, el tamaño de ésta y la exposición son -- las variables primordiales y que, la falla se sucede por la fragilidad inducida por los productos de fisión depositados en las regiones de la vaina sujetas a esfuerzos locales.

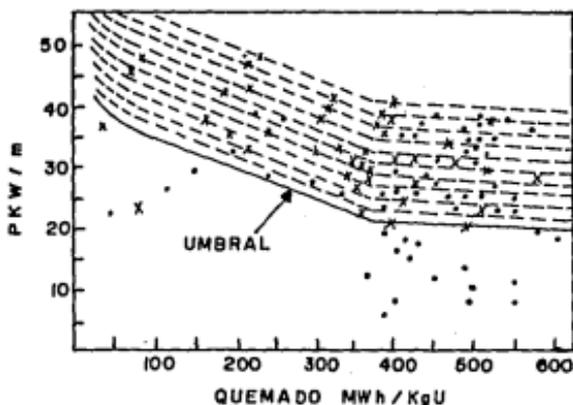
Wood(12) reporta que en las unidades CANDU de Pickering la liberación de productos de fisión gaseosos se incrementan notablemente a la potencia de 46 KW/m, valor que representa el umbral de estas unidades y que durante 15 años se ha observado que el incremento de potencia en los combustibles de la UO_2 , con vainas de circaloy, con quemados apreciables pueden sufrir defectos que según el consenso general se deben a FEC y que el yodo es un producto de fisión abundante capaz de in

ducir FEC cuando se exceda el esfuerzo crítico, manteniéndose durante tiempo suficiente.

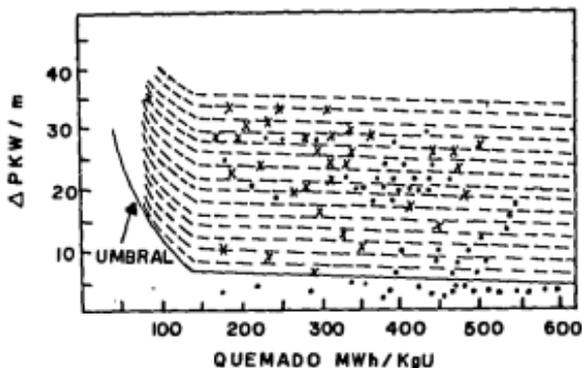
Asocia al quemado B con el inventario de yodo y la potencia incrementada P como reguladora de la temperatura del combustible y por tanto con la liberación de yodo. Si se lleva a cabo en la misma proporción que los gases nobles, implicaría que el umbral de la potencia para la falla IPV sería muy próximo a la concentración umbral de yodo. Y que el incremento de potencia ΔP podría gobernar el esfuerzo umbral para FEC.

En relación a vainas para BWR presentó información con la cual relacionó la potencia incrementada ΔP (KW/m), la potencia de la rampa P (KW/m), respecto del quemado B, lo cual se indica en las gráficas 20 y 21 y la correspondiente probabilidad de falla derivada de esta relación se muestra en las gráficas 22 y 23 .

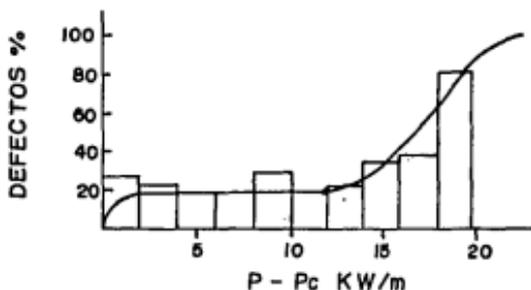
Garlick y Grovenor (13) en 1977 presentaron los resultados de los exámenes de los defectos bajo rampas de potencia inducidas en barras combustibles tipo "SGHWR", cuyas vainas fueron de circaloy-2 reducido y liberado de esfuerzos. Los experimentos se llevaron a cabo con cinco elementos cuya irradiación antes de la elevación de potencia fue suficientemente alta para asegurar evitar creep en la vaina, la rapidez de las rampas fueron: al final de la primera prueba de 1.2% por minuto, observándose pequeños defectos; en la segunda prueba, la rapidez de la rampa fue de 2.6 % por minuto con un máximo de 3.4 % por minuto al final de ésta, presentando indicaciones de defectos grandes a los 30 minutos después de alcanzar la potencia total. Estos últimos estuvieron alineados axialmente, sugiriendo que los esfuerzos tangenciales dentro del encamisado junto a las interfases de las pastillas de combustible tuvieron una participación importante en el proceso de falla, que es típico de -



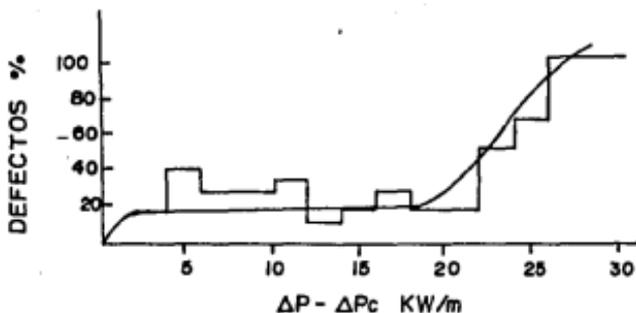
GRAFICA 20.- LINEA DE UMBRAL RELACIONANDO LA POTENCIA EN RAMPA CON EL QUEMADO DE ELEMENTOS INTACTOS (●) Y DEFECTUOSOS (x).- NO SE CONSIDERO LA RAPIDEZ DE LA RAMPA.



GRAFICA 21.- LINEA DE UMBRAL RELACIONANDO EL INCREMENTO EN POTENCIA Y EL QUEMADO DE ELEMENTOS DEFECTUOSOS (x) E INTACTOS (●). NO SE CONSIDERO LA RAPIDEZ DE LA RAMPA.



GRAFICA 22.- PORCENTAJES DE ELEMENTOS DEFECTUOSOS EN FUNCION DE LA ALTURA SOBRE LA LINEA DE UMBRAL. (GRAFICA II) J.C WOOD (12)



GRAFICA 23.- PORCENTAJES DE ELEMENTOS DEFECTUOSOS EN FUNCION DE LA ALTURA SOBRE LA LINEA DE UMBRAL. (GRAFICA 12) J.C. WOOD (12)

combustibles sujetos a incrementos de potencia, así como que fueron debidas al proceso de FEC. Las estimaciones de la concentración de yodo fue de $2 \times 10^{-4} \mu/\text{cm}^3$, considerando que esta concentración debe ser mayor en la punta de la grieta, tabla 4.

Reportan también que como resultado de pruebas realizadas sobre circaloy no irradiado, con muescas maquinadas en su interior a 350 K se obtuvieron en presencia de yodo esfuerzos de 380 y 415 MPa para tiempos de falla de 4 y 0.2 horas, a los que correspondieron valores de 6.5 y 5.8 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ de la intensidad de esfuerzo.

En 1981 Lowry y colaboradores (14), reúnen información referente al comportamiento de los esfuerzos tangenciales en función de la temperatura, para circaloy-4 irradiado obtenido de los reactores H.B. Robinson y Oconee-I. Las condiciones de irradiación de los especímenes fueron:

REACTOR	QUEMADO (NWD/TU)	IRRADIACION (n/m^2)
HBR	28,000	2.3×10^{25}
OCONEE-I (0)	0.0	0.0
OCONEE-I (1)	10,000	1.8×10^{25}
OCONEE-I (2)	20,000	4.0×10^{25}
OCONEE-I (3)	26,000	4.5×10^{25}

el intervalo de temperatura fue de 590 a 700 K. Para el material del HBR se tomó como referencia vainas fabricadas por Sandvik, los resultados se muestran en la gráfica 24

TABLA 4

AUTOR: A. GARLICK Y J. G. GRAVENOR (1977) - (13)

MATERIAL: 5 ELEMENTOS SGHWR - CIRCALOY 4

CONDICIONES EXPERIMENTALES

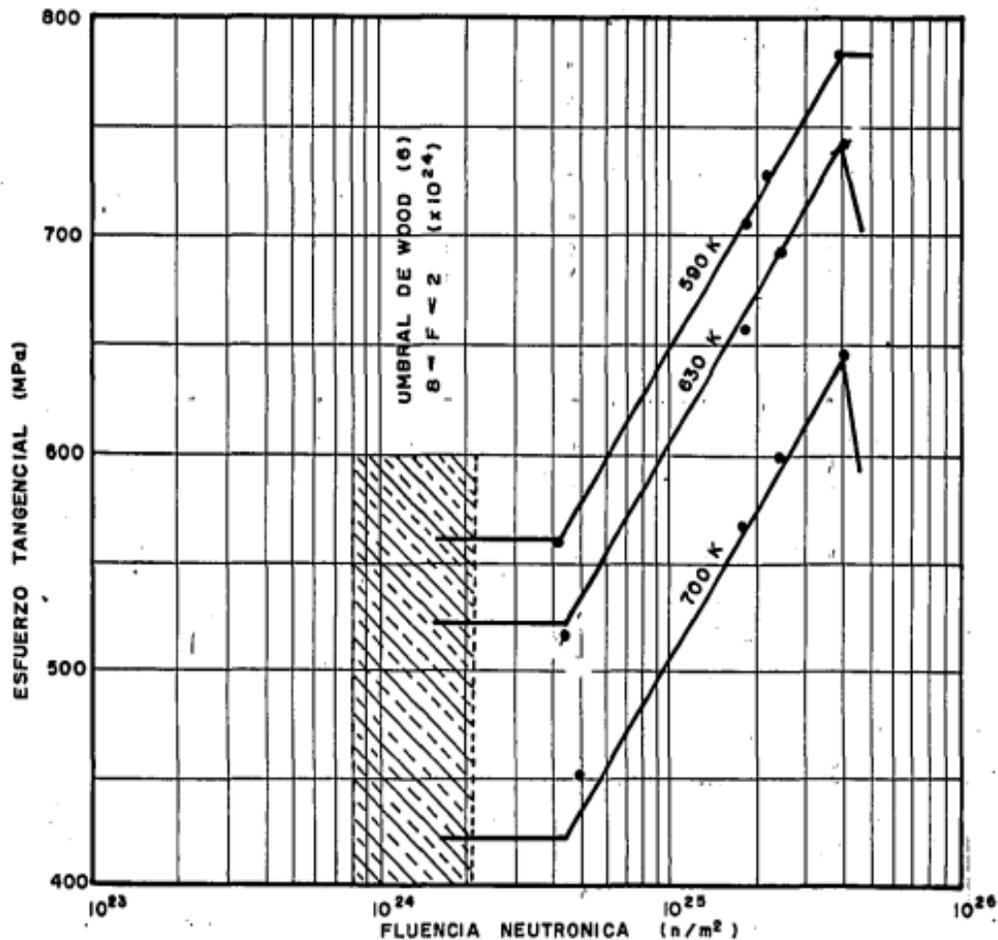
MATERIAL: ZIRCALOY - 4	LE	LE	LE	LE	LE
RAPIDEZ DE POTENCIA ⁽¹⁾ (%/min)	1	1	3	3	3
POTENCIA POR UNIDAD DE MASA ⁽²⁾ (PRERAMPA) $\frac{W}{gU}$	18/22.4	20/20.5	22/27	19.1/19.3	23/29
POTENCIA POR UNIDAD DE MASA ⁽²⁾ (POSRAMPA) $\frac{W}{gU}$	25.4/27.4	24.1/24.6	32.6/36	27.2/27.7	25.6/29.2
IRRADIACION (MWd / KgU)	6	7	5.6	10	5.9
"	"	"	"	"	"

RESULTADOS EXPERIMENTALES

VARIABLE: RAPIDEZ DE RAMPA (%/min)	1		3		
POTENCIA (W/gU)	27.4		36		
OBSERVACION	FALLA PEQUEÑA	INTACTO	FALLA GRANDE	INTACTO	INTACTO

(1) DATO CALCULADO

(2) VALORES: MINIMO / MAXIMO



GRAFICA 24 - INFLUENCIA DE LA IRRADIACION SOBRE EL ESFUERZO TANGENCIAL PARA CIRCALLOY-2, CON AUSENCIA DE YODO A 590 K, 630K, 700 K. (14)

B.-MODELOS EXISTENTES.

Wood en 1972 (4.) discute un mecanismo de fractura en el que considera que el único parámetro que puede cambiar por la presencia del yodo, es la energía superficial. Que la reacción Zr-I en la punta de la grieta reduce la energía necesaria para romper enlaces tipo Zr - Zr al crear enlaces intermedios Zr-I-Zr más débiles; o que la difusión de los átomos de yodo, alrededor de la punta de la grieta, une dislocaciones que conducen a trabajo plástico al frente de la grieta, disminuyendo la energía, por lo que la propagación de la grieta debería ser una función de la cinética de la reacción Zr-I ó de la rapidez de difusión del yodo en el circonio, sobre la punta de ésta. Debido a que considera únicamente concentraciones de yodo totales y no transitorias anormalmente altas, propone un ciclo similar al de Van Arkel y De Boer, consistente en que el yodo reacciona con el circonio formando diyoduro de circonio volátil que emigra ante gradientes de temperatura a regiones de menor potencial químico, en su recorrido este diyoduro se puede descomponer térmicamente o bien reaccionar con oxígeno, proveniente del combustible, liberando el yodo que se deposita en las paredes de la grieta como ZrO_2 , según figura número 1.

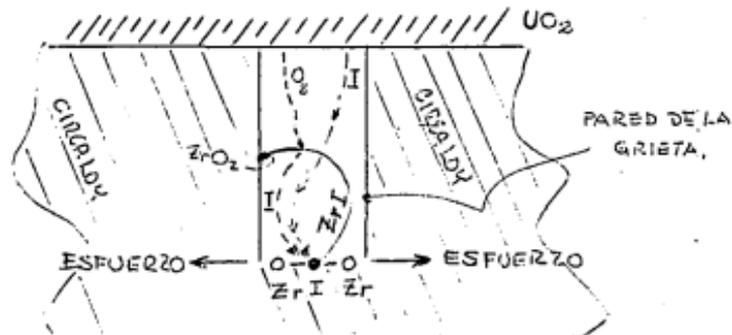


FIGURA 1. POSIBLE MECANISMO PARA LA FALLA DEBIDA A ESFUERZOS BAJO CORROSION, EN VAPORES DE YODO, EN EL QUE EL YODO SE RECIRCULA EN EL INTERIOR DE LA GRIETA.

En 1975 Kreyms y colaboradores (15) presentaron un análisis sobre el estudio realizado por Busby, Tucker y McCauley, en el documento WAPD-TM 1149-1974, referente a FEC por yodo en tubos de circaloy-4 liberado de esfuerzos y recristalizado. Para éllo estableció una correlación de la rapidez de propagación de FEC (da/dt) bajo cargas estáticas y la intensidad de esfuerzo K_I , basandose también en los resultados obtenidos por Wood (4). Graficando la velocidad de la grieta contra K_I , según gráfica 1 expresada en forma log-log, obtuvo una línea recta de pendiente 4, o sea:

$$\frac{da}{dt} = C K_I^4 \quad -(1)$$

$$K_I = \sqrt{\sigma a} \quad Y \quad -(2)$$

$$t_f = \int_{a_0}^{a_c} \frac{da}{(da/dt)}$$

en donde:

a - es la profundidad de la grieta.

t_f - tiempo para la propagación de una grieta inicial de tamaño a_0 hasta un tamaño crítico a_c . O sea el tiempo de falla.

Y - factor de calibración que considera el ancho finito de un defecto. Es función de la geometría de la grieta y de las condiciones de carga.

σ - esfuerzo nominal de tensión, normal a la muesca.

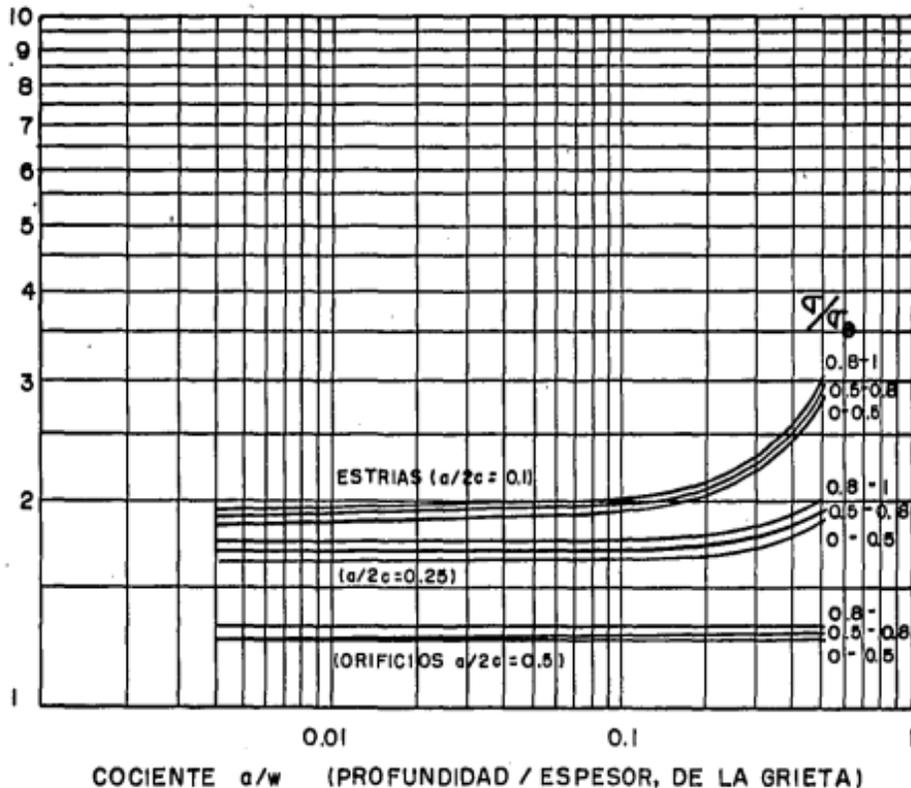
En la gráfica 25 se dan algunos valores de Y para grietas parciales con varias relaciones radiales a/w

La solución de la ecuación es:

$$t_f = \frac{1}{C Y^4 \sigma^4 w} ((1/a_0) w - (1/a_c) w) \quad -(3)$$

en donde: w - representa el espesor de la pared de la vaina. rescribiendo la ecuación:

FACTOR DE CALIBRACION "Y" DE
INTENSIDAD DE ESFUERZO ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$)



GRAFICA 25: FACTOR DE CALIBRACION "Y" DE INTENSIDAD DE ESFUERZO EN FUNCION DE (a/w) . (C =RADIO MAYOR DE LA GRIETA), CODIGO ASME BOILER SECCION III.

$$\log \sigma = \log \left\{ (1/ CY^4 w)(w/a_o - w/a_c) \right\}^{0.25} - (1/4) \log t_f$$

Esta ecuación la utilizó como básica para interpretar los datos de FEC para tubos de circaloy-4 con pared delgada con espesor nominal de 0.3 mm, presentados por Busby (16), los que se resumen en la gráfica 26 y que corresponden a tubos presurizados internamente con argón, conteniendo suficientes cristales de yodo para generar una concentración en el intervalo de 0.005 a 0.08 g/cm² de superficie de circaloy, los cuales fueron reducido en frío al 56% y recristalizado a 936 K y reducido en frío al 61.5% y liberado de esfuerzo a 769 K, mismos que contuvieron respectivamente: ranuras o depresiones alargadas reportadas como grietas semielípticas con una relación a/w de 0.1 a las que correspondieron un valor de Y de 2.0, y, depresiones u hoyuelos superficiales redondeados reportados como grietas semicirculares con una relación a/w de 0.5 correspondiéndoles un valor de factor de calibración para la intensidad de esfuerzo Y de 1.268. En ambos casos las profundidades de las grietas fueron de 0.5micras.

La evaluación del parámetro C se llevó a cabo para las temperaturas de 633 K y 673 K para ambos materiales liberados de esfuerzos y recristalizado a los esfuerzos de 42700 psi y 30000 psi respectivamente, obteniendo:

TABLA 5

T (K)	C (psi ⁴ -pulg-min) ⁻¹	
	LIBERADO DE ESP,	RECRISTALIZADO
360	1.45 x 10 ⁻¹⁹	0.89 x 10 ⁻¹⁹
400	8.10 x 10 ⁻¹⁹	8.9 x 10 ⁻¹⁹

Con estos valores de C y considerando esfuerzos en el intervalo de un esfuerzo mínimo σ_{min} correspondiente a una intensidad de esfuerzo K_{IFEC} y el esfuerzo de estallamiento; se tiene:

$$\sigma_{\min} = K_{IFEC} / Y \sqrt{a_0}$$

$$a_c / w = 1 - (\sigma / \sigma_{\theta})$$

en donde: a_0 - profundidad inicial de la falla.

a_c - profundidad crítica de la falla a la cual ocurre la ruptura dúctil.

σ_{θ} - esfuerzo de estallamiento.

Se concluyó:

- 1 - El esfuerzo mínimo σ_{\min} o el crítico σ no es un valor único, sino que dependen del tamaño y geometría de los defectos superficiales.
- 2 - La concordancia entre los tiempos de falla predichos y los observados, es buena para la región intermedia de esfuerzos; confirmando la validez de la relación para K_{IFEC} .
- 3 - La pendiente de -0.25 predicha, apoya el valor 4 del exponente de K derivado por Wood.
- 4 - El criterio $a_c/w = 1 - (\sigma/\sigma_{\theta})$, proporciona una predicción excelente de la información de los datos de falla en la región de altos esfuerzos.

Con objeto de observar el comportamiento con respecto a la temperatura, compararon las velocidades de falla en presencia de yodo a 0.05-0.08 g/cm² derivadas a 633 y 673 K, contra los reportados por Wood a 573 K en presencia de vapores de yodo a una presión de 1 atm.

Para esto determinó la energía de activación considerando:

$$d a = w d(a/w)$$

$$\frac{d(a/w)}{dt} = C \sigma^4 Y^4 (a/w)^2 w$$

y al factor: $C \sigma^4 Y^4 w$, lo consideró una constante de rapidez la cual toma la forma de Arrhenius:

$$k(T) = C \nabla^4 Y^4 w = k_0 \exp(-Q/RT)$$

Con lo que resulta:

$$C = (k_0 / Y^4 \nabla^4 w) \exp(-Q/RT)$$

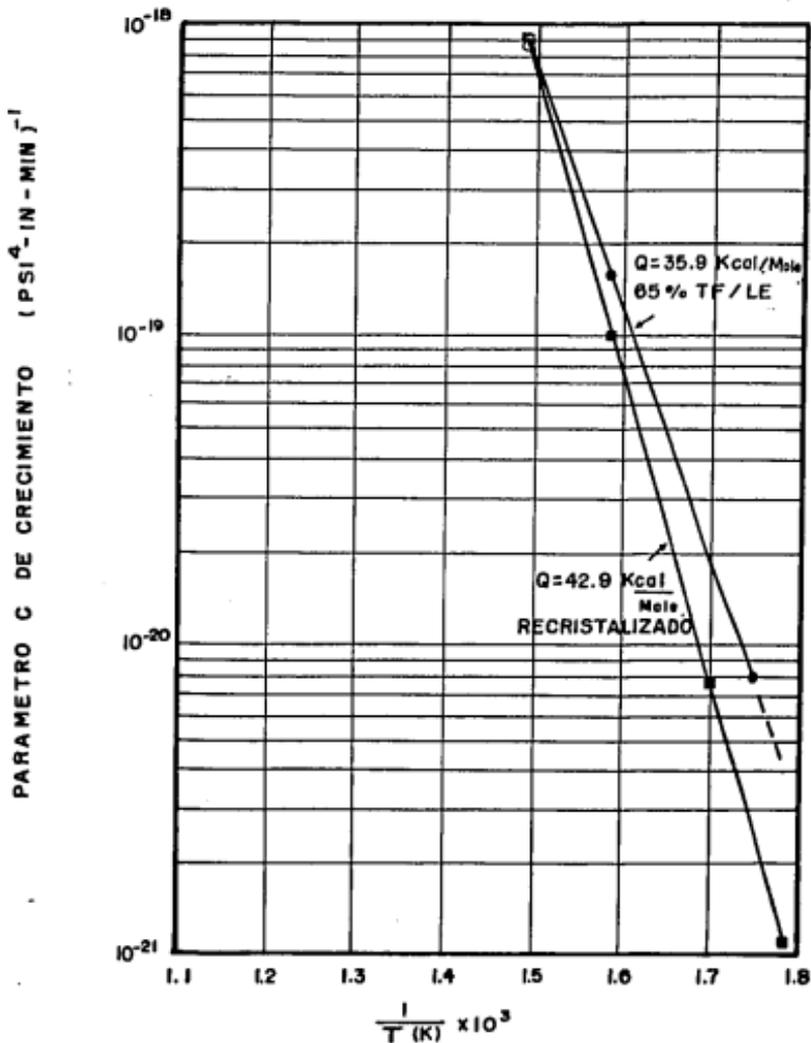
Y, ∇ , w se consideran independientes de la temperatura, diferenciando respecto a (1/T):

$$Q = -R \times 2.303 \times \frac{d(\text{Log } C)}{d(\text{Log}(1/T))}$$

En donde: $k(T)$ - constante de rapidez
 k_0 - constante de Arrhenius
 Q - energía de activación para FEC
 R - Constante Universal de los gases

En la gráfica 27 se representa el comportamiento de C con respecto a 1/T, observandose valores de 42.9 y 35.9 Kcal/mole para circaloy recristalizado y circaloy liberado de esfuerzo, respectivamente. Tomando en valor de 35.9 para Q y de 655 K para la temperatura, obtuvieron los valores de la gráfica 26, - existiendo concordancia con los datos experimentales representados por círculos.

E. Smith (17) presenta en 1978 un modelo para la propagación de fallas en vainas de circaloy sujetas a incrementos de potencia. El modelo supone que existe de antemano una pequeña ranura (orificios, estrías, requesbrajaduras) sobre la superficie interna de la vaina a fin de que se induzca la formación de FEC durante el incremento de potencia. Se analiza la propagación de una falla en circaloy irradiado, cuyo mecanismo se basa en una tendencia a la división (cleavage) asistida químicamente a lo largo de los planos cristalinos cercanos a los planos básicos de las estructuras hexagonales compactas y por deformación plástica de los granos que no están orientados a la tendencia de división, que caracteriza a la corrosión bajo esfuerzos de modo transgranular en el circaloy.



GRAFICA 27.- DEPENDENCIA EN LA TEMPERATURA DE
FEC POR YODO DE TUBOS DE CIRCALLOY-4

El modelo considera una zona de proceso de falla rodeada por una zona plástica y dependiendo de la interacción existente entre estas dos zonas, quedan determinadas la propagación y la velocidad de la falla, según se muestra en la fig.2

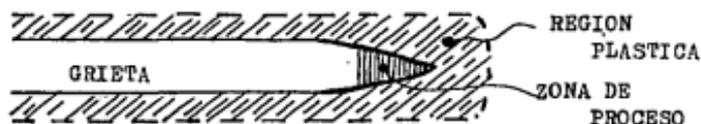


FIGURA 2.

Al relacionar el modelo con el tamaño de la zona plástica asociada con la propagación de la falla observó que ésta procede a una intensidad de esfuerzo de $8 \text{ MPa(m)}^{0.5}$ o más, - en la punta de la falla, valor similar al de $9 \text{ MPa(m)}^{0.5}$ - obtenido en las pruebas con barras con doble cantiliver de - circularloy no irradiado en presencia de un ambiente de yodo, - presentados por Cox en 1974. El modelo predice que el valor - de umbral del esfuerzo para la formación de una falla es una - fracción entre 0.3 y 0.5 del esfuerzo de cedencia del circa - loy irradiado.

Shann y Olander (19) presentaron un modelo para el crecimiento de las fallas en un sólido fragilizado por FEC expresado en término de la rapidez de crecimiento.

$$\frac{da}{dt} = A_0 p^n \exp(-E/RT) \exp(B_0 K/T)$$

$$K = Y \sqrt{\sigma}$$

en donde:

A_0, B_0 - son constantes

T - temperatura de la muestra

p - presión parcial de la especie químicamente activa

E - energía de activación

a - longitud de la falla

K - intensidad de esfuerzo

Y - factor geométrico de calibración

- σ - esfuerzo tangencial
 R - constante universal de los gases
 t_f - tiempo de falla

$$t_f = \frac{1}{A} \int_{a_0}^{a_c} \exp(-B\sigma\sqrt{a}) \, da$$

$$t_f = \frac{2 \exp(1+B\sigma\sqrt{a_0}) \times (-B\sigma\sqrt{a_0}) - \exp(-B\sigma\sqrt{a_c}) \times (1+B\sigma\sqrt{a_c})}{AB^2\sigma^2}$$

en donde:

$$A = A_0 p^n \exp(-E/RT)$$

$$B = B_0 Y / T$$

a_0 - profundidad de la falla pre-existente

a_c - longitud de la falla a la cual el esfuerzo de la sección neta iguala al esfuerzo de ruptura σ_r

$$\sigma_r = \sigma w / (w - a_c)$$

w - espesor de la pared del tubo (vainas)

Este modelo considera que la falla se propaga desde a_0 hasta a_c , punto en el cual ocurre una falla dúctil.

Este modelo fue aplicado con éxito ante FEC por yodo - en condiciones de presión constante y ante cambios de presión. Para determinar los valores de las constantes se usaron los datos reportados en la referencia (7), los resultados fueron confrontados con los reportados por Jones (18), obteniendo una precisión del 100% para el caso de presión constante y para cambios de presión hubo desviaciones grandes que fueron atribuibles a variaciones en los esfuerzos aplicables, cuya incertidumbre fue de $\pm 5\%$.

Para su aplicación el modelo se basa en la FEC por yodo en el que las expresiones son válidas para esfuerzos mayores - al de umbral, el cual debe determinarse experimentalmente, este esfuerzo es una fracción sustancial del esfuerzo de cedon

cia y no toma en cuenta explícitamente las variaciones en la textura del espécimen aún cuando esto pudiera tener influencia sobre las constantes A_0 y B_0 .

Garlick y Gravenor (13) sugieren un mecanismo para FEC que considera la iniciación a 593 K, dependiente de la penetración del yodo en la película de óxido que se forma en el interior de las vainas. Tal penetración facilita la concentración de deformaciones sobre las fronteras de los granos de circonio, especialmente si su orientación es favorable, provocando que las zonas expuestas al yodo se conviertan en trayectorias activas - para la reacción Zr-I que induce a la penetración intergranular.

Consideran también que a 573 K y a una rapidez de deformación moderada puede proceder la falla por tendencia a la división (cleavage) cuando la orientación de los granos al frente de la grieta es favorable, o sea una falla transgranular. Si esta condición no se da, entonces la falla avanza penetrando a través de los bordes de los granos del metal de modo intergranular. Otro aspecto que asocian con el avance es la deformación plástica en las regiones adyacentes a los planos con tendencia a la división, que aún cuando no constituye una característica primaria en la propagación de la falla, requiere de un consumo considerable de energía de deformación.

De la aproximación de un mecanismo lineal de falla elástica, se espera que el frente de la falla avance por tendencia a la división cuando K_{IFEC} se excede. Sin embargo se sabe que la transición de la propagación transgranular a la intergranular no depende únicamente de K ; por lo que introdujeron el concepto de la integral de contorno J que permite considerar los efectos de deformación plástica sobre el desplazamiento de la punta de la grieta. Por lo que suponen que la rapidez de propagación se expresa en término del incremento de la integral de contorno:

$$\frac{da}{dt} = f(\Delta J) = f(J - J_{IFEC})$$

obteniendo:

$$\frac{da}{dt} = f(1.25 (2 C_p/C_e + 1) \sqrt{W a/E} - J_{IPEC})$$

$$J_{IPEC} = 2 K_{IPEC}^2 / E$$

en donde:

C_p - factor de deformación plástica.

C_e - factor de deformación elástica.

a - tamaño de la fractura.

E - módulo de Young.

Como se observa la rapidez de crecimiento debe ser directamente proporcional al tamaño de la falla "a" y a la deformación plástica C_p .

Concluyeron que el papel del yodo no es tan claro que cinéticamente la probabilidad de que el yodo se difunda a distancias del orden del radio de la punta de la falla puede ser despreciable de modo que la tendencia a la división no depende de éste.

J.C. Wood (12) utilizó el modelo "FUELOGRAM" derivado para predecir probabilidades de defectos tipo IPV en ensambles combustibles CANDU, para evaluar el criterio del comportamiento de combustibles BWR basándose para éllo en la información obtenida durante la operación de este tipo de reactores, misma que se muestra en las gráficas 20 y 21.

Los "PCI-GRAMAS" relacionan la probabilidad de defecto con el incremento de potencia ΔP , la potencia P de la rampa en KW/m, el quemado B en KWh/KgU y el tiempo t de duración de la rampa. Las ecuaciones que describen el criterio de umbral de tales gráficas se basan en el tiempo de permanencia y el quemado, de la siguiente manera:

$$P_c (\text{KW/m}) = 44.6 + 232/B - 22 (0.5 - \exp(-2.3 t))$$

$$\text{para } 30 \leq B < 80$$

$$P_c(\text{KW/m}) = 51.7 - 5.3 \times 10^{-2} B - 22(0.5 - \exp(-2.3 t))$$

para $80 < B < 360$

$$\Delta P_c(\text{KW/m}) = 6 + 1460/B - 24(0.5 - \exp(-2.3 t))$$

para $30 < B < 80$

$$\Delta P_c(\text{KW/m}) = 19.1 - 4.2 \times 10^{-3} B - 24(0.5 - \exp(-2.3 t))$$

para $80 < B < 360$

En las gráficas 22 y 23 se muestran los "PCI-GRAMAS" para $t = 2.5$ h y la rejilla de probabilidades de defecto. En donde se indica que un defecto puede ocurrir si un punto (PAP) cae sobre una zona "L" definida para el B señalado. Este modelo se considera defectuoso ya que no considera la rapidez de la rampa.

Cubicciotti y Jones (7) proponen un modelo que comprende de cuatro etapas requeridas para lograr la falla por esfuerzos bajo corrosión, a decir:

- 1 - penetración de la capa de óxido.
- 2 - formación o inicio de la falla
- 3 - propagación de la falla
- 4 - ruptura dúctil

La primera etapa considera que aún cuando el yodo no es capaz de penetrar la película de óxido, formada en la superficie interior de la vaina de circaloy irradiados, cuyos espesores son mayores de $0.5 \mu\text{m}$, esta película sufre ruptura mecánica a consecuencia del nivel de deformación ($\sim 0.4\%$) que se alcanza bajo las condiciones de temperatura de operación de un reactor, exponiéndose una pequeña porción de circaloy metálico, en la interfase con la capa de óxido, al yodo contenido en el ambiente.

En la etapa de formación, esfuerzos suficientemente grandes producen la nucleación por FEC en lugares propensos de la superficie metálica, por lo que consideran basándose en la i.a.

formación experimental que el esfuerzo es el parámetro clave para la formación de la falla y cuyo umbral depende de la microestructura y de la irradiación pero no de la concentración de yodo, al menos en el intervalo de 6 a 0.06 mg/cm². Las nucleaciones observadas son de dos tipos, una en forma de orificios pequeños no propagables formados bajo esfuerzos inferiores al umbral, con trayectorias intergranulares que ocurren en los bordes de los granos de material recristalizado; la otra de mayor tamaño con trayectoria transgranular ocurriendo en los lugares de la superficie metálica que contienen elementos ligantes o impurezas a concentraciones mayores a las normales en donde los esfuerzos aplicables son mayores al umbral. Así mismo afirman que no obstante que el mecanismo exacto no se ha identificado, el proceso de formación es rápido.

La etapa de propagación empieza una vez que la falla por esfuerzo bajo corrosión se ha iniciado y continuará siempre que los esfuerzos remanentes sean lo suficientemente grandes y que el ambiente corrosivo persista en grado sumo, 0.06 mg o más de yodo por cm² de superficie de circaloy.

Estiman que el esfuerzo nominal mínimo σ_{\min} requerido para que las fallas grandes crezcan, puede expresarse por:

$$\sigma_{\min} = K_{IFEC} / f(a/w) \sqrt{\pi a}$$

en donde:

a - profundidad de la grieta

f - función dependiente de la geometría

w - espesor de la vaina.

y que probablemente las condiciones que se dan en la punta de la grieta controlan el valor del esfuerzo requerido para que continúe la propagación cuando σ_{\min} es menor que el esfuerzo de umbral de la sección neta definido por:

$$\sigma_{\text{net}} = \sigma_0 (1 - (a/w))$$

en donde:

σ_u - es el esfuerzo nominal de umbral para FEC, para -
especímenes no ranurados.

La última etapa se inicia cuando la propagación se llevó a cabo, hasta que ocurre la inestabilidad plástica que provoca una fractura rápida dúctil de los ligamentos no rotos que se ubican al frente de la falla. De esta falla final se han observado dos formas; el orificio diminuto que ocurre a - bajos esfuerzos y la grieta axial corta que corresponde a esfuerzos altos.

3 . - DETERMINACION DE PARAMETROS PRINCIPALES QUE INTERVIENEN EN EL FENOMENO FEC.

En este capítulo se presenta un análisis de la información proporcionada en el capítulo 2 con objeto de identificar los parámetros que se han de considerar esenciales a fin de modelar el fenómeno de falla por esfuerzos bajo corrosión (FEC).

Para ello se clasifican los parámetros como variables asociadas con la fabricación de tubos de circaloy destinados a usarse en combustibles nucleares, la operación en el reactor y el proceso en sí de FEC.

Este capítulo se ha subdividido en tres partes correspondiendo la primera al análisis de información de las pruebas efectuadas en laboratorios fuera de reactores nucleares, la segunda correspondiendo al análisis de la información de las pruebas efectuadas en reactores nucleares y la tercera en la que se clasifican las variables.

Como se observará en el siguiente capítulo 4, las variables involucradas más íntimamente ligadas al fenómeno de falla por esfuerzos bajo corrosión son la concentración de yodo, el esfuerzo aplicado, la temperatura y la fluencia neutrónica a la que se ve expuesto el material.

3.A- ANALISIS DE LOS RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE LABORATORIO.

En la tabla 1 se comparan los comportamientos de especímenes de tubos de circaloy fabricados por reducción y liberados de esfuerzos a 713 y 788 K durante un período de 5 horas - de tratamiento térmico, así como de los obtenidos por trabajo en frío y liberados de esfuerzos a 748 K por tratamiento térmico, a los cuales se les designó por: TR/LE(713,5), TR/LE(788,5) y TF/LE(748,5). Las temperaturas a las cuales se presentó la - FEC fueron: 823 K para el TR/LE(713,5), mayor a 628 K para el TR/LE(788,5) y en cambio el TF/LE(748,5) fue susceptible a FEC a 613 K según se muestra en las columnas 1,2 y 3 de la tabla 1. De las columnas 4 y 5 de dicha tabla puede observarse que el - recocido previo a 923 K es suficiente para que el TR/LE(713,5) deje de ser susceptible a FEC, en tanto que el TF/LE(748,5) continúa siéndolo aún cuando se alcanzó la temperatura de 1123 K.

Esto significa que el proceso de fabricación de los tubos de circaloy destinados a vainas para barras combustibles, tiene influencia sobre la susceptibilidad a este fenómeno. Los elaborados por reducción son menos susceptibles que los elaborados por trabajo en frío, el incremento en la temperatura del recocido aumenta también la resistencia del material a FEC.

De la columna 5 se observa que la presión inicial de 2400 Pa de yodo, equivalente a 2.4 mg de yodo por cm^3 , es el - valor crítico a partir del cual se presentan las fallas. Lo - que significa que la presencia del yodo a cierta concentración o presión es esencial para la evolución de la FEC.

La tabla 2, preparada para el espécimen más susceptible a FEC de los investigados por Wood (4), circaloy-2 trabajado en frío y recocido en 16 pasos intermedios de su elaboración muestra que la presencia de un catalizador como el Fe o el O_2 - es necesario, para que la reacción Zr-I se lleve a cabo bajo condiciones que inducen a FEC, con la formación de orificios dimi-

nutos que son capaces de propagarse. Los valores críticos para la temperatura de prueba, esfuerzo aplicado, concentración de yodo y temperatura de recocido corresponden respectivamente a 493 K, 217 MPa, 2×10^{-5} g/cm², 923 K con lo que se aprecia su influencia en el proceso de falla. La textura y la irradiación en el intervalo de estudio no tuvieron una contribución apreciable para la clase de circaloy investigado.

Como podrá observarse existen parámetros asociados - con la fabricación del tubo, tal como la temperatura de recocido y método de elaboración, así como parámetros que influyen - en el fenómeno FEC para un material específico, tal como la concentración de yodo, temperatura de prueba y esfuerzo aplicado.

En la tabla 3, se puede ver que para un ambiente saturado de yodo (20 mg/cm^2), la influencia de la fabricación de - los tubos mediante reducción de un 60% y 68%, para los que corresponden esfuerzos de cedencia de 350 y 410 MPa a 573 K. El tubo reducido al 60% fue liberado de esfuerzos y el reducido - al 68% no lo fue, la influencia del yodo puede observarse; al comparar la columna 4 con las otras tres, en vista de que en - ausencia de éste no se presentaron fallas, aún cuando la irradiación alcanzó el nivel de 1.9×10^{25} n/m² en los especímenes - obtenidos a partir de elementos combustibles con UO₂ (muestra-control), lo que indicó que los productos de fisión adheridos o infiltrados en las superficies de las vainas no provocaron - fallas en ausencia de yodo.

En la gráfica 1 se observa la existencia de un valor de umbral para la intensidad de esfuerzo K_I de 32 MPa m, en la punta de la falla a 573 K, el cual aún cuando fue determinado para espesores gruesos de circaloy, establece su existencia dejando la posibilidad de un valor de umbral para espesores - delgados en presencia de yodo, a partir del cual la falla

ya iniciada pueda propagarse a una cierta velocidad en vainas de circaloy. Cubicciotti reporta el valor de $7.9 \text{ MPa}(m^{0.5})$ para especímenes irradiados de circaloy-4 con espesor de 0.8 mm, Garlick de igual forma determinó valores de 6.5 y 5.8 $\text{MPa}(m^{0.5})$ para circaloy no irradiado, en forma de vaina.

En la gráfica 2 se muestra el efecto de la textura superficial incluyendo la homogeneidad de la capa de óxido (ZrO_2) - que se forma sobre la superficie de la vaina (4). Al tratar con HNO_3 y HF se logró homogeneizar la capa de óxido removiendo la inicial y puliendo la superficie. Su influencia provoca un incremento en el tiempo de prueba y la resistencia a temperaturas hasta de 563 K, en vez de 493 K que representó el valor de umbral para aquellos especímenes que no fueron tratados químicamente.

La gráfica,3 muestra la gran influencia de la concentración de yodo sobre la FEC en circaloy, de modo que en el intervalo de 2×10^{-5} a 10^{-3} g/cm^2 de superficie de circaloy, el tiempo de falla permanece constante a 200 horas aproximadamente reduciendo drásticamente éste tiempo hasta 0.2 horas para concentraciones mayores de $2 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^2$. El valor de umbral por abajo del cual no se manifiesta el fenómeno fue de $2 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^2$.

En la gráfica 4, se muestra el comportamiento de los esfuerzos residuales existentes en vainas de circaloy sometidas a FEC en condiciones de tratamiento térmico y sin él. La resistencia al fenómeno FEC se incrementa al aumentar la temperatura del recocido, lo que se manifiesta al resistir una deformación mayor. Así mismo se puede observar el umbral correspondiendo a 90 MPa.

En la gráfica 5, se muestra para el circaloy-2 recocido, el comportamiento del esfuerzo tangencial nominal a 593 K respecto del tiempo de prueba, así como el esfuerzo tangencial no-

minal a la misma temperatura correspondiente a FEC. El primero decrece de 380 a 300 MPa en el período de 800 horas de prueba, en tanto que el segundo se mantiene aproximadamente constante a 290 MPa en el mismo intervalo de tiempo.

La diferencia existente entre el esfuerzo tangencial para la falla dúctil σ_e y el correspondiente a la FEC σ_{FEC} , refleja la contribución de la corrosión debida al yodo en término de esfuerzo:

$$\text{ACCION DEL YODO} = \sigma_e - \sigma_{FEC}$$

En la gráfica 6 se muestra la relación del esfuerzo tangencial neto respecto del tiempo de fallas, sobre la cual deberá aplicarse este criterio para determinar la acción del yodo. Esto para circaloy-2 liberado de esfuerzos y a 593 K. A esfuerzos próximos al estallamiento la influencia del yodo debe ser reducida y las fallas son predominantemente mecánicas con deformaciones mayores o iguales al 20%, en tanto que la FEC ocurre con deformaciones del orden del .3% (6).

En ausencia de yodo el esfuerzo disminuye linealmente de 500 a 470 MPa en el intervalo de 0.1 a 600 horas de prueba; en presencia de yodo y dados los porcentajes de deformación encontradas, se puede considerar como representativo para la FEC el valor de 340 MPa en el intervalo de 20 a 600 horas de prueba. Información adicional que corrobora la aceptación de esta suposición se da en las tablas 5-3 y 5-4 de la referencia (7).

En la gráfica 7, se muestra el comportamiento del esfuerzo tangencial para circaloy-2 liberado de esfuerzos, en ambiente saturado con yodo, respecto de la temperatura de prueba, cuyo incremento reduce el valor del esfuerzo tangencial de falla. La diferencia en los esfuerzos a las temperaturas de 593 K y 633 K se mantiene cuasi constante a lo largo del período de prueba de 600 horas, $\Delta\sigma \sim 66 \text{ MPa}$ para ΔT de 40 K.

En cuyo caso $\Delta\sigma/\Delta T = 1.65 \text{ MPa/K}$

$$\sigma(T, t) = \sigma(593, t) - (\Delta\sigma / \Delta T)_{593} \times (T - 593)$$

En la gráfica 8, se muestra el efecto de la composición química del circaloy, observándose que la variación en el esfuerzo tangencial es mayor para el circaloy-2 que para el circaloy-4 en el intervalo de 0.1 a 6.0 horas de prueba, para tiempos mayores a 6.0 horas el circaloy-4 es más resistente, en una proporción aproximadamente constante de 30 MPa.

En la gráfica 9 se muestra la influencia de la presencia de estrías sobre la superficie de circaloy-4 liberado de esfuerzos en un ambiente de yodo de 0.006 g/cm^2 a 633 K. En esta gráfica se han sobrepuesto las líneas punteadas a fin de unir los puntos correspondientes a los especímenes con superficies tersas y los relacionados con especímenes con estrías en sus superficies. A altos esfuerzos no existe una diferencia apreciable, en el intervalo de 0.1 a 1 hora, para tiempos mayores a 8 horas se mantiene constante la diferencia de aproximadamente 50 MPa, lo que es compatible con el hecho de que a altos esfuerzos la falla se sucede prácticamente en forma dúctil.

En la gráfica 10, se muestra la contribución del proceso de manufactura para tubos de circaloy-2 ante la susceptibilidad a la falla por esfuerzo bajo corrosión. Los fabricantes A y B usaron sus métodos normales de elaboración, a quienes se les fijaron los estándares convencionales, tales como de composición química, esfuerzo de estallamiento, dimensiones. En la zona de altos esfuerzos (380 MPa) los especímenes de ambos fabricantes presentaron fallas visibles (1 mm de longitud) y para la zona de menores esfuerzos presentaron similarmente orificios diminutos de 0.5 mm de diámetro (7). En las prime-

ras se observó una pequeña influencia de la FEC, conforme a las deformaciones observadas (4.2%), el segundo tipo de falla se llevó a efecto por FEC con deformaciones del orden de 0.3%.

En la gráfica 15 se puede observar que existe una concentración de umbral $C_{IU} = 5 \times 10^{-6} \text{ g/cm}^2$ abajo de la cual el tiempo de falla permanece constante. Asimismo un intervalo durante el cual comportamiento del $\log t_f$ respecto del $\log C_I$ es lineal manteniendo la pendiente constante ante el cambio de temperatura. Asimismo puede observarse que el valor de umbrales inversamente proporcional a la temperatura a 623K corresponden $1 \times 10^{-6} \text{ g/cm}^2$ y a 673K 10^{-6} g/cm^2 .

En la gráfica 19 se muestra conforme a Tucker (8) y Miller (10) el efecto de variación del tiempo de falla respecto a la concentración de yodo a diversos esfuerzos de estallamiento aplicados, cuyo comportamiento es similar al reportado por Wood, en el sentido en que existe un valor de umbral (ahora dependiente del esfuerzo tangencial aplicado), una zona de proporcionalidad entre el $\log t_f$ y $\log C_I$, así como una concentración de saturación dependiente también del esfuerzo tangencial aplicado, lo cual se resume en la siguiente tabla 6

TABLA 6
CONCENTRACION DE UMBRAL Y DE SATURACION
PARA EL CIRCALOY-4 A 633K

σ_{FEC} (MPa)	t_f (h)	C_{IU} g/cm^2	t_f (h)	C_{IS} g/cm^2
241	1000	4×10^{-6}	40	10^{-4}
276	300	3.2×10^{-6}	12	8×10^{-5}
316	135	2.4×10^{-6}	6	6×10^{-5}
345	70	2×10^{-6}	3	5×10^{-5}

De la información presentada por Lowry (14) gráfica 24 se puede observar la influencia de la irradiación sobre el esfuerzo de falla σ_{θ}^{ir} , para el circaloy irradiado en ausencia de yodo a 590, 630 y 700 K de temperatura. Para 590 K la fluencia a la cual se inicia el incremento del esfuerzo de falla σ_{θ}^{ir} es de $3.5 \times 10^{24} \text{ n/m}^2$ aproximadamente, lo que representa una fluencia de umbral requerida para que se manifieste el efecto de liberación de esfuerzos residuales por irradiación. Este valor es del orden de aquél reportado por Wood (5) de $2.4 \times 10^{24} \text{ n/m}^2$.

En el intervalo de fluencias de 3.5×10^{24} a $4 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$ existe un incremento exponencial en el esfuerzo de falla σ_{θ}^{ir} en el que alcanza un valor máximo de 783 MPa, a partir de donde se inicia el decremento de este esfuerzo según se observa en la gráfica 24 y en la tabla 7 siguiente:

TABLA 7
ESFUERZO DE FALLA EN FUNCION DE LA FLUENCIA

FLUENCIA (n/m^2)	σ_{θ}^{ir} (F, T) (MPa)			$\Delta \sigma_{\theta}^{ir}$ (F, T) (MPa)		
	590 K	630 K	700 K	590 K	630 K	700 K
Umbral	560	520	420			
1.8×10^{25}	704	656	560	144	136	140
2.3×10^{25}	730	680	580	170	160	160
4.0×10^{25}	783	738	640	223	218	220
4.5×10^{25}	776	705	590	216	185	170

De igual forma, puede verse que la asociación con respecto a la temperatura es proporcional hasta la fluencia crítica de $4 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$ y que para fluencias mayores, el cambio en el esfuerzo de falla es dependiente de la temperatura.

3 B . - ANALISIS DE LOS RESULTADOS DE PRUEBAS EN REACTORES NUCLEARES.

En la tabla 4, se muestran los resultados obtenidos en las pruebas de incremento de potencia llevados a cabo con 5 elementos combustibles tipo SGHWR. Las fallas en las barras combustibles se presentaron cuando la rapidez de incremento fue del 1% y el exceso de potencia estuvo en el intervalo de 13 al 50.8 % - provocando fallas severas en dos de las 33 barras y en 5 fueron diminutas. Cuando la rapidez de incremento fue de 3% con un intervalo en el exceso de potencia de 19.3 a 24.6 % se provocaron fallas visibles en 20 de 28 barras sometidas a prueba.

En las fallas se observaron dos zonas (12) de material con diferentes efectos, una oscura correspondiente a facetas -- transcristalinas lo más probable debidas a deformaciones plásticas y otra zona brillante correspondiente a cortes dúctiles , en zonas de la vaina afectadas por calor. La deformación plástica - observada en las fallas pequeñas fueron similares a aquellas encontradas en las pruebas de laboratorio, debidas a FEC por yodo. La concentración de yodo estimada existente en los espacios libres de las barras fue de 2×10^{-4} g/cc.

En las gráficas 20 y 21 se muestran los valores de umbral para la potencia durante la rampa de potencia P y el incremento de potencia ΔP en función del quemado B. Podrá observarse que conforme se incrementa el quemado los umbrales disminuyen hasta el valor de 20 Kw/m para P y de 6 Kw/m para ΔP , a -- los cuales cesa el fenómeno. Las líneas punteadas se graficaron a intervalos de 2 Kw/m a fin de contar por bandas el número de fallas y elaborar los histogramas de las figuras 22 y 23 en las cuales se puede observar una probabilidad de falla hasta el 20%, valor que se mantiene constante en el intervalo de 2 a 12 Kw/m, o sea, el número de fallas en este intervalo resulta independien

te del exceso de potencia. Despues de 12 Kw/m la probabilidad de defecto se incrementa abruptamente hasta el 100 %.

3 C . - CLASIFICACION DE VARIABLES.

Como se ha podido observar, de la información recopilada, las diversas variables que han manifestado su influencia en el fenómeno FEC, corresponden a tres etapas de la existencia de las vainas de las barras combustibles; la fabricación, la operación y el proceso en sí de FEC. En base a esto, las variables pueden clasificarse en:

1. - Variables de la etapa de fabricación.
 - a) Composición química de la vaina.
 - b) Esfuerzos residuales.
 - c) Esfuerzo último a la tensión.
 - d) Textura superficial.
 - e) Temperatura del recocido.
2. - Variables de operación.
 - a) Quemado B o fluencia neutrónica. F.
 - b) Rapidez de incremento de potencia.
 - c) Temperatura.
3. - Variables FEC.
 - a) Concentración de yodo C_I .
 - b) Esfuerzo aplicado.
 - c) Irradiación de la vaina F.
 - d) Catálisis.

Las variables de fabricación, inducidas en el tipo de material mediante el maquinado y tratamientos posteriores (recocido, decapado químico, etc.), constituyen aquellos parámetros intrínsecos que harán que unas vainas sean más ó menos susceptibles a FEC, que otras. Pero las vainas que han seguido el mismo proceso de fabricación tienen un comportamiento invariante ante el fenómeno.

Las variables de operación, que determinan la historia o envejecimiento de la vaina, constituyen aquellos parámetros

que modifican las características de la vaina y que producen condiciones propicias para fomentar la susceptibilidad a FEC, que dependen de la forma y del tiempo de operación de las barras combustibles.

Las variables del proceso FEC, constituyen aquellos parámetros que provocan la iniciación y la propagación de la grieta.

En consecuencia, en términos generales se puede decir que el proceso de falla se puede caracterizar mediante una relación del siguiente tipo:

$$\text{FALLA} = f (\text{CQ, TS, } \sigma_r, T_r, \sigma_{UT}, T, B, \Delta P/\Delta T, C_I, F)$$

CQ - Composición Química.

TS - Textura Superficial.

σ_r - Esfuerzos residuales.

T_r - Temperatura de recocido.

σ_{UT} - Esfuerzo último a la tensión o de estallamiento.

T - Temperatura.

B - Quemado.

$(\Delta P/\Delta t)$ - Rapidez de incremento de potencia.

C_I - Concentración de yodo.

F - Fluencia de neutrones.

4 . - DESARROLLO DEL MODELO.

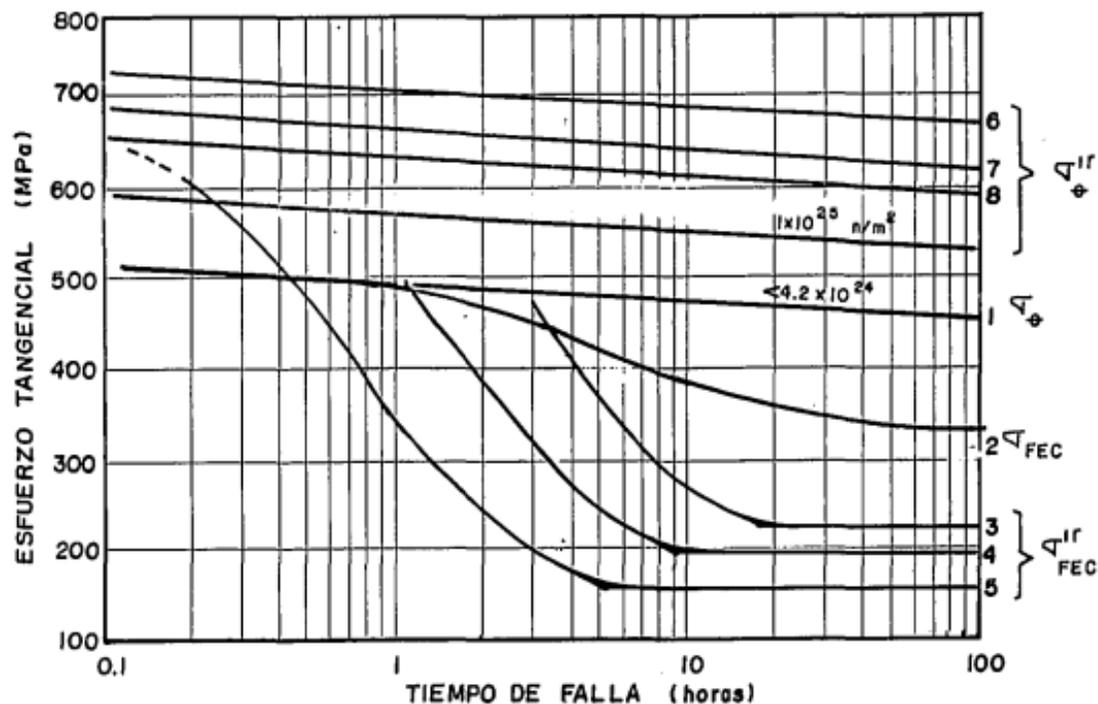
El modelo que se desarrolla en este capítulo se basa en la acumulación de efectos provocados por cada una de las variables que contribuyen a modificar la resistencia a FEC. Para ésto se considera que tales contribuciones afectan a las características de las vainas de modo que el esfuerzo requerido para la falla cambia de valor, así como también la susceptibilidad.

Bajo la consideración de que las variables de fabricación generan en las vainas características y propiedades específicas, éstas se consideran constantes para un lote de fabricación, a fin de estudiar y obtener un modelo del comportamiento de las variables FEC ante el fenómeno.

Los materiales que se han considerado en este estudio son el circaloy-2 y circaloy-4 ambos trabajados en frío y liberados de esfuerzos, cuyas propiedades y características son similares, además de ser los más comunes para vainas de barra combustibles.

El modelo se basa en la observación efectuada a las gráficas 6 y 11. En donde la contribución del yodo u otra variable FEC queda representada por un decremento en el esfuerzo de falla. Las variables de fabricación son de esta manera intrínsecamente consideradas en los valores de tales esfuerzos.

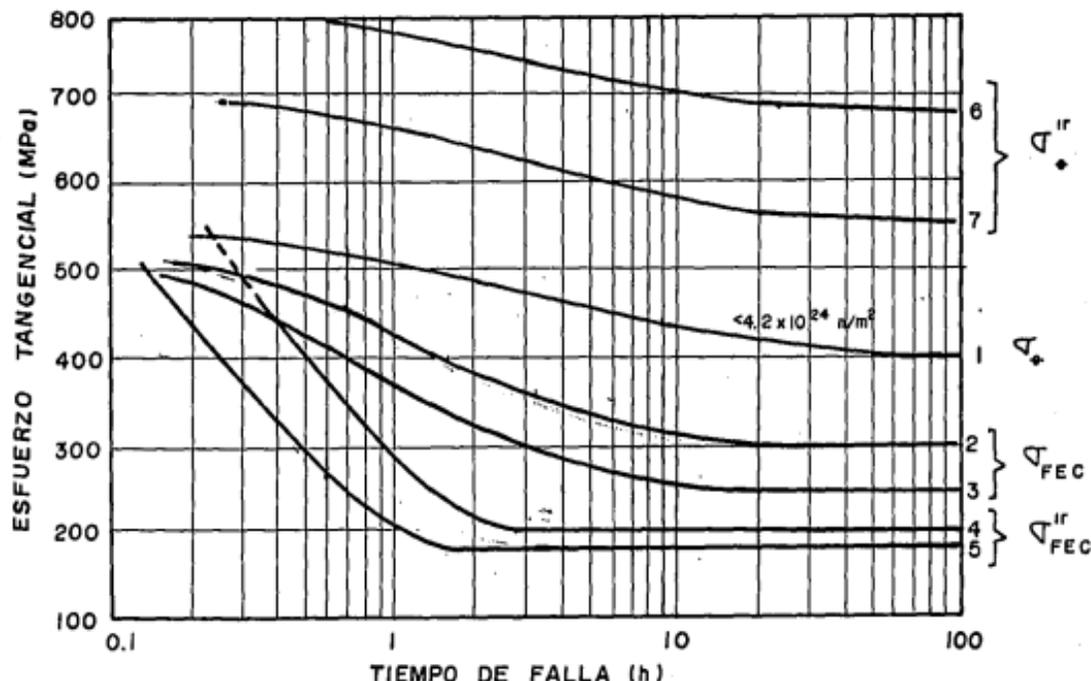
Con tal fin, en la gráfica 28 se reúne la información experimental para circaloy-2 trabajado en frío y liberado de esfuerzos presentadas por Cubicciotti (6,7) y Yaggee (9), bajo diversas condiciones de prueba y que representan al esfuerzo tangencial de falla σ_{θ} , esfuerzo tangencial de falla bajo ambiente de yodo σ_{FEC} , esfuerzo tangencial de falla bajo irradiación σ_{θ}^{ir} y el esfuerzo tangencial de falla bajo irradiación en ambiente de yodo σ_{FEC}^{ir} , todos ellos en función del tiempo de falla t_f . Similarmente en la gráfica 29 se reúne la información equivalente para el circaloy-4 trabajado en frío y liberado de esfuerzos.



GRAFICA 28: ESFUERZO DE FALLA EN FUNCION DEL TIEMPO DE FALLA DEL CIRCALLOY-2.

$\times 10(24) \approx 10^{24}$

N	T (K)	C_1 (g/cm ²)	F (n/m ²) \times	MUESCA μm	N	T (K)	C_1 (g/cm ²)	F (n/m ²)	MUESCA μm
1	593	0	0	60	5	593	$\approx 10^{-4}$	$4 \times 10(25) \times$	65
2	593	6×10^{-4}	0	60	6	593	0	$4 \times 10(25) \times$	60
3	593	$\approx 10^{-4}$	$10(24) \times$	60	7	593	0	$2.3 \times 10(25) \times$	60
4	593	$\approx 10^{-4}$	$10(25) \times$	65	8	593	0	$1.8 \times 10(25) \times$	60



GRAFICA 29: ESFUERZO DE FALLA EN FUNCION DEL TIEMPO DE FALLA DEL CIRCALOY-4.

N°	MATERIAL	T (K)	C_1 (g/cm ²)	F (n/m ²)	RANURAS	REFERENCIA
1	CIRCALOY 4	633	0	0	8 micro-m	CUBICCIOTI (6)
2	CIRCALOY 4	633	0,0006	0	8 micro-m	CUBICCIOTI (6)
3	CIRCALOY 4	633	0,0001	0	200 micro-m	CUBICCIOTI (6)
4	CIRCALOY 4	633	0,0001	3.6×10^{25}	60 micro-m	CUBICCIOTI (6)
5	CIRCALOY 4	633	0,0001	6×10^{25}	60 micro-m	YAGGE (10)
6	CIRCALOY 4	633	0	4×10^{25}	8 micro-m	VALOR TEORICO
7	CIRCALOY 4	633	0	6×10^{25}	8 micro-m	VALOR TEORICO

4 A. - AJUSTE DE CURVAS.

Para determinar el esfuerzo de falla σ_{θ} en una atómafera inerte y el esfuerzo de falla σ_{FEC} en presencia de una concentración de yodo de 0.006 g/cm^2 , ambos en función del tiempo de falla t_f se gráficas en escala Log-Log las gráficas 6,7 y 11. Esta información se presenta en la gráfica 30 observándose que las curvas corresponden a rectas de la forma:

$$\text{Log } \sigma - \text{Log } \sigma' = m (\text{Log } t_f - \text{Log } t_f')$$

o bien:

$$(\sigma / \sigma') = (t_f / t_f')^m$$

en donde:

$$m = (\text{Log } \sigma' - \text{Log } \sigma'') / (\text{Log } t_f' - \text{Log } t_f'')$$

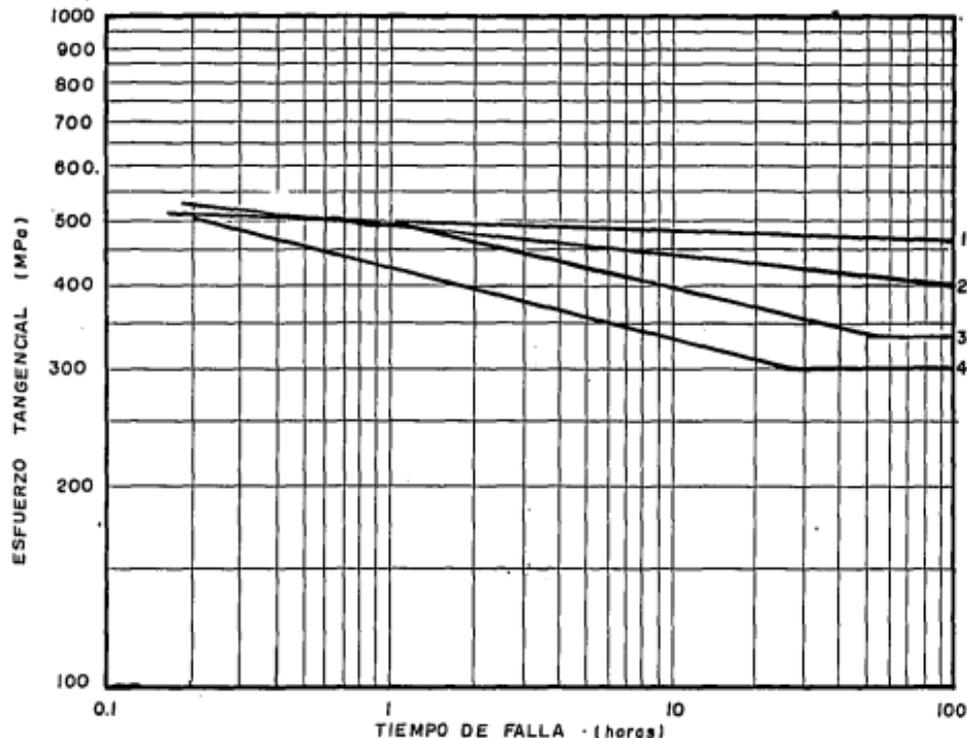
y σ' , σ'' , t_f' , t_f'' , representan valores experimentales de referencia.

a) - Para circaloy-2, curva 1 de la gráfica 30 a la temperatura de 593 K y en ausencia de yodo, se tienen los siguientes puntos :

σ_{θ} (MPa)	t_f (h)
510	0.2
500	0.7
475	10.0
460	100.0

de aquí, la pendiente resulta ser: $m = -0.01667$
con lo cual:

$$(\sigma_{\theta} / \sigma'_{\theta}) = (t_f / t'_f)^{-60} \quad (4-1)$$



GRAFICA 30 - ESFUERZO DE FALLA EN FUNCION DEL TIEMPO PARA CIRCALLOY-2 Y CIRCALLOY-4.

Nº	MATERIAL.	T (K)	Ci (g/cm ²)	MUESCAS (μm)	REFERENCIA
1	CIRCALLOY - 2	593	0	65	GRAFICA 6
2	CIRCALLOY - 4	633	0	65	GRAFICA II
3	CIRCALLOY - 2	593	≥ 0.0006	65	GRAFICA 6
4	CIRCALLOY - 4	633	≥ 0.0006	65	GRAFICA II

en donde t_f se expresa en horas y σ_θ en Mega-pascal. Seleccionando:

$$\sigma_\theta = 460 \text{ MPa} \quad t_f = 100 \text{ h}$$

nos queda;

$$t_f = 100 \left(460 / \sigma_\theta \right)^{60} ; \sigma_\theta < 560 \text{ MPa} \quad (4-2)$$

b) - Para circaloy-2, curva 3 de la gráfica 30 a la temperatura de 593 K y bajo una concentración de yodo C_I de 0.006 g/cm^2 , conforme a los siguientes puntos:

σ_{FEC} (MPa)	t_f (h)
500	1.0
450	2.1
400	10.0
300	53.5

se tiene: $m = -0.0969$

$$\left(\sigma_{FEC} / \sigma'_{FEC} \right) = \left(t_f / t'_f \right)^{-0.0969} ; \sigma_{FECU} \leq \sigma_{FEC} \leq \sigma_\theta$$

o bien:

$$t_f = \begin{cases} t'_f \left(\sigma_{FEC} / \sigma_{FECU} \right)^{-10.32} & ; \sigma_{FECU} \leq \sigma_{FEC} \leq \sigma_\theta \\ \geq t_f & ; \sigma_{FEC} = 340 \text{ MPa} \end{cases} \quad (4-3)$$

en donde σ_{FECU} representa el esfuerzo de umbral de falla y t_f el tiempo mínimo de falla cuando el circaloy se someta a tal esfuerzo. Para el lote en particular, curva 3 de la gráfica 30,

$$\sigma_{F3CU} = 340 \text{ MPa} , t_f = 53.5 \text{ h} , \sigma_\theta = 560 \text{ MPa}$$

sustituyendo estos valores se tiene:

$$t_f = \begin{cases} 53.5 \left(340 / \sigma_{FEC} \right)^{10.32} & ; 340 \leq \sigma_{FEC} \leq 560 \text{ MPa} \\ \geq 53.5 & ; \sigma_{FEC} = 340 \end{cases} \quad (4-3)'$$

en donde t_f se expresa en horas.

c) - Para circaloy-4, curva 2 de la gráfica 30 a la temperatura de 633 K y en ausencia de yodo, conforme a los si-

güientes puntos:

σ_{θ} (MPa)	t_f (h)
520	0.3
500	0.7
490	1.0
450	5.0
400	80.

se tiene: $m = -0.047$

$$\left(\sigma_{\theta} / \sigma'_{\theta} \right) = \left(t_f / t'_f \right)^{-0.047} \quad ; \quad \sigma_{\theta} < \sigma_E \quad (4-4)$$

o bien:

$$t_f = t'_f \left(\sigma_{\theta} / \sigma'_{\theta} \right)^{-21.28} \quad ; \quad \sigma_{\theta} < \sigma_E$$

para $\sigma'_{\theta} = 400$ MPa y, $t_f = 80$ h, se tiene:

$$t_f = 80 \left(\sigma_{\theta} / 400 \right)^{-21.28} \quad ; \quad \sigma_{\theta} < 540 \quad (4-5)$$

d) - Para circaloy-4, curva 4 de la gráfica 30 a la temperatura T de 633 K y a la concentración de yodo G_I de 0.006 g/cm², conforme a los puntos siguientes:

σ_{FEC} (MPa)	t_f (h)
500	0.2
450	0.5
350	6.0
300	24.0

se tiene; $m = -0.0177$

$$\left(\sigma_{FEC} / \sigma'_{FEC} \right) = \left(t_f / t'_f \right)^{-0.0177} \quad ;$$

$$t_f = \begin{cases} t'_f \left(\sigma_{FEC} / \sigma'_{FEC} \right)^{-9.27} & ; \quad \sigma_{FECU} \leq \sigma_{FEC} \leq \sigma_{\theta} \\ \geq t_f & ; \quad \sigma_{FEC} = \sigma_{FECU} \end{cases}$$

para circaloy-4 en estudio: $\sigma_{FECU} = 300$ MPa

$$t_f = \begin{cases} 24 \left(300 / \sigma_{FEC} \right)^{9.27} & ; \quad 300 \leq \sigma_{FEC} \leq 540 \\ 24 & ; \quad \sigma_{FEC} = 300 \text{ MPa} \end{cases} \quad (4-6)$$

La condición $t_f \geq t'_f$ expresada en las ecuaciones anteriores significa un comportamiento probabilístico.

En la tabla 8 se comparan los valores obtenidos al usar las ecuaciones 4-5 y 4-6 con la información experimental obtenida en la gráfica 11.

TABLA 8

t (h)	σ_e (MPa)		$\sigma_{TSC}(t)$ (MPa)	
	DATO	CALC.	DATO	CALC.
0.2	522	530	500	500
0.3	520	520	485	479
0.4	514	514	472	464
0.5	509	508	456	454
0.6	506	504	445	444
0.7	504	500	437	437
0.8	489	496	429	431
0.9	496	494	424	426
1.0	493	490	418	421
2.0	469	475	376	391
3.0	461	467	354	374
5.0	448	456	325	355
6.0	440	451	317	348
8.0	437	446	315	337
10.	432	441	312	329
20.	418	427	309	306
30.	413	418	307	300
50.	404	409	306	300
80.	397	400	304	300
100	392	395	304	300
200	384	383	304	300
240	381	380	304	300
300	375	376	304	300
400	370	371	304	300

información referente a circaloy-4, a 633K y resultados de la ecuación 4-5 ó 4-6.

4. B - ACTIVIDAD DEL YODO.

En la gráfica 11 la diferencia entre las dos curvas σ_{FEC} es atribuible a la actividad o acción del yodo sobre el circaloy, o sea:

- $\Delta \sigma_{FEC} = \sigma_{\theta} - \sigma_{FEC}$ - es la contribución de la actividad del yodo para producir una falla en el material, de espesor "a" en el tiempo t_f , sometido al esfuerzo σ_{FEC}
- σ_{FEC} - esfuerzo requerido para inducir la falla del material en presencia de yodo y producir la fractura de espesor "(w - a)".
- w - espesor de la vaina.

En la zona de la grieta, después de que se ha logrado una profundidad "a" por la acción del yodo, la sección remanente se puede representar por un cilindro de longitud w - a y diámetro D, el cual será fracturado por el esfuerzo σ_{FEC} según se muestra en el siguiente diagrama 3:

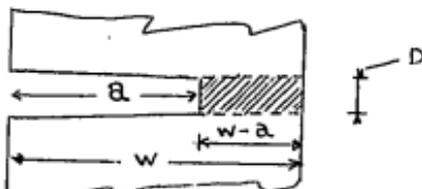


FIGURA 3 . - REPRESENTACION DE LA GRIETA DE LONGITUD "a" Y DE LA ZONA SUJETA A FRACTURA DUCTIL.

de modo que:

$$\sigma_{FEC} = (\pi/4) D^2 (w - a) \sigma_{\theta}^* \quad (4-7)$$

$$\sigma_{FEC} = C (w - a) \sigma_{\theta}^*$$

en donde:

$$\sigma_{\theta}^* = (\sigma_{\theta} / w) \quad (\text{MPu/mm}) \quad \text{-- esfuerzo requerido para la falla de la pared de la vaina de espesor } w.$$

C - factor de ajuste geométrico que relaciona a D con (w-a) de manera que

el área de corte es la misma para un esfuerzo σ_{FEC} determinado.

El espesor de la vaina puede expresarse en término de la longitud "a" de la grieta y del espesor X_D que se fractura en forma dúctil.

$$w = a(t) + X_D(t) \quad (\text{mm}) \quad (4-8)$$

$$X_D(t) = CTE (w - a(t)) \quad (\text{mm}) \quad (4-9)$$

$$X_D(t) = \sigma_{FEC} / \sigma_e^*$$

ahora bien, se considera que:

$$\Delta \sigma_{FEC} \propto \Delta a \quad \text{ó} \quad \Delta a = N \Delta \sigma_{FEC} \quad (4-10)$$

y que por consiguiente:

$$\Delta \sigma_{FEC} / \Delta t \propto \Delta a / \Delta t$$

en donde:

$\Delta a = a - a_0$ - Longitud de la grieta iniciada en una ranura de profundidad a_0 , en general se considerará $a_0 = 0$.

$\Delta a = a$ - con $a_0 = 0$

$\Delta t_f = t_f - t_0$ - intervalo de tiempo requerido para la falla, medido a partir de t_0 , momento en que se inicia el proceso, en general; $t_0 = 0$.

$\Delta t_f = t_f = t$ - con $t_0 = 0$

$\Delta a / \Delta t$ - Rapidez promedio de avance de la grieta.

Usando las expresiones 4-7 y 4-10 así como los valores calculados y referidos en la tabla 8, se obtiene la expresión que define a la constante de proporcionalidad N, conforme a la siguiente secuencia;

$$\sigma'_{FEC} / \sigma''_{FEC} = (w - a') \sigma'_{\theta} / (w - a'') \sigma''_{\theta} \quad (4-11)$$

$$(w - a') / (w - a'') = (\sigma'_{FEC} / \sigma''_{FEC}) (\sigma''_{\theta} / \sigma'_{\theta}) \quad (4-12)$$

$$a' = w \left[1 - (\sigma'_{FEC} / \sigma''_{FEC}) (\sigma''_{\theta} / \sigma'_{\theta}) \right] + (\sigma'_{FEC} / \sigma''_{FEC}) (\sigma''_{\theta} / \sigma'_{\theta}) \quad (4-13)$$

$$\begin{aligned} (\Delta \sigma'_{FEC} / \Delta \sigma''_{FEC}) (t'' / t') &= (\sigma'_{\theta} - \sigma'_{FEC}) t'' / (\sigma''_{\theta} - \sigma''_{FEC}) t' \\ &= (a' / t') / (a'' / t'') \quad (4-14) \end{aligned}$$

Igualando 4-13 con 4-14, y factorizando respecto a (a'' / t'') , se tiene:

$$\begin{aligned} \frac{a''}{t''} \left[\frac{\Delta \sigma'_{FEC}}{\Delta \sigma''_{FEC}} \left(\frac{t''}{t'} \right) - \left(\frac{\sigma'_{FEC}}{\sigma''_{FEC}} \right) \left(\frac{\sigma''_{\theta}}{\sigma'_{\theta}} \right) \frac{t''}{t'} \right] &= \left[1 - \left(\frac{\sigma'_{FEC}}{\sigma''_{FEC}} \right) \left(\frac{\sigma''_{\theta}}{\sigma'_{\theta}} \right) \right] \frac{w}{t'} \\ \frac{a''}{t''} &= \frac{\left[1 - \left(\frac{\sigma'_{FEC}}{\sigma''_{FEC}} \right) \left(\frac{\sigma''_{\theta}}{\sigma'_{\theta}} \right) \right] \left(\frac{w}{t'} \right) \Delta \sigma''_{FEC}}{\Delta \sigma'_{FEC} - \left(\frac{\sigma'_{FEC}}{\sigma''_{FEC}} \right) \left(\frac{\sigma''_{\theta}}{\sigma'_{\theta}} \right) \Delta \sigma''_{FEC}} = N (\Delta \sigma''_{FEC} / t'') \\ N &= \frac{\left[1 - \left(\frac{\sigma'_{FEC}}{\sigma''_{FEC}} \right) \left(\frac{\sigma''_{\theta}}{\sigma'_{\theta}} \right) \right] w}{\Delta \sigma'_{FEC} - \left(\frac{\sigma'_{FEC}}{\sigma''_{FEC}} \right) \left(\frac{\sigma''_{\theta}}{\sigma'_{\theta}} \right) \Delta \sigma''_{FEC}} \quad (\text{mm/MPa}) \quad (4-15) \end{aligned}$$

Expresando σ_{FEC} en MPa y "w" en mm, las unidades de N son mm/MPa. En el intervalo de tiempo de 0.2 a 300 horas, el valor de N resulta ser de $1.95 \times 10^{-3} / (w)$, (mm/MPa).

Con ésto, "a(t)" se puede expresar como:

$$a(t) = 1.95 \times 10^{-3} (w)^{-1} \Delta \sigma(t) \quad (4-16)$$

Como "a(t) + X_D(t)" debe ser igual al espesor "w" de la vaina y con objeto de verificar la validez del valor de N, se procedió a elaborar la tabla 9 para un espesor de 0.8 mm y cuyo resultado se muestra a continuación:

TABLA 9

t (h)	$\sigma_{\theta}(t)$ (MPa)	$\sigma_{FEC}(t)$ (MPa)	$\Delta \sigma_{FEC}(t)$ (MPa)	a(t) (mm)	X _D (mm)	(a+X _D)(t) (mm)
0.2	522	500	22	0.04929	0.7663	0.8090
0.5	509	456	53	0.10345	0.7167	0.8200
1.0	493	421	72	0.1405	0.6831	0.8240
5.0	458	355	101	0.1971	0.6228	0.8200
10.	441	329	112	0.2186	0.5968	0.8154
24.	422	300	122	0.2381	0.5687	0.8068
50.	409	300	109	0.2127	0.5867	0.7995
100	395	300	95	0.1854	0.6076	0.7900
300	378	300	76	0.1483	0.6383	0.7866

Comparando la última columna con el espesor supuesto de la vaina se puede afirmar que el valor de N es adecuado, confirmandose la validez de la ecuación 4-16.

Ahora se procederá a establecer una relación entre el decremento de esfuerzos y la concentración de yodo, siguiendo un razonamiento similar al usado para relacionar a σ_{FEC} con la longitud de la grieta "a", ésto es, una relación del tipo:

$$\frac{\Delta \sigma_{FEC}}{\Delta t} \propto \frac{\Delta C_I}{\Delta t} \quad (4-17)$$

o bien para un Δt :

$$\Delta \sigma_{FEC} \propto \Delta C_I$$

O sea que la rapidez promedio de la reacción química equivalente, se podría expresar en término del esfuerzo de umbral y de la concentración de yodo C_I del ambiente externo a la grieta, de manera que:

$$\frac{\Delta C_I}{\Delta t} = \text{RAPIDEZ DE REACCION} = f(C_I)$$

en donde C_I representa la concentración del yodo del ambiente externo a la grieta.

Para lograr este objetivo se hace uso de la información proporcionada en la tabla 8, en lo corresponde a los valores de σ_{θ} y σ_{FEC} para circaloy-4 trabajado en frío y liberado de esfuerzos, calculados mediante las ecuaciones 4-5 y 4-6, así como la información dada en la gráfica 3 relativa a la variación del tiempo de falla en función de la concentración de yodo C_I , tomando en cuenta que:

- 1 - La reacción entre el circonio y el yodo que se dá en la punta de la grieta es independiente del tipo de circaloy.
- 2 - Los tiempos de falla que se consideran son tiempos mínimos de falla a las diversas concentraciones de yodo y esfuerzos.
- 3 - Los decrementos en los esfuerzos $\Delta \sigma_{FEC}$ del circaloy-2 y circaloy-4 se pueden relacionar entre si.
- 4 - Para un tiempo mínimo de falla existen; un decremento $\Delta \sigma_{FEC}$ en el esfuerzo de falla y un

incremento de concentración de yodo ΔC_I , que permiten que la reacción entre el circonio y el yodo se lleve a efecto permitiendo que la grieta avance.

5 - La relación analítica entre el tiempo de falla y la concentración de yodo (gráfica 3) se aproxime mediante las ecuaciones siguientes, que corresponden a las "líneas teóricas" en las tres zonas de comportamiento, según se mencionó en el capítulo 2.

Zona 1 - En donde el decremento en el tiempo de falla es lento; $3 \times 10^{-5} \leq C_I \leq 8 \times 10^{-4} \text{ g/cm}^2$, en la cual:

$$t_f = \frac{111.6}{C_I^{0.0107}} \quad (\text{h}) \quad (4-19)$$

Zona 2 - En donde el decremento en el tiempo de falla es sustancial, de 240 h á 0.3 h ; $8 \times 10^{-4} \leq C_I \leq 1.43 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^2$, en la cual:

$$t_f = (1 / 385 C_I)^{4.823} \quad (4-20)$$

Zona 3 - En donde el tiempo de falla es constante de 0.2 h aproximadamente; $C_I \geq 1.43 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^2$, en la cual $\Delta \nabla_{FEC}$ es mínimo.

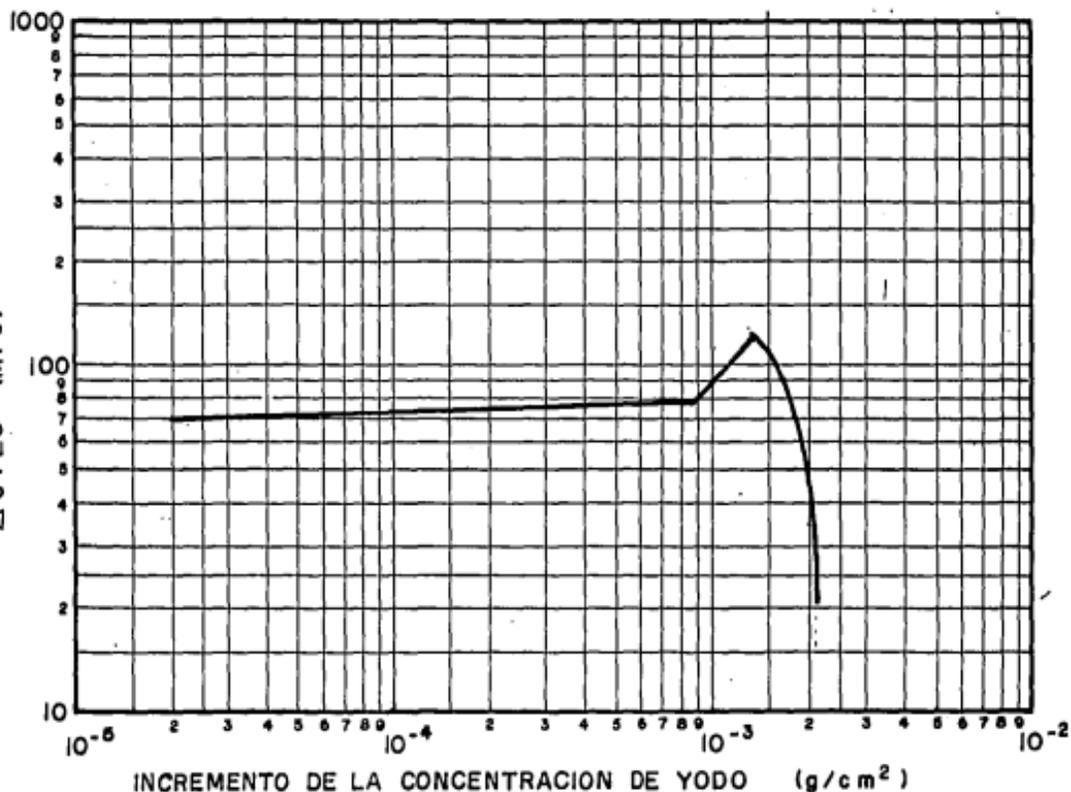
En la tabla 10 se proporcionan para un tiempo de falla dado, el decremento en el esfuerzo $\Delta \nabla_{FEC}$ obtenido de la tabla 8, la concentración de yodo C_I obtenida de las ecuaciones 4-19 y 4-20, así como los cocientes $(\Delta \nabla / \Delta t)$ y $(\Delta C_I / \Delta t)$, con los cuales se construyó la gráfica 31, en la cual se puede observar la relación buscada, en la que también se distinguen tres zonas de comportamiento:

TABLA 10

ZONA	t (h)	$\Delta \sigma_{PEG}$ (MPa)	q_I (g/cm^2)	$(\Delta \sigma_{PEG} / \Delta t)$ (MPa/h)	$(\Delta q_I / \Delta t)$ (g/cm^2-h)
1	0.2	22	0.0021	110	0.0105
	0.3	35	0.002	116	6.67×10^{-3}
	0.4	42	0.00193	105	4.80×10^{-3}
	0.5	53	0.00188	106	3.76×10^{-3}
	0.6	61	0.00184	101	3.07×10^{-3}
	0.7	67	0.00181	96	2.6×10^{-3}
	0.8	75	0.00178	75	2.22×10^{-3}
	0.9	72	0.00175	80	1.95×10^{-3}
	1.0	75	0.00173	75	1.73×10^{-3}
	2.0	93	0.00159	46.5	7.95×10^{-4}
3.0	107	0.00152	36	5.07×10^{-4}	
2	5.0	123	0.00143	24.6	2.86×10^{-4}
	6.0	124	0.00140	20.7	2.33×10^{-4}
	8.0	125	0.00135	15.6	1.69×10^{-4}
	10.	120	0.00132	12	1.32×10^{-4}
	20.	109	0.00121	5.45	6.05×10^{-5}
	30.	106	0.00111	3.55	3.71×10^{-5}
	50.	98	0.00109	1.96	2.18×10^{-5}
	80.	93	0.00103	1.16	1.29×10^{-5}
	100	88	0.00100	0.88	1.00×10^{-5}
	200	80	0.00092	0.40	4.60×10^{-6}
3	240	77	0.00080	0.32	3.33×10^{-6}
	260	74	0.00030	0.28	1.08×10^{-6}
	280	72	0.00020	0.26	6.43×10^{-7}
	300	71	0.00010	0.24	2.70×10^{-7}
	320	70	0.00005	0.22	9.40×10^{-7}
	350	69	0.00003	0.20	2.86×10^{-7}

DECREMENTO EN ESFUERZO TANGENCIAL

$\Delta \sigma_{FEC}$ (MPa)



INCREMENTO DE LA CONCENTRACION DE YODO (g/cm^2)

GRAFICA 31.- DECREMENTO EN EL ESFUERZO TANGENCIAL DE FALLA EN FUNCION DEL INCREMENTO EN LA CONCENTRACION DE YODO.

Zona 1 - $\Delta \sigma = 95.15 (\Delta C_I)^{0.031}$ (MPa) ; $3 \times 10^{-5} \leq C_I < 8 \times 10^{-4}$ g/cm² (4-21)

Zona 2 - $\Delta \sigma = 8.7 \times 10^4 \Delta C_I$ (MPa) ; $8 \times 10^{-4} < C_I \leq 1.43 \times 10^{-3}$ g/cm² (4-22)

Zona 3 - En donde $\Delta \sigma_{FEC}$ es altamente decreciente para:
 $C_I > 1.43 \times 10^{-3}$ g/cm², con una tendencia a cero para
 $C_I = 2.3 \times 10^{-4}$ g/cm².

Para obtener la rapidez de reacción equivalente se relacionará ($\Delta \sigma_{FEC} / \Delta t$) con la concentración C_I , columnas 4 y 5 de la tabla 10, similarmente relacionar a ($\Delta C_I / \Delta t$) con C_I columnas 4 y 6 de la tabla 10. Los resultados se observan en las gráficas 32 y 33, en las que se identifican dos zonas delimitadas por los intervalos de C_I , siguientes:

a) $3 \times 10^{-5} \leq C_I < 8 \times 10^{-4}$ g/cm², para el cual:

$$(\Delta \sigma / \Delta t) = 0.87 (C_I)^{0.14} \text{ (MPa/h)} \quad (4-23)$$

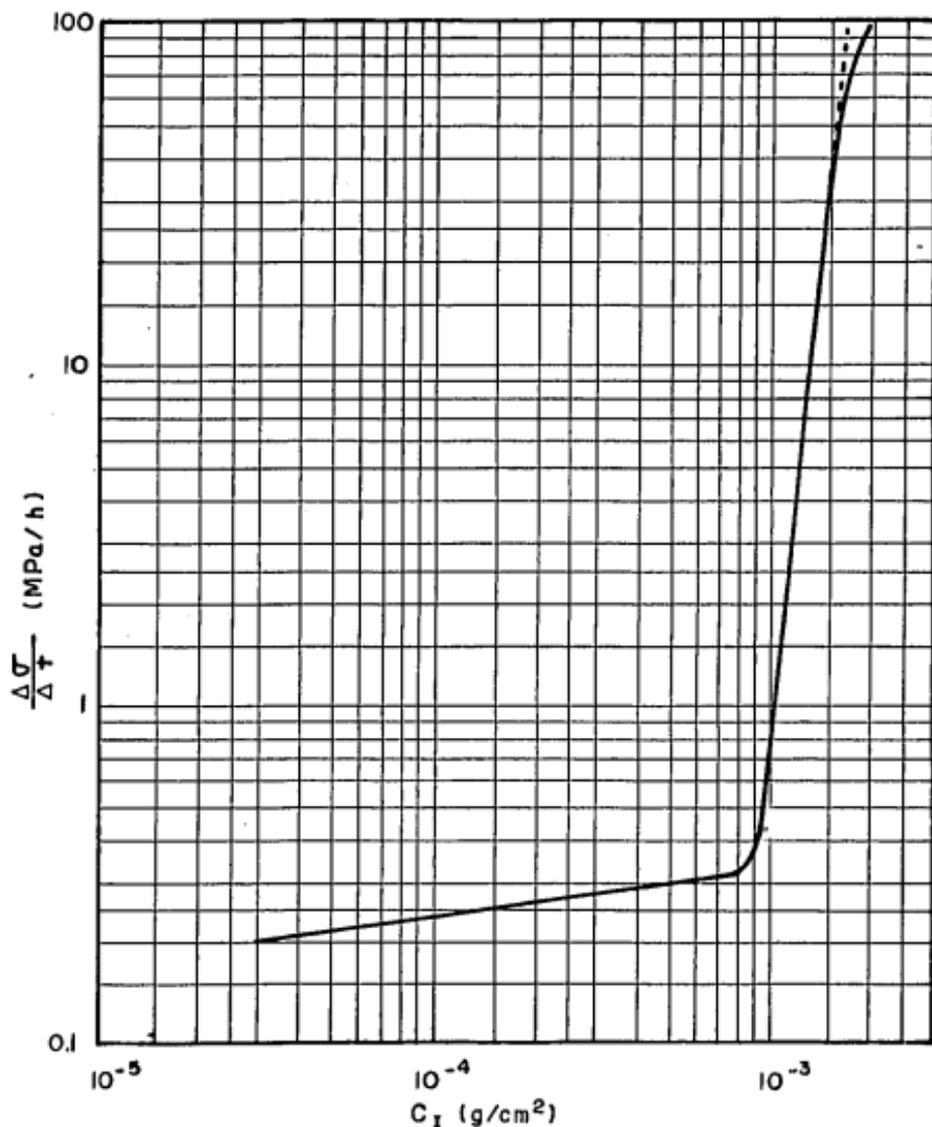
$$(\Delta C_I / \Delta t) = 0.0301 (C_I)^{1.26} \text{ (g/cm}^2\text{-h)}, (4-24)$$

b) $8 \times 10^{-4} < C_I \leq 1.5 \times 10^{-3}$ g/cm², para la cual:

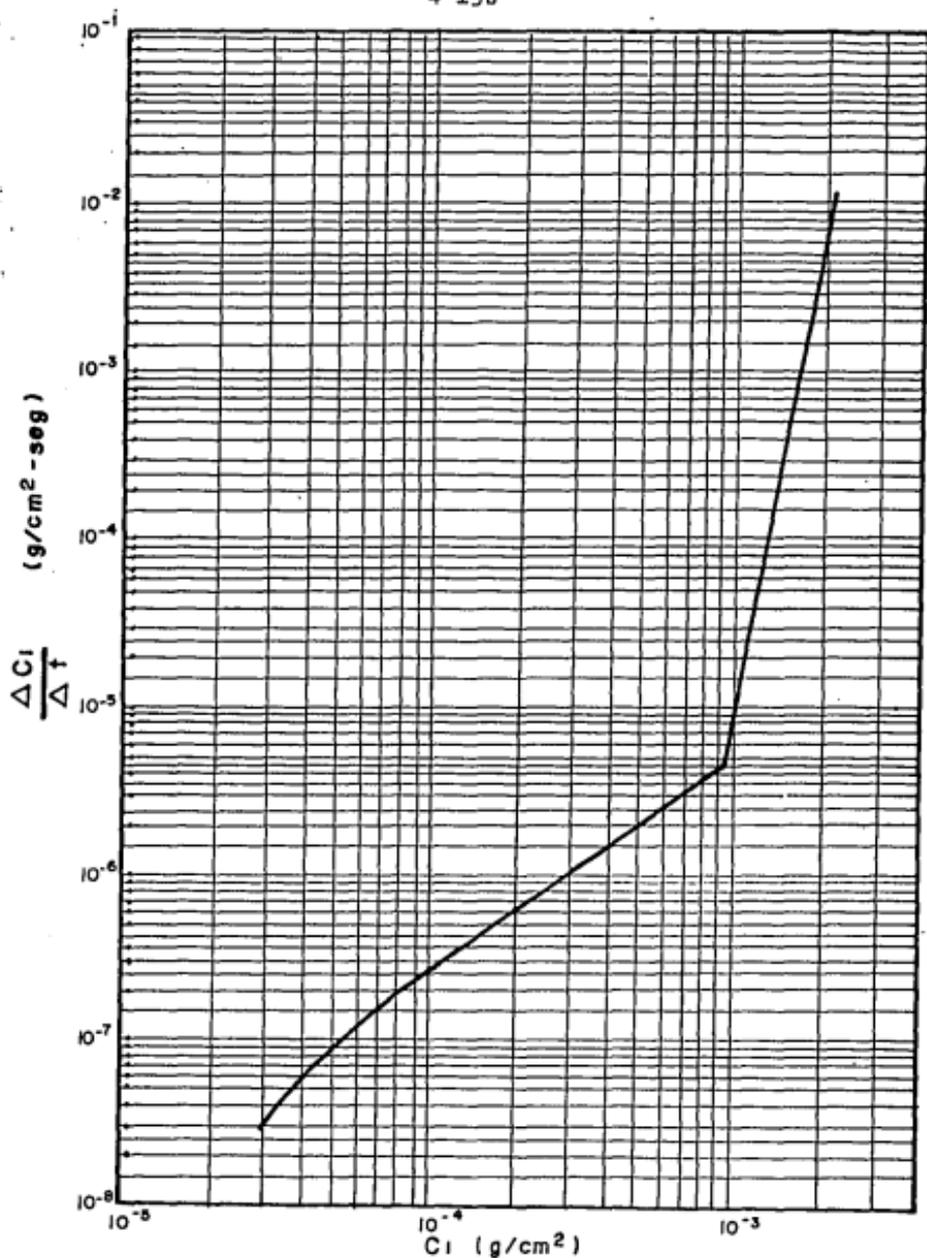
$$(\Delta \sigma / \Delta t) = 1.38 \times 10^{28} (C_I)^{9.38} \text{ (MPa/h)} \quad (4-25)$$

$$(\Delta C_I / \Delta t) = 1.38 \times 10^{23} (C_I)^{9.38} \text{ (g/cm}^2\text{-h)} \quad (4-26)$$

c) $C_I > 1.5 \times 10^{-3}$ g/cm², para el cual se inicia una desviación de ($\Delta \sigma / \Delta t$) del comportamiento tendiendo a un valor constante para $C_I = 2.3 \times 10^{-3}$ g/cm².



GRAFICA 32.- RAPIDEZ DE VARIACION DEL DECREMENTO DEL ESFUERZO TANGENCIAL DE FALLA, EN FUNCION DE LA CONCENTRACION DE YODO.

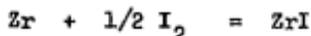


GRAFICA 33: RAPIDEZ DE VARIACION DEL INCREMENTO DE LA CONCENTRACION DE YODO EN FUNCION DE LA CONCENTRACION DE YODO.

Con estos resultados se muestra que en principio es factible establecer una velocidad de reacción equivalente para la acción del yodo sobre el circonio, basada en las concentraciones existentes en el ambiente externo a la grieta. También se podrá observar el cambio en la reacción química de las tres zonas de comportamiento al tomar en cuenta los distintos valores de las constantes y exponentes de las ecuaciones 4-23 y 4-24 y para la zona tres, el hecho de que la rapidez de cambio en el esfuerzo tiende aparentemente a un valor constante para concentraciones de yodo mayores a $2.1 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^2$, en tanto que la rapidez de cambio de la concentración de yodo se mantiene constante desde concentraciones de yodo de 10^{-4} g/cm^2 (zona 2).

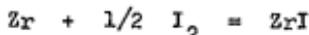
De esto se puede concluir que:

- 1) La rapidez de reacción en la zona 3 debe corresponder a la ecuación:



ya que; el avance es tan rápido a altos esfuerzos - que basta que el yodo remueva unos pocos átomos de circonio al frente de la grieta para que el esfuerzo, próximo a σ_{θ} , sea necesario para permitir el avance de la grieta en forma dúctil.

- 2) Para la zona 2, el tipo de reacción es la misma que en la zona 3:



aún cuando el avance de la grieta sea menor, lo que podría deberse a que el ZrI que se forma en el frente de la grieta lo hace constituyendo capas delgadas de cierta extensión proporcionales al esfuerzo aplicado, que permiten un avance ramificado de la grieta en varias direcciones permitiendo el ensan-

chamiento de ésta, según el siguiente diagrama:

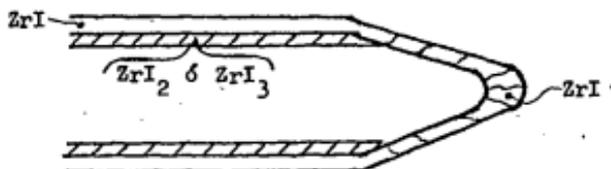
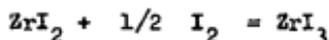
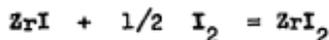


FIGURA 4.- FRACTURA DE LA CAPA DE ZrI AL FRENTE DE UNA GRIETA, SOBRE VAINAS DE CIRCALOY SOMETIDA A FEC.

Lo que permitiría que el avance se lleve a cabo en la dirección preferida, determinada por los planos con tendencia a la división (cleavage).

3) En la zona 1, los esfuerzos próximos al de umbral no son lo suficientemente grandes para permitir el avance continuo de la grieta en base a la existencia de capas de ZrI al frente de ésta; por lo que se requiere de un proceso de corrosión más intenso, en el cual se dá lugar a la formación de capas de yoduros superiores (ZrI_2 y ZrI_3) sobre la capa ya existente de ZrI, conforme a las siguientes reacciones:



Las capas de yoduros superiores son factibles de fracturarse a tales esfuerzos por lo que mediante este proceso la grieta avanza lentamente en comparación con aquél de la zona 2 ó 3.

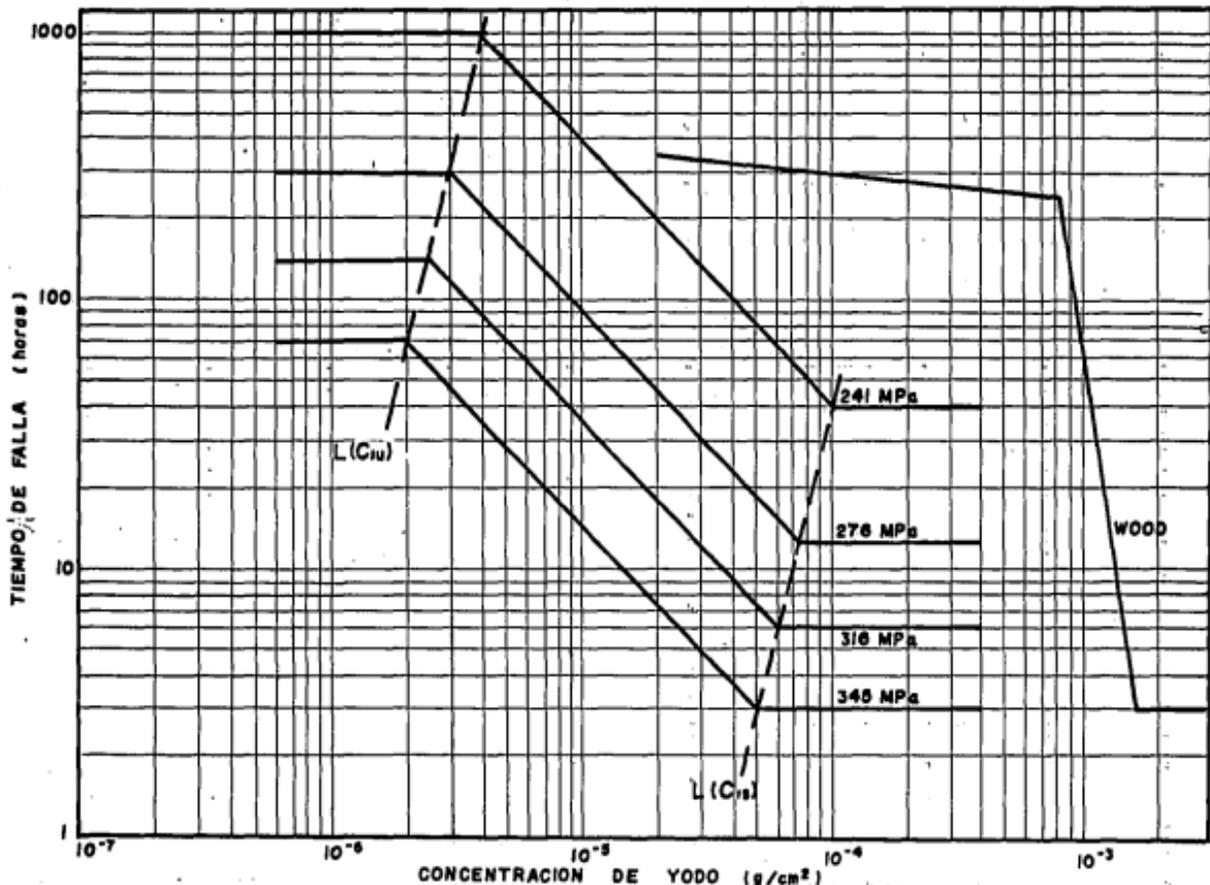
4) A esfuerzos menores al de umbral, la formación de yoduros superiores (ZrI_2 y ZrI_3) se lleva a cabo; pero tales esfuerzos no son suficientes para fracturar las capas de yoduros formadas al frente de la

de la grieta, lo que impide su avance. En tal situación y si existiera yodo en exceso sería posible la formación del tetrayoduro de circonio ZrI_4 , que es un gas a las temperaturas de operación, con lo cual el proceso de corrosión continuaría independiente-mente del esfuerzo aplicado, a consecuencia de la --remoción continua de átomos de Zr, lo que dados los tiempos de prueba o de operación no se ha manifiesta-do.

Este concepto de formación de la grieta puede asociar-se con las experiencias reportadas por Cubicciotti (6), en la --cual al exponer circaloy a vapores de ZrI_4 , inicialmente se cubrió de yodo la superficie y se fueron formando, sobre ésta, grá-nulos cristalinos de ZrI los que con el tiempo cubrieron total-mente la superficie y fueron aumentando estequeométricamente a $ZrI_{1.8}$ y a $ZrI_{2.3}$; finalmente se constituyeron : una capa de ZrI que cubría la superficie de circaloy y sobre la cual se formó--una capa delgada de $ZrI_{1.8}$, a partir de la que surgieron cristales de $ZrI_{2.8}$. Observaciones que constituyen un soporte para --predecir que el avance de la grieta en el fenómeno FEC se lleva a cabo mediante un proceso de rompimiento continuo de capas de ZrI , cuyos espesores están en relación al esfuerzo aplicado; a esfuerzos mayores, áreas y espesores menores de la capa de ZrI en la punta de la grieta y viceversa.

El valor de la concentración de saturación C_{IS} de --yodo representa el valor a partir de la cual se inicia la forma-ción de los yoduros superiores y que según lo observado en la --tabla 10 y gráfica 32 corresponde a 1.5×10^{-3} g/cm².

Al utilizar la información de Tucker (8) y Miller --(10) representada en la gráfica 34, referente a la variación --del tiempo de falla respecto de la concentración de yodo, en --



4-1.6a

GRAFICA 34.- TIEMPO DE FALLA EN FUNCION DE LA CONCENTRACION DE YODO PARA CIRCALLOY-4.

el intervalo de 10^{-7} a 10^{-3} g/cm², en el ambiente interno de los especímenes de circaloy reportados por Cubicciotti (6) sometidos a esfuerzos tangenciales constantes de : 241, 276, 316 y 345 MPa.

Según se observa, el comportamiento es similar a lo reportado por Wood (4) diferenciándose en los valores de umbral y saturación de concentración de yodo C_{IU} y C_{IS} , así como en la pendiente correspondiente a la zona 2 de proporcionalidad entre el tiempo de falla y la concentración de yodo. Tal diferencia deberá corresponder a la forma en que fueron aplicados los esfuerzos y alimentado el yodo en el ambiente; Wood usó cuñas para aplicar esfuerzos tangenciales de tensión y el yodo se dispuso en forma de cristales que se sublimaron a la temperatura de prueba, en tanto que lo reportado por Cubicciotti (6), Miller (10) y Tucker (8) corresponden a esfuerzos de estallamiento y alimentación de yodo mediante presurización, provocando una mejor penetración de yodo al frente de la grieta.

El emplear esta última información simplifica las consideraciones usadas anteriormente para interpretar el efecto de la concentración de yodo C_I sobre el tiempo de falla t_f y sobre el esfuerzo tangencial σ_{FEC} aplicados, por tratarse del mismo lote, aún cuando las pruebas se hayan desarrollado en diferentes laboratorios (SRI, BETTIS, KWU).

Al analizar la gráfica 34, correspondiente al circa loy-4 con estrías de 5 micras, se puede observar el comportamiento del tiempo de falla respecto a la concentración de yodo a diferentes esfuerzos, resaltando el hecho de que:

- a) Los puntos correspondientes al tiempo de falla t_{Ciu} y a la concentración de umbral C_{IU} , se pueden unir a través de una línea " $L(C_{IU})$ ".

b) Los puntos correspondientes al tiempo de falla $t_{C_{IS}}$ y a la concentración de saturación C_{IS} , se unen a través de una línea " $L(C_{IS})$ "

La expresión de la recta $L(C_{IU})$ se obtiene al considerar los siguientes puntos:

$t_{C_{IU}} (h)$	$C_{IU} (g/cm^2)$
70	2×10^{-6}
135	2.4×10^{-6}
300	3×10^{-6}
1005	4.2×10^{-6}

de aquí se tiene:

$$\text{Log } t_{C_{IU}} - \text{Log } t'_{C_{IU}} = m (\text{Log } C_{IU} - \text{Log } C'_{IU})$$

o bien:

$$(t_{C_{IU}} / t'_{C_{IU}}) = (C_{IU} / C'_{IU})^m \quad (4-27)$$

en donde:

$$m = (\text{Log } t'_{C_{IU}} - \text{Log } t''_{C_{IU}}) / (\text{Log } C'_{IU} - \text{Log } C''_{IU})$$

usando los valores de:

$$t_{C_{IU}} = 70 \text{ h} ; \quad C_I = 2 \times 10^{-6} \text{ g/cm}^2$$

$$t_{C_{IU}} = 300 \text{ h} ; \quad C_I = 3 \times 10^{-6} \text{ g/cm}^2$$

se tiene que el valor de la pendiente m es: $m = 3.51$

con lo cual se obtiene:

$$t_{C_{IU}} / t'_{C_{IU}} = (C_{IU} / C'_{IU})^{3.59} \quad (4-28)$$

tomando como referencia a :

$$t_{C_{IU}} = 70 \text{ h} ; C_I = 2 \times 10^{-6} \text{ g/cm}^2$$

se tiene:

$$t_{C_{IU}} = 2.016 \times 10^{22} (C_{IU})^{3.59} \quad (4-29)$$

La expresión para $L(C_{IU})$ resulta:

$$L(C_{IU}) = (t_{C_{IU}}, C_{IU}) \quad t_{C_{IU}} = 2.016 \times 10^{22} (C_{IU})^{3.59} \quad (h)$$

Para la recta $L(C_{IS})$ se tiene, usando los siguientes puntos:

$t_{C_{IS}}$ (h)	C_{IS} (g/cm^2)
3	5×10^{-5}
6	6×10^{-5}
40	10^{-4}

de aquí que:

$$\text{Log } t_{C_{IS}} - \text{Log } t'_{C_{IS}} = m' (\text{Log } C_{IS} - \text{Log } C'_{IS})$$

o bien:

$$t_{C_{IS}} / t'_{C_{IS}} = (C_{IS} / C'_{IS})^{m'} \quad (4-30)$$

en donde resulta: $m' = 3.8$

Tomando como referencia a:

$$t_{C_{IS}} = 3 \text{ h} ; C_{IS} = 5 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^2$$

se tiene:

$$t_{C_{IS}} = 6.623 \times 10^{16} (C_{IS})^{3.8} \quad (h) \quad (4-31)$$

con lo que la expresión de $L(C_{IS})$ resulta:

$$L(C_{IS}) = (t_{C_{IS}}, C_{IS}) \quad t_{C_{IS}} = 6.6 \times 10^{16} (C_{IS})^{3.8} \quad (h)$$

c) Al relacionar C_{IU} con ∇_{FEC} , considerando los puntos:

C_{IU} (g/cm^2)	∇_{FEC} (MPa)
2×10^{-6}	345
3×10^{-6}	276
4.2×10^{-6}	241

se obtiene una línea en escala Log-Log:

$$\text{Log } C_{IU} - \text{Log } C'_{IU} = M (\text{Log } \nabla_{FEC} - \text{Log } \nabla'_{FEC})$$

de donde resulta $M = -2.07$, en consecuencia:

$$(C_{IU} / C'_{IU}) = (\nabla_{FEC} / \nabla'_{FEC})^{-2.07} \quad (4-32)$$

Al relacionar C_{IS} con ∇_{FEC} , considerando los siguientes:

$C_{IS} (\text{g/cm}^2)$	$\nabla_{FEC} (\text{MPa})$
5×10^{-5}	345
6×10^{-5}	316
10^{-4}	241

también se tiene una recta en escala Log-Log:

$$\text{Log } C_{IS} - \text{Log } C'_{IS} = M' (\text{Log } \nabla_{FEC} - \text{Log } \nabla'_{FEC})$$

de donde resulta:

$$(C_{IS} / C'_{IS}) = (\nabla_{FEC} / \nabla'_{FEC})^{-1.92} \quad (4-33)$$

Al aplicar esta relación a los datos reportados por Cubicciotti para circaloy-4, se tiene que: $\nabla_{FECU} = 300 \text{ MPa}$ y consecuentemente $C_{IS} = 6.55 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^2$.

d) Al relacionar el tiempo de falla t_f con la concentración C_I , conforme a la gráfica 34, y considerando los siguientes puntos de la curva de 345 MPa:

$t_f (\text{h})$	$C_I (\text{g/cm}^2)$
70	2×10^{-6}
3	5×10^{-5}

se tiene:

$$\text{Log } t_f - \text{Log } t'_f = n (\text{Log } C_I - \text{Log } C'_I)$$

o bien:

$$(t_f / t'_f) = (C_I / C'_I)^n \quad (4-34)$$

en donde:

$$n = (\text{Log } t_f' - \text{Log } t_f'') / (\text{Log } C_I' - \text{Log } C_I'')$$

considerando los puntos (70MPa, 2×10^{-6} g/cm²) y (3MPa, 5×10^{-5} g/cm²), se tiene que: $n = -0.98$ aproximadamente -1 .

Con lo anterior, las tres zonas de la gráfica 34 son:

$$t_f(h) = \begin{cases} t_f' \left(\frac{C_I'}{C_I} \right) & ; C_{IU} \leq C_I \leq C_{IS} \\ t_{C_{IS}} & ; C_I > C_{IS} \\ t_{C_{IU}} & ; C_I < C_{IU} \end{cases} \quad (4-35)$$

Esta expresión representa el comportamiento general del tiempo de falla para el circaloy no irradiado a una temperatura dada, respecto a la concentración de yodo.

Para obtener el comportamiento general del circaloy en función de la concentración de yodo y del esfuerzo aplicado, se consideran los datos experimentales que en general se refieren a la concentración de saturación C_{IS} de yodo y se hace uso de las expresiones 4-30 y 4-33, para obtener:

$$t_{C_{IS}} = t_{C_{IS}}' \left(\frac{C_{IS}}{C_I'} \right)^{3.8} = t_{C_{IS}}' \left[\left(\frac{\sigma_{FEC}}{\sigma_{FEC}'} \right)^{1.93} \right]^{3.8} = t_{C_{IS}}' \left(\frac{\sigma_{FEC}}{\sigma_{FEC}'} \right)^{7.34}$$

usando la ecuación 4-35 con ; $t_f' = t_{C_{IS}}'$ y $C_I' = C_{IS}'$

se obtiene:

$$t_f(h) = \begin{cases} t_{C_{IS}}' \left(\frac{C_{IS}'}{C_I} \right) \left(\frac{\sigma_{FEC}}{\sigma_{FEC}'} \right)^{9.27} & ; \begin{cases} C_{IU} \leq C_I \leq C_{IS} \\ \sigma_{FEC} \leq \sigma \leq \sigma_{\theta} \end{cases} \\ t_{C_{IU}} & ; \begin{cases} C_I \leq C_{IU} \\ \sigma_{FEC} \leq \sigma \leq \sigma_{\theta} \end{cases} \\ t_{C_{IS}} & ; \begin{cases} C_I \geq C_{IS} \\ \sigma_{FEC} \leq \sigma \leq \sigma_{\theta} \end{cases} \end{cases} \quad (4-36)$$

en donde $t'_{C_{IS}}$ es el tiempo de falla a la concentración C_{IS} . Los valores límites de C_{IS} y C_{IU} se obtienen usando las ecuaciones 4-33 y 4-32 respectivamente.

En particular para el circaloy-4 se obtienen los siguientes datos de la curva 4 de la gráfica 30, que corresponden a la condición de no irradiación, concentración de saturación de yodo y a una temperatura de 633 K:

$$t'_{C_{IS}} = 24 \text{ h} \quad ; \quad \sigma'_{FEC} = \sigma_{FECU} = 300 \text{ MPa}$$

$$C'_{IS} = 6.55 \times 10^{-6} \text{ g/cm}^2 \quad ; \quad C_{IU} = 4.2 \times 10^{-6} \text{ g/cm}^2.$$

$$t_f(\text{h}) = \begin{cases} \frac{1.44 \times 10^{20}}{C_I \sigma^{2.27}} \\ t_{C_{IU}} \\ t_{C_{IS}} \end{cases} \quad ; \quad \begin{cases} C_{IU} \leq C_I \leq C_{IS} \text{ g/cm}^2 \\ \sigma_{FEC} \leq \sigma \leq \sigma_{\theta} \text{ MPa} \\ C_I \leq 4.2 \times 10^{-6} \text{ g/cm}^2 \\ 300 \leq \sigma \leq \sigma_{\theta} \text{ MPa} \\ C_I \geq 6.55 \times 10^{-6} \text{ g/cm}^2 \\ 300 \leq \sigma \leq \sigma_{\theta} \text{ MPa} \end{cases} \quad (4-37)$$

En la tabla 11 se proporcionan los resultados de la ecuación 4-37 a diferentes concentraciones de yodo y esfuerzos aplicados, observándose que son comparables con la gráfica 30.

Debido a la falta de datos experimentales que pudieran ayudar a obtener una expresión específica para el circaloy-2, se considerará que éste obedece el mismo comportamiento que el circaloy-4, es decir que obedece una relación del siguiente tipo:

$$t_f = (C'_{IS} / C_I) \cdot (\sigma / \sigma'_{FECU})^B t'_{C_{IS}} \quad (4-38)$$

en donde B representa la pendiente de la curva que relaciona

TABLE 11

C_I (g/cm^2)	σ (MPa)	t_f (h)
6.55×10^{-5}	500	0.21
	450	0.56
	400	1.66
	350	5.73
	300	24.0
5×10^{-5}	500	0.27
	450	0.73
	400	2.18
	350	7.51
	300	31.4
3×10^{-5}	500	0.46
	450	1.22
	400	3.63
	350	12.5
	300	52.3
7.5×10^{-6}	500	1.84
	450	4.88
	400	14.5
	350	50.1
	300	210.
7×10^{-6}	500	1.96
	450	5.22
	400	15.6
	350	54.0
	300	224.
2.7×10^{-6}	500	5.10
	450	13.5
	400	40.4
	350	139.
	300	581

$T = 633 \text{ K}$

$P = 0 \text{ n/m}^2$

a t_f con ∇_{FEC} en escala Log-Log y de acuerdo a la ecuación 4-3, $B = -10.32$.

De modo de que para el lote de circaloy-2 en estudio se tiene:

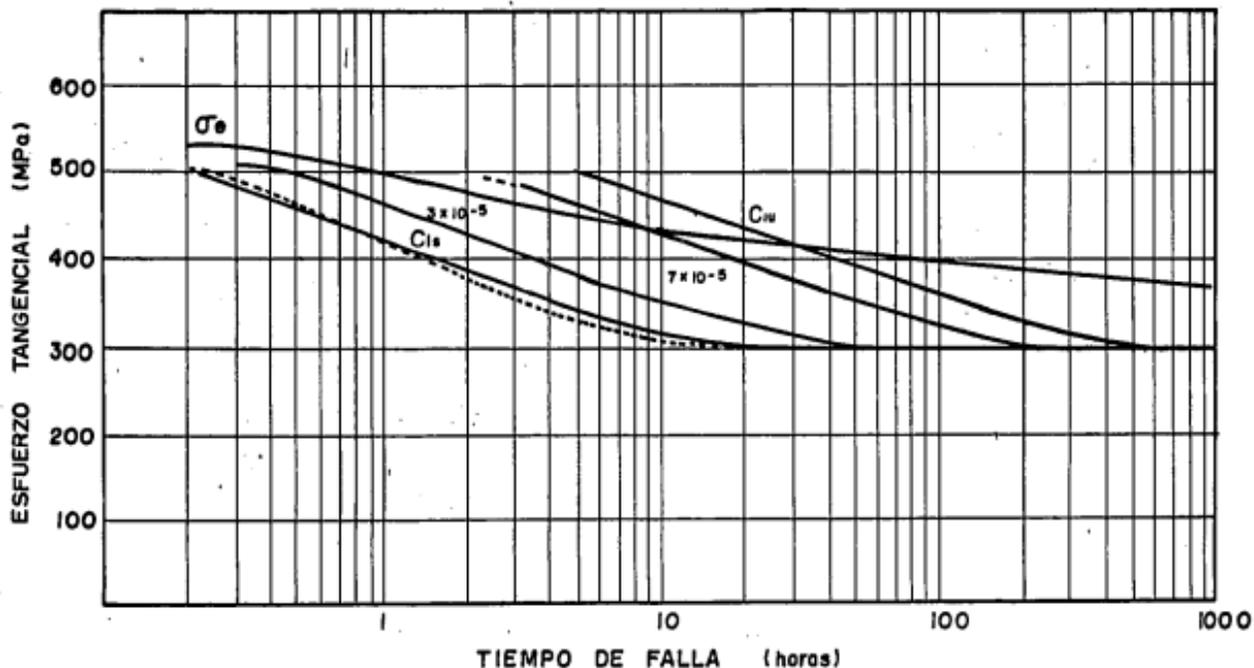
$$t_f(h) = \begin{cases} t'_{C_{IS}} (C'_{IS}/C_I)(\nabla/\nabla_{FECU})^{-10.32} & ; \begin{cases} C_{IU} \leq C_I \leq C_{IS} \\ \nabla_{FECU} \leq \nabla \leq \nabla_{\theta} \end{cases} \\ t_{C_{IS}} & ; C_I > C_{IS} \\ t_{C_{IU}} & ; C_I < C_{IU} \end{cases} \quad (4-39)$$

sustituyendo los valores de referencia, curva 3 gráfica 30, se tiene:

$$t_f(h) = \begin{cases} \frac{3.66 \times 10^{23}}{C_I \nabla^{10.32}} & ; \begin{cases} 2 \times 10^{-6} \leq C_I \leq 5.14 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^2 \\ 340 \leq \nabla \leq \nabla_{\theta} \text{ MPa} \end{cases} \\ t_{C_{IU}} & ; C_I > C_{IU} \\ t_{C_{IS}} & ; C_I < C_{IS} \end{cases} \quad (4-39)'$$

En la gráfica 35 se expresa la variación del tiempo de falla y del esfuerzo tangencial para circaloy-4, resultante de aplicar la ecuación 4-37 a las concentraciones de umbral ($2.7 \times 10^{-6} \text{ g/cm}^2$), de saturación ($6.55 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^2$), $3 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^2$ y a $7.5 \times 10^{-6} \text{ g/cm}^2$.

Usando la información proporcionada en las tablas de las páginas 4-16, 4-17 y 4-18, referentes a los puntos de las líneas $L(C_{IU})$ y $L(C_{IS})$, así como de la información exis-



GRAFICA 35.- ESFUERZO Y TIEMPO DE FALLA EN FUNCION DE LA CONCENTRACION DE YODO. ($C_{1m} = C_{1s} = C_{1u}$) PARA CIRCALOY - 4

PREDICCIÓN —

EXPERIMENTAL --- (CUBICCIOTTI)

tente en la tabla 8 en lo referente a ∇_{θ} se genera la siguiente tabla 12:

TABLA 12

t_f (h)	∇_{θ} (MPa)	∇_{FEC} (MPa)	$\Delta\nabla_{FEC}$ (MPa)	C_{IU} (g/cm ²)	C_{IS} (g/cm ²)	$(C_{IS} - C_{IU})^{0.5} / \Delta\nabla_{FEC}$ (g/cm ²) ^{0.5} /MPa)
3	400	345	116	2×10^{-6}	5×10^{-5}	5.97×10^{-5}
6	390	316	124	2.4×10^{-6}	6×10^{-5}	6.07×10^{-5}
15.5	375	276	154	3.2×10^{-6}	7.7×10^{-5}	5.7×10^{-5}
40	360	241	167	4.2×10^{-6}	10^{-4}	5.86×10^{-5}

en la que se indica claramente la correlación entre $\Delta\nabla_{FEC}$ y $(C_{IS} - C_{IU})$ la siguiente manera:

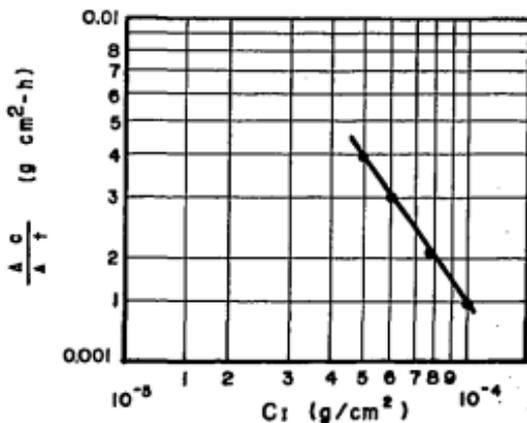
$$\Delta\nabla_{FEC} = 5.9 \times 10^{-5} (C_{IS} - C_{IU})^{0.5}$$

ésto representa para un lote en especial que existe una relación entre la velocidad de reacción expresada por $\Delta C_I / \Delta t$ y la razón de cambio en el esfuerzo $\Delta\nabla / \Delta t$.

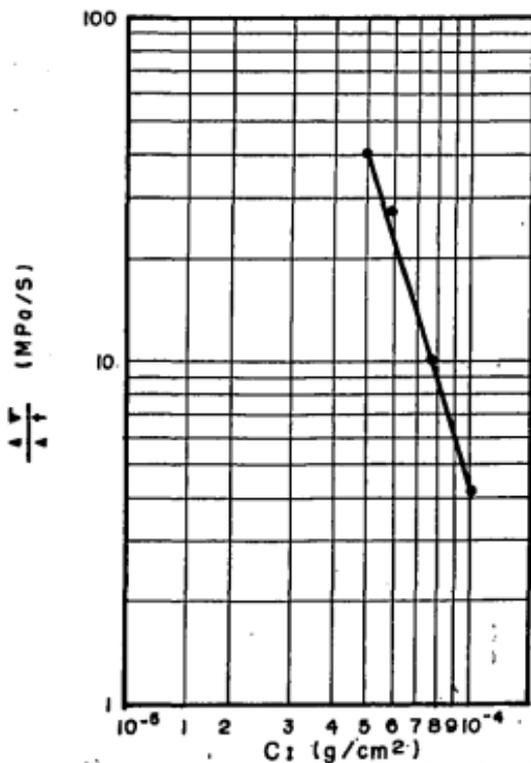
A continuación se procede a determinar alguna relación entre $\Delta\nabla / \Delta t$ y C_I , así como entre $\Delta C_I / \Delta t$ y C_I , para lo cual se elabora la siguiente tabla 13, tomando en consideración la información de la tabla 12:

TABLA 13

C_{IS} (g/cm ²)	$C_{IS} - C_{IU}$ (g/cm ²)	$(\Delta C_I / \Delta t)$ (g/cm ² -h)	$(\Delta\nabla / \Delta t)$ (MPa/h)
5×10^{-5}	4.8×10^{-5}	1.6×10^{-5}	38.7
6×10^{-5}	5.7×10^{-5}	9.4×10^{-6}	26.7
7.7×10^{-5}	7.4×10^{-5}	4.7×10^{-6}	9.94
10^{-4}	9.6×10^{-5}	2.4×10^{-6}	4.17



GRAFICA 37.- RAPIDEZ DE REACCION EN FUNCION DE LA CONCENTRACION DE YODO



GRAFICA 36.- RELACION ENTRE LA RAZON DE CAMBIO EN EL ESFUERZO Y LA CONCENTRACION DE YODO

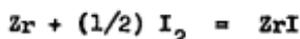
Con esta información se construye la gráfica 36, en la que se observa que el comportamiento entre la rapidez de variación en el esfuerzo respecto de la concentración de yodo en escala Log-Log se representa mediante una recta, cuya ecuación resulta ser:

$$\Delta \sigma / \Delta t = 6 \times 10^{-13} (C_I)^{-3.21} \quad (4-40)$$

en igual forma en la gráfica 37 se observa la relación entre la rapidez promedio de reacción ($\Delta C_I / \Delta t$) y la concentración de yodo C_I , resulta ser:

$$\Delta C_I / \Delta t = 5.12 \times 10^{-9} (C_I)^{-1.37} \quad (4-41)$$

En base a ésto se puede concluir que en forma similar a lo determinado cuando se usó la información de Wood, la reacción en la zona de proporcionalidad corresponde a la reacción química:



y cuya velocidad de reacción equivalente, en término de la concentración del ambiente externo de la grieta, bajo presurización se expresa por la ecuación 4-41, y por ende se puede referir en término de la rapidez de variación en el esfuerzo.

4-B . - EFECTO DE LA CATALISIS SOBRE EL FENOMENO FEC.

La catálisis como se mencionó en el capítulo 2 , se manifiesta por la presencia de los elementos ligantes o impurezas, esencialmente el fierro. Al respecto cabe mencionar las observaciones logradas por Cubicciotti (6,7) al exponer circaloy a vapores de tetrayoduro de circonio ZrI_4 .

Al obtener la fotografía de las superficies de los especímenes expuestos al tetrayoduro se reflejó la presencia del fierro en cada grieta formada y en consecuencia ante la reacción del circonio con el yodo, según se indica en la tabla 14 siguiente:

TABLA 14

ELEMENTOS PRESENTES EN %			ASPECTO SUPERFICIAL DEL ESPECIMEN
Zr	Fe	O ₂	
100	0	0	SUPERFICIE PLANA Y TERSA DE OXIDO DE CIRCONIO.
100	0.2	0.005	SUPERFICIE CONTENIENDO MON- TICULOS DE ZrI.
100	0.5	0.02	SUPERFICIE CONTENIENDO MON- TICULOS GRISES DE ZrI y ZrI ₂ .

Como podrá observarse en los puntos en donde la superficie de circaloy carece de fierro no se forman yoduros de circonio, en tanto que en aquellos donde el fierro estuvo presente se acumuló yoduro, aumentando la cantidad de yoduros presentes así como su estequiometría, conforme era mayor la cantidad de fierro. Este hecho demuestra, junto con las observaciones hechas por Wood, (4), que en el fenómeno FEC se requiere de agentes catalizadores como el fierro o el oxígeno en exceso.

4.C- INFLUENCIA DE LA IRRADIACION.

En la gráfica 24 se muestra la influencia de la irradiación sobre el esfuerzo de falla en ausencia de yodo a 590, 630 y 700 K de temperatura, en la que se puede observar el comportamiento lineal en escala semilogarítmica entre el esfuerzo de falla σ_{θ}^{ir} y la fluencia F , en el intervalo de 3.5×10^{24} a 4×10^{25} n/m^2 a temperatura constante de la siguiente forma:

$$\sigma_{\theta}^{ir} - \sigma_{\theta}^{ir'} = n (\text{Log } F - \text{Log } F')$$

o bien;

$$\sigma_{\theta}^{ir} = \sigma_{\theta}^{ir'} + \text{Log } (F / F')^n \quad (4-41)$$

en donde: $n = (\sigma_{\theta}^{ir'} - \sigma_{\theta}^{ir''}) / (\text{Log } F' - \text{Log } F'')$

tomando en cuenta los puntos siguientes, referidos en la tabla 7 a la temperatura de 590 K:

F (n/m^2)	σ_{θ}^{ir} (MPa)
1.8×10^{25}	704
2.3×10^{25}	730
4.0×10^{25}	783

se tiene: $n = 228$

$$\sigma_{\theta}^{ir} = \sigma_{\theta}^{ir'} + 228 \text{Log } (F / F') \quad (4-42)$$

Considerando: $\sigma_{\theta}^{ir'} = \sigma_{\theta} = 560$ MPa

se obtiene el umbral para el efecto de incremento debido a la relajación de esfuerzos residuales por irradiación, al que se le designa por F_u :

$$F_u = F' \times 10^{4.386 \times 10^{-3} (\sigma_{\theta}^{ir} - \sigma_{\theta})}$$

al considerar: $\sigma_{\theta}^{ir} = 783$ MPa y $F = 4 \times 10^{25}$ n/m^2

resulta $F_u = 4.2 \times 10^{24}$ n/m^2

Sustituyendo esta expresión en la 4-42, se tiene:

$$\sigma_{\theta}^{ir} = \sigma_{\theta}^{ir'} + 228 \log (F / F_u) \quad ; \quad F_u \leq F \leq 4 \times 10^{25} \quad (4-43)$$

debiéndose considerar: $\sigma_{\theta}^{ir'} = \sigma_{\theta}$ sí; $F < F_u$

tomando los valores de referencia; $\sigma_{\theta} = 560 \text{ MPa}$ $F = F_u$

$$\sigma_{\theta}^{ir} = \begin{cases} \sigma_{\theta} + 228 \log (F/4.2 \times 10^{24}) & ; \begin{cases} 4.2 \times 10^{24} \leq F \leq 4 \times 10^{25} \\ T = 590 \text{ K} \end{cases} \\ \sigma_{\theta} = 560 \text{ MPa} & ; \begin{cases} F \leq 4.2 \times 10^{24} \text{ n/m}^2 \\ T = 590 \text{ K} \end{cases} \end{cases} \quad (4-43)'$$

expresión que representa el comportamiento general del esfuerzo de estallamiento para circaloy-2 y circaloy-4 irradiados a una temperatura dada, en ausencia de yodo.

Para obtener la relación del esfuerzo de falla σ_{θ}^{ir} en función de la temperatura se consideran los puntos siguientes obtenidos de la tabla 7.

σ_{θ}^{ir} (MPa)	T (K)
783	590
738	630
640	700

al graficar estos puntos en escala semilog. se obtiene una recta de la forma:

$$\log \sigma_{\theta}^{ir} - \log \sigma_{\theta}^{ir'} = n' (T - T') \quad ; \quad 590 \leq T \leq 700$$

o bien:

$$\log (\sigma_{\theta}^{ir} / \sigma_{\theta}^{ir'}) = -8 \times 10^{-4} (T - T') \quad (4-44)$$

en donde $n' = (\log \sigma_{\theta}^{ir'} - \log \sigma_{\theta}^{ir}) / (T - T') = -8 \times 10^{-4}$

al relacionar esta expresión con la 4-43, se tiene:

$$\sigma_{\theta}^{ir} = \left[\sigma_{\theta} + 228 \log (F/F_u) \right] \times 10^{-8 \times 10^{-4} (T - T')} \quad (4-45)$$

$$; \quad 4.2 \times 10^{24} \leq F \leq 4 \times 10^{25} \quad \text{y} \quad 590 \leq T \leq 700$$

Al aplicar esta ecuación tomando como referencia los valores: $\sigma_{\theta} = 560 \text{ MPa}$, $P_u = 4.2 \times 10^{24} \text{ n/m}^2$, $T = 590 \text{ K}$, se tienen los resultados siguientes:

F (MPa)	σ_{θ}^{ir}		
	590 K	630 K	700 K
umbral	560	520	457
1.8×10^{25}	704	654	575
2.3×10^{25}	728	677	595
4.0×10^{25}	783	727	640

Estos resultados se han marcado con "X" en la gráfica 24 a fin de tener una referencia visual, para observar el ajuste de las curvas.

Para fluencias mayores a $4 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$, el efecto de esta variable provoca una disminución en el valor del esfuerzo de falla σ_{θ}^{ir} , observándose en la gráfica 24 que en el intervalo del umbral a $4 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$ las curvas se mantienen paralelas para las diferentes temperaturas, en tanto que para fluencias mayores a estos niveles, las pendientes son dependientes de la temperatura. La carencia de estos datos para fluencias mayores a $4.5 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$ evita la posibilidad de determinar el ajuste de σ_{θ}^{ir} arriba de ese valor.

4.D.- INFLUENCIA SIMULTANEA DE LA IRRADIACION Y EL YODO SOBRE EL FENOMENO FEC.

La acción simultanea de la irradiación y la concentración de yodo se puede observar a partir de las gráficas 38 y 39, en las que se presentan los resultados experimentales de Yaggee, Miller y Cubicciotti referentes al circaloy-2 y circaloy-4 trabajados en frío y liberados de esfuerzos.

De la gráfica 38 se tiene que las diferencias entre los esfuerzos de falla del circaloy-2 no irradiado ∇_{FEC} , son menores que aquellas correspondientes al circaloy-2 irradiado ∇_{FEC}^{ir} representadas por las diferencias entre las curvas 4 y 7 o las curvas 5 y 6 para fluencias de 10^{25} y 4×10^{25} n/m², respectivamente. Para circaloy-4, estas diferencias se representan en la gráfica 39, siendo las diferencias en ∇ expresadas por las curvas 1 y 2 para la condición de no irradiación entre las curvas 4 y 6 para una fluencia de 3.6×10^{25} n/m² y entre las curvas 5 y 7 para la fluencia de 6×10^{25} n/m².

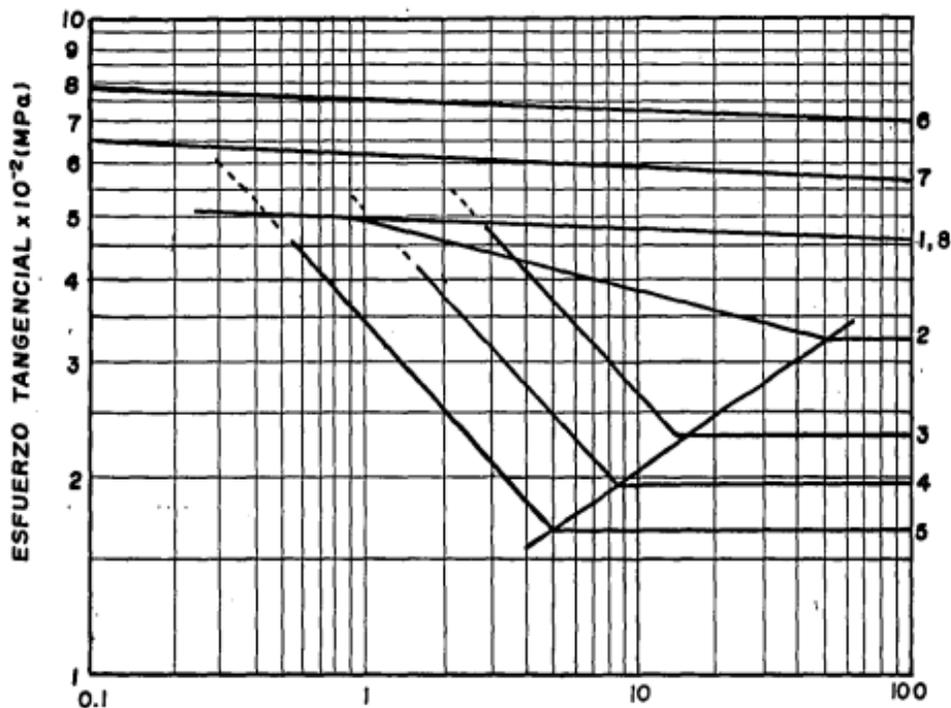
De esta situación se concluye que aún la irradiación del circaloy a fluencias en el intervalo de 10^{24} a 4×10^{25} n/m², incrementa la resistencia del material (ver gráfica 24) al liberarlo de esfuerzos residuales, también aumenta la susceptibilidad a FEC en presencia de yodo (ver gráficas 38 y 39).

4.D.1.- INFLUENCIA DE LA IRRADIACION BAJO LA CONCENTRACION DE SATURACION.

4D.1.1-PARA CIRCALOY-2 (TF/LE)

Al analizar las curvas 3, 4 y 5 de la gráfica 38 referente al circaloy-2 trabajado en frío y liberado de esfuerzos proveniente del reactor BRP, se obtiene los siguientes resultados:

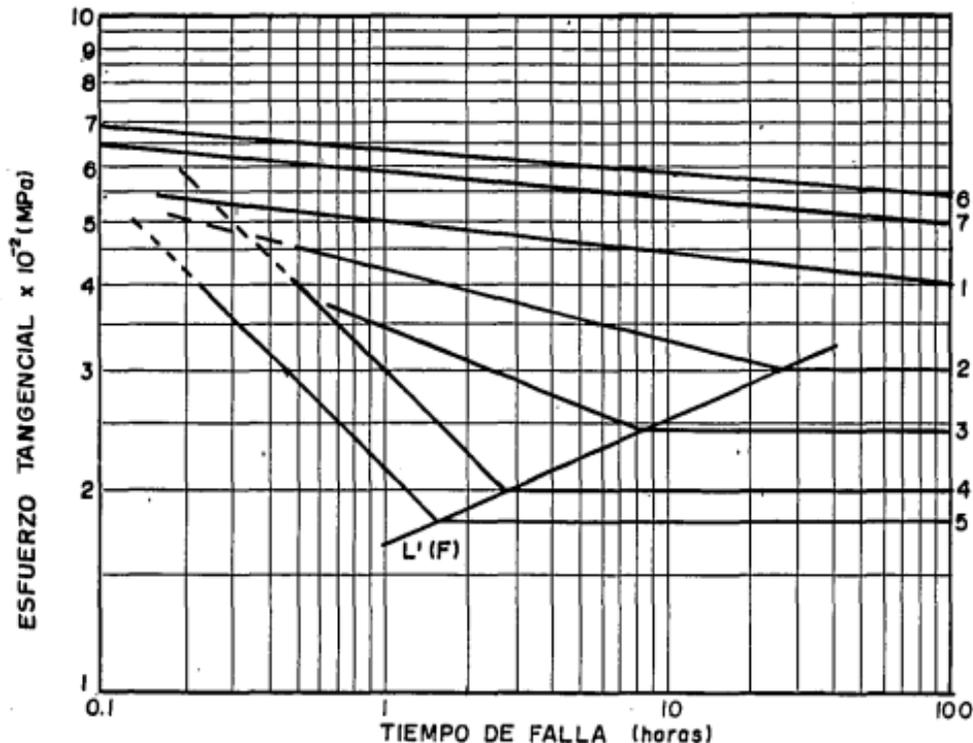
a) Los puntos representados por el cambio de pendientes, en las curvas de la 2 a la 5, se unen a través de una recta definida "L(F)", que relaciona los diversos esfuerzos de --



GRAFICA 38 - ESFUERZOS Y TIEMPOS DE FALLA PARA CIRCALOY - 2
TF/LE, BAJO DIVERSAS CONDICIONES.

N	T (K)	C _i (g/cm ²)	F (n/m ²)	N	T (K)	C _i (g/cm ²)	F (n/m ²)
1	598	0	0	5	598	0.0001	4 x 10 (25)
2	598	0.006	0	6	598	0	4 x 10 (25)
3	598	0.006	10 (24) *	7	598	0	10 (25)
4	598	0.0001	10 (25)	8	598	0	10 (24)

* 10 (24) ≅ 10²⁴



GRAFICA 39 - ESFUERZO Y TIEMPO DE FALLA CIRCALOY - 4 TF/LE
BAJO DIVERSAS CONDICIONES.

N	T (K)	C _i (g/cm ²)	F (n/m ²)	N	T (K)	C _i (g/cm ²)	F (n/m ²)
1	633	0	0	5	633	0.0001	$6 \times 10(25)$
2	633	0.0006	0	6	633	0	$3.6 \times 10(25)$
3	633	0.0006*	0	7	633	0	$6 \times 10(25)$
4	633	0.0001	$3.6 \times 10(25)$ *				

* PRERANURADO A 200 μ m.

• 10(25) = 10^{25}

umbral con los tiempos de falla t_p . La ecuación de la recta -- $L(F)$ se obtiene a partir de cualesquiera dos de los siguientes puntos:

σ_{FEUC}^{ir} (MPa)	t_p (h)
340	53.5
230	15.0
195	8.5
165	5.0

en donde:

- σ_{FEUC}^{ir} - El esfuerzo de umbral de circaloy irradiado a la concentración de saturación a una temperatura dada, T .
- σ_{FEUC} - El esfuerzo de umbral de circaloy no irradiado, a la concentración de saturación y misma temperatura dada, T .

es así que se tiene:

$$\log t_p - \log t_p' = m \left(\log \sigma_{FEUC}^{ir} - \log \sigma_{FEUC}'^{ir} \right)$$

o bien:

$$\left(t_p / t_p' \right) = \left(\sigma_{FEUC}^{ir} / \sigma_{FEUC}'^{ir} \right)^m \quad (4-46)$$

en donde:

$$m = \left(\log t_p' - \log t_p'' \right) / \left(\log \sigma_{FEUC}'^{ir} - \log \sigma_{FEUC}''^{ir} \right)$$

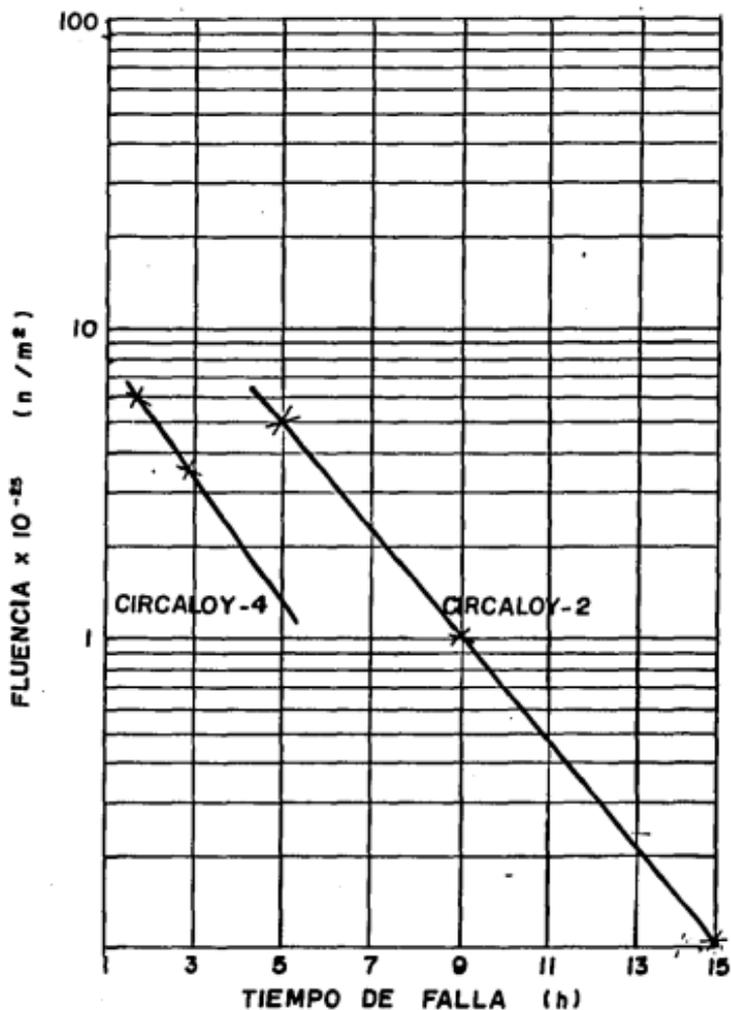
para:

$$\begin{aligned} \sigma_{FEUC}'^{ir} &= 230 \text{ MPa} & ; & & t_p' &= 15 \text{ h} \\ \sigma_{FEUC}''^{ir} &= 165 \text{ MPa} & ; & & t_p'' &= 5 \text{ h} \end{aligned}$$

resulta $m = 3.28$, por lo tanto para una temperatura constante de 593 K, se tiene que:

$$L(F) = \left\{ \left(\sigma_{FEUC}^{ir}, t_p \right) \mid t_p = t_p' \left(\sigma_{FEUC}^{ir} / \sigma_{FEUC}'^{ir} \right)^{3.28} \right\}; (4-47)$$

b) - Al relacionar t_p con la fluencia F , en forma - semilogarítmica se obtiene una recta, según la gráfica 40:



GRAFICA 40: RELACION ENTRE LA FLUENCIA Y EL TIEMPO DE FALLA PARA CIRCALLOY-2 Y CIRCALLOY-4, AMBOS TF/LE.

$$t_F - t'_F = m' (\text{Log } F - \text{Log } F') \quad (4-48)$$

en donde ; $m' = (t'_F - t''_F) / (\text{Log } F' - \text{Log } F'')$

Considerando los puntos:

t_F (h)	F (n/m^2)
53.5	0
15.0	10^{24}
8.5	10^{25}
5.0	4×10^{25}

se tiene que: $m' = -6.24$

$$t_F = t'_F - 6.24 \text{ Log } (F/F') \quad (4-49)$$

Para $t_F = 53.5$ h se obtiene la fluencia de umbral:

$$F_0 = F' \times 10^{-0.16 (53.5 - t'_F)} = 6.75 \times 10^{17} \text{ n/m}^2$$

correspondiente al esfuerzo de umbral del circaloy-2, ∇_{FECU}^{ir} , bajo la concentración de saturación C_{IS} .

C) Al analizar las curvas que relacionan al esfuerzo con el tiempo de falla t_f , para fluencias $F > F_0$, se observa que para el mismo lote (BRP) las curvas se mantienen paralelas; correspondiendo a la forma:

$$\text{Log } \nabla_{FEC}^{ir} - \text{Log } \nabla_{FEC}^{ir'} = M (\text{Log } t_f - \text{Log } t'_f)$$

o bien:

$$\nabla_{FEC}^{ir} / \nabla_{FEC}^{ir'} = (t_f / t'_f)^M \quad ; \quad \nabla_{FEC}^{ir} \geq \nabla_{FECU}^{ir} \quad (4-50)$$

Para circaloy-2, considerando los puntos:

∇_{FEC}^{ir} (MPa)	t_f (h)
400	0.7
250	2.0

correspondiendo a $F = 4 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$, $T = 593 \text{ K}$, $C_I = C_{IS}$ el valor de $M = -0.448$ con lo cual:

$$t_f(h) = \begin{cases} t_f' \left(\frac{\sigma_{FEC}^{ir}}{\sigma_{FEC}^{ir'}} \right)^{-2.234} & ; \begin{cases} P > P_0 \\ \sigma_{FEC}^{ir} > \sigma_{FEC}^{ir} \end{cases} \\ t_P & ; \begin{cases} P < P_0 \\ \sigma_{FEC}^{ir} = \sigma_{FEC}^{ir} \end{cases} \end{cases} \quad (4-51)$$

Considerando las expresiones 4-47 y 4-49, así como los valores de referencia; σ_{FECU} (MPa), t_{P_0} (h), P_0 (n/m^2), se tiene, respectivamente:

$$\sigma_{FEC}^{ir'} = \sigma_{FECU} \left(t_P / t_{P_0} \right)^{0.305} \quad (4-52)$$

y:

$$t_P = t_{P_0} - 6.24 \text{ Log}(P/P_0) \quad ; \quad P_0 < P \leq 4 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$$

sustituyendo $\sigma_{FEC}^{ir'}$, y, t_P en la expresión 4-51 se tiene:

$$t_f = t_P \left(\frac{\sigma_{FEC}^{ir}}{\sigma_{FECU}} \right)^{-2.234} \left[\left(\frac{\sigma_{FEC}^{ir}}{\sigma_{FECU}} \right) \left(t_{P_0} / t_P \right)^{0.305} \right]^{-2.234} \\ ; \quad \sigma_{FEC}^{ir} > \sigma_{FEC}^{ir}$$

Resumiendo, las tres zonas observadas se pueden expresar mediante las siguientes relaciones analíticas:

$$t_f(h) = \begin{cases} \frac{(t_P)^{1.6814}}{(t_{P_0})^{0.6814}} \frac{\sigma_{FECU}^{-2.234}}{\sigma_{FEC}^{ir}} & ; \begin{cases} P_0 < P \leq 4 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 \\ \sigma_{FECU}^{ir} \leq \sigma_{FEC} \leq \sigma_{\theta}^{ir} \text{ MPa} \end{cases} \\ \geq t_{P_0} \left(\frac{\sigma_{FEC}}{\sigma_{FECU}} \right)^{-10.32} & ; \begin{cases} P \leq P_0 \text{ n/m}^2 \\ \sigma_{FECU} \leq \sigma_{FEC} \leq \sigma_{\theta} \text{ MPa} \end{cases} \\ t_P = (t_{P_0} - 6.24 \text{ Log}(P/P_0)) \left(\frac{\sigma_{FECU}}{\sigma_{FEC}} \right)^{2.234} & ; \begin{cases} P_0 < P \leq 4 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 \\ \sigma_{FEC}^{ir} = \sigma_{FECU}^{ir} \text{ MPa} \end{cases} \\ \geq t_{P_0} & ; \begin{cases} P \leq P_0 \\ \sigma_{FEC} = \sigma_{FECU} \text{ MPa} \end{cases} \end{cases} \quad (4-53)$$

En particular para el lote en estudio a la temperatura de 593 K y a la concentración de saturación (gráfica 38, curva 2):

$$t_{Po} = 53.5 \text{ h}$$

$$\nabla_{FECU}^{ir} = 340 \text{ MPa}$$

$$F_o = 6.75 \times 10^{17} \text{ n/m}^2$$

$$t_f = \left\{ \begin{array}{l} \geq t_{Po} = \frac{(t_{Po} - 6.24 \text{ Log}(F/6.75 \times 10^{17}))^{1.6814} (\nabla_{FEC}^{ir}/340)^{-2.234}}{(t_{Po})^{0.6814}} \\ \quad ; \left\{ \begin{array}{l} 6.75 \times 10^{17} < F \leq 4 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 \\ \nabla_{FECU}^{ir} \leq \nabla_{FEC} \leq \nabla_{\theta}^{ir} \text{ MPa} \end{array} \right. \\ \\ \geq t_P = (t_{Po} - 6.24 \text{ Log}(F/6.75 \times 10^{25})) \\ \quad ; \left\{ \begin{array}{l} 6.75 \times 10^{17} < F \leq 4 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 \\ \nabla_{FEC}^{ir} = \nabla_{FECU}^{ir} \text{ MPa} \end{array} \right. \\ \\ t_{Po} (\nabla_{FEC}/340)^{-10.32} ; \left\{ \begin{array}{l} F < 6.75 \times 10^{17} \text{ n/m}^2 \\ 340 \leq \nabla_{FEC} < \nabla_{\theta} \text{ MPa} \end{array} \right. \\ \\ \geq t_{Po} = 53.5 \quad ; \left\{ \begin{array}{l} F < 6.75 \times 10^{17} \text{ n/m}^2 \\ \nabla_{FEC} = 340 \text{ MPa} \end{array} \right. \end{array} \right.$$

(4-54)

expresiones que dan el comportamiento del circaloy-2 en condición de irradiación bajo un ambiente de yodo a la concentración de saturación, a la temperatura de 593 K.

4.D.1.2. - PARA CIRCALLOY-4 (TF/LE).

Analizando las curvas 4 y 5 de la gráfica 39 correspondientes a vainas del reactor HBR y siguiendo el mismo razonamiento que se usó para el circaloy-2, se obtiene la siguiente información:

t_F (h)	∇_{FEUC}^{ir} (MPa)	F (n/m^2)
1.6	180	6×10^{25}
2.8	200	3.6×10^{25}
24.	300	0

con lo cual se procede a determinar las expresiones equivalentes a los incisos a, b, c, anteriores:

a)' - La expresión para $L'(F)$ que relaciona a los esfuerzos de umbral con los tiempos de falla t_F , resulta ser:

$$L'(F) = \left\{ (\nabla_{FEC}^{ir}, t_F) \mid t_F = t'_F (\nabla_{FEUC}^{ir} / \nabla_{FEC}^{ir})^{5.31} \right\}; \quad (4-55)$$

b)' - La relación entre el tiempo de falla t_F correspondiente al esfuerzo de umbral, con la fluencia F resulta ser:

$$t_F = t'_F - 5.41 \log(F/F_0); \quad F_0 < F \leq 6 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 \quad (4-56)$$

con lo cual se determina la fluencia de umbral F_0 cuyo valor - resulta ser:

$$F_0 = 4.33 \times 10^{21} \text{ n/m}^2$$

c)' - La relación entre el esfuerzo de umbral bajo irradiación ∇_{FEUC}^{ir} y el tiempo de falla t_f para fluencias $F > F_0$ resulta ser:

$$t_f = t'_f (\nabla_{FEC}^{ir} / \nabla_{FEUC}^{ir})^{-2.41}; \quad \begin{matrix} F > 4.33 \times 10^{21} & \text{n/m}^2 \\ \nabla_{FEUC}^{ir} \leq \nabla_{FEC}^{ir} \leq \nabla_{\theta}^{ir} & \text{MPa} \end{matrix}$$

en donde ∇_{FEUC}^{ir} y ∇_{θ}^{ir} se determinan con las ecuaciones 4-55 y 4-43, respectivamente.

d)' - Al relacionar las expresiones 4-55, 4-56 y 4-57, se tiene que para la temperatura de 633 K y a la concentración de saturación C_{IS} :

$$t_f = \left\{ \begin{array}{l} \frac{(t_f)^{1.454}}{(t_{F_0})^{0.454}} \left(\nabla_{FECU}^{ir} / \nabla_{FEC}^{ir} \right)^{2.41} \\ \quad ; \left\{ \begin{array}{l} F_0 < F \leq 6 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 \\ \nabla_{FECU}^{ir} \leq \nabla_{FEC}^{ir} \leq \nabla_{\theta}^{ir} \text{ MPa} \end{array} \right. \\ \\ \geq t_f = t_{F_0} - 5.41 \text{ Log}(F / F_0) \\ \quad ; \left\{ \begin{array}{l} F_0 < F \leq 6 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 \\ \nabla_{FEC}^{ir} = \nabla_{FECU}^{ir} \text{ MPa} \end{array} \right. \\ \\ t_{F_0} \left(\nabla_{FECU} / \nabla_{FEC} \right)^{9.27} \\ \quad ; \left\{ \begin{array}{l} F < F_0 \text{ n/m}^2 \\ \nabla_{FECU} \leq \nabla_{FEC} \leq \nabla_{\theta} \text{ MPa} \end{array} \right. \\ \\ \geq t_{F_0} \\ \quad ; \left\{ \begin{array}{l} F < F_0 \\ \nabla_{FEC} = \nabla_{FECU} \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (4-58)$$

Expresión que da el comportamiento del circaloy-4 en condición de irradiación bajo ambiente de yodo a la concentración de saturación, a la temperatura de 633 K.

En particular para el lote de circaloy-4 en estudio:

$$\begin{array}{l} T = 633 \text{ K} \quad ; \quad t_{F_0} = 24 \text{ h} \\ F_0 = 4.33 \times 10^{21} \text{ n/m}^2 \quad ; \quad \nabla_{FECU} = 300 \text{ MPa} \end{array}$$

$$\left. \begin{aligned}
 & \frac{(24 - 5.41 \operatorname{Log}(F/4.33 \times 10^{21}))^{1.454}}{(24)^{0.454}} (300/\sigma_{FEC}^{ir})^{2.41} \\
 & \quad ; \left\{ \begin{array}{l} 4.33 \times 10^{21} < F \leq 6 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 \\ \sigma_{FECU}^{ir} \leq \sigma_{FEC}^{ir} \leq \sigma_{\theta}^{ir} \text{ MPa} \end{array} \right. \\
 & \geq 24 - 5.41 \operatorname{Log}(F/4.33 \times 10^{21}) \\
 & \quad ; \left\{ \begin{array}{l} 4.33 \times 10^{21} < F \leq 6 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 \\ \sigma_{FEC}^{ir} = \sigma_{FECU}^{ir} \end{array} \right. \\
 & 24 (300 / \sigma_{FEC})^{9.27} \\
 & \quad ; \left\{ \begin{array}{l} F < 4.33 \times 10^{21} \text{ n/m}^2 \\ 300 \leq \sigma_{FEC} \leq \sigma_{\theta} \text{ MPa} \end{array} \right. \\
 & \geq 24 \\
 & \quad ; \left\{ \begin{array}{l} F < 4.33 \times 10^{21} \text{ n/m}^2 \\ \sigma_{FEC} = 300 \text{ MPa} \end{array} \right.
 \end{aligned} \right\} t_f = \text{(h)}$$

(4-59)

4.D.2.- INFLUENCIA DE LA IRRADIACION Y DE CONCENTRACIONES VARIABLES DE YODO

Al introducir la variación del tiempo de falla t_f en función de la concentración de yodo C_I en las ecuaciones 4-53 y 4-58, se obtienen las expresiones para el tiempo de falla en término de la fluencia neutrónica F y de la concentración de yodo para el circaloy-2 y circaloy-4, ambos trabajados en frío y liberados de esfuerzo.

A) - PARA CIRCALOY-2 (TF/L3).

1) Al utilizar la ecuación 4-39 se obtienen los tiempos de falla t_F , al considerar que:

$$t_{F0} = t_f$$

o sea:

$$t_{F0} = 3.666 \times 10^{23} / C_I (\nabla_{FECU})^{10.32} \quad (4-60)$$

$$; C_{IU} \leq C_I \leq C_{IS}$$

en donde:

$$C_{IU} = 4 \times 10^{-6} (241 / \nabla_{FECU})^{2.07}$$

$$C_{IS} = 10^{-4} (241 / \nabla_{FECU})^{1.93}$$

2) Considerando que para el lote en estudio a 593 K, $\nabla_{FECU} = 340$ MPa y al sustituir este valor en la expresión 4-60 resulta que:

$$t_{F0} = 2.75 \times 10^{-3} / C_I \quad (4-61)$$

3) Sustituyendo la ecuación 4-61 en la ecuación 4-49 y al considerar el valor de la fluencia de umbral $F_0 = 6.75 \times 10^{17}$ n/m², se tiene:

$$t_F = t_{F0} - 6.24 \text{ Log } (F/F_0)$$

y consecuentemente:

$$t_F = (2.75 \times 10^{-3} / C_I) - 6.24 \text{ Log}(F / 6.75 \times 10^{17}) ; \quad C_{IU} \leq C_I \leq C_{IS} \\ F > F_0$$

4) Sustituyendo las ecuaciones 4-39, 4-61 y 4-62 en la expresión analítica 4-53, se tiene:

$$t_F = \left\{ \begin{array}{l} \frac{\left(\frac{2.75 \times 10^{-3}}{C_I} - 6.24 \text{ Log} \frac{F}{6.75 \times 10^{17}} \right)^{1.6814} \left(\frac{\nabla_{FECU}}{\nabla} \right)^{2.234}}{\left(\frac{2.75 \times 10^{-3}}{C_I} \right)^{0.6814}} \\ \geq \left(\frac{2.75 \times 10^{-3}}{C_I} - 6.24 \text{ Log} \frac{F}{6.75 \times 10^{17}} \right) \left(\frac{\nabla_{FECU}}{\nabla} \right)^{2.234} \\ \geq \frac{3.666 \times 10^{23}}{C_I \nabla^{10.32}} \\ \geq \frac{2.75 \times 10^{-3}}{C_I} \end{array} \right. ; \left\{ \begin{array}{l} F_0 < F \leq 4 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 \\ \nabla_{FECU}^{ir} \leq \nabla \leq \nabla_{\theta}^{ir} \text{ MPa} \\ C_{IU} \leq C_I \leq C_{IS} \text{ g/cm}^2 \end{array} \right.$$

$$(h) \left\{ \begin{array}{l} F_0 < F \leq 4 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 \\ \nabla_{FECU}^{ir} = \nabla \text{ MPa} \\ C_{IU} \leq C_I \leq C_{IS} \text{ g/cm}^2 \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} F \leq F_0 \\ \nabla_{FECU} \leq \nabla \leq \nabla_{\theta} \\ C_{IU} \leq C_I \leq C_{IS} \text{ g/cm}^2 \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} F \leq F_0 \\ \nabla = \nabla_{FECU} \\ C_{IU} \leq C_I \leq C_{IS} \text{ g/cm}^2 \end{array} \right.$$

en donde ∇ representa al esfuerzo aplicado, debiendo tomar en cuenta que:

$$t_f = t_f(C_{IU}) \quad ; \text{ sí } C_I < C_{IU}$$

$$t_f = t_f(C_{IS}) \quad ; \text{ sí } C_I > C_{IS}$$

$$(4-62') \quad \nabla_{FECU}^{ir} = \nabla_{FECU} \left[(t_{F_0} - 6.24 \text{ Log}(F/P_0)) / t_{F_0} \right]^{0.305}$$

Considerando que para el lote de circaloy-2 en estudio:

$$C_{IU} = 2 \times 10^{-6} \text{ g/cm}^2$$

$$C_{IS} = 5.14 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^2$$

$$\nabla_{FECU} = 340 \text{ MPa}$$

se tiene sustituyendo en la expresión 4-62:

$$t_f = \left\{ \begin{array}{l} \frac{2.513 \times 10^7 C_I^{0.6814}}{\nabla^{-2.234}} \left(\frac{2.75 \times 10^{-3}}{C_I} - 6.24 \text{ Log} \frac{F}{6.75 \times 10^{17}} \right)^{1.6814} \\ \quad ; \left\{ \begin{array}{l} 6.75 \times 10^{17} < F \leq 4 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 \\ \nabla_{FECU}^{ir} \leq \nabla \leq \nabla_{\theta}^{ir} \text{ MPa} \\ 2 \times 10^{-6} \leq C_I \leq 5.14 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^2 \end{array} \right. \\ \\ \geq \left(\frac{2.75 \times 10^{-3}}{C_I} - 6.24 \text{ Log} \frac{F}{6.75 \times 10^{17}} \right) \times 4.5 \times 10^5 \nabla^{-2.234} \\ \quad (h) \quad ; \left\{ \begin{array}{l} 6.75 \times 10^{17} < F \leq 4 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 \\ \nabla_{FECU}^{ir} = \nabla \text{ MPa} \quad (4-63) \\ 2 \times 10^{-6} \leq C_I \leq 5.14 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^2 \end{array} \right. \\ \\ \frac{3.666 \times 10^{23}}{C_I \nabla^{10.32}} \quad ; \left\{ \begin{array}{l} F \leq 6.75 \times 10^{17} \text{ n/m}^2 \\ \nabla_{FECU} \leq \nabla \leq \nabla_{\theta} \text{ MPa} \\ 2 \times 10^{-6} \leq C_I \leq 5.14 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^2 \end{array} \right. \\ \\ \geq \frac{2.75 \times 10^{-3}}{C_I} \quad ; \left\{ \begin{array}{l} F \leq 6.75 \times 10^{17} \text{ n/m}^2 \\ \nabla = \nabla_{FECU} = 340 \text{ MPa} \\ 2 \times 10^{-6} \leq C_I \leq 5.14 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^2 \end{array} \right. \end{array} \right.$$

en donde:

∇ ; representa al esfuerzo aplicado en MPa

C_I ; representa la concentración de yodo en g/cm^2

$$\nabla_{FECU}^{ir} = 101 \left(\frac{2.75 \times 10^{-3}}{C_{IS}} - 6.24 \log \left(\frac{F}{6.75 \times 10^{17}} \right) \right)^{0.305}$$

$$\nabla_{\theta}^{ir} = 340 + 228 \log(F/4.2 \times 10^{24}) \quad (4-64)$$

Se podrá observar que el comportamiento general corresponde a una expresión de la forma:

$$t_f = \frac{(t_{F_0} - 6.24 \log(F/F_0))^a}{(t_{F_0})^{a-1}} \left(\frac{\nabla_{FECU}}{\nabla} \right)^b \quad (4-65)$$

en donde: las constantes "a" y "b" son específicas para un circaloy determinado, así como también lo son t_{F_0} y la fluencia de umbral F_0 .

El resultado de la aplicación de la expresión 4-63 - se proporciona en la tabla 17, en la columna correspondiente a la temperatura de 593 K.

B) - PARA CIRCALOY-4 (TF/LE).

Para el circaloy-4 se sigue una secuencia similar a la aplicada en el caso del circaloy-2, para introducir la influencia del yodo en el tiempo de falla t_f .

1)- Al utilizar la ecuación 4-37 se obtienen los tiempos de falla t_f , al considerar que :

$$t_{F_0} = t_f \quad ; \text{ o sea:}$$

$$t_{F_0} = 1.44 \times 10^{20} / C_I \nabla^{9.27} \quad ; \quad C_{IU} \leq C_I \leq C_{IS} \quad ; (4-66)$$

en donde:

$$C_{IU} = 2.7 \times 10^{-6} (241 / \nabla_{FECU})^{2.07} \quad g/cm^2$$

$$C_{IS} = 6.55 \times 10^{-5} (241 / \sqrt{P_{PECU}})^{1.93} \quad ; \quad g/cm^2$$

2) - Al considerar que para el lote en estudio a 633 K, $\sqrt{P_{PECU}} = 300$ MPa y al sustituir este valor en la expresión 4-66 resulta:

$$t_{P_0} = 1.57 \times 10^{-3} / C_I \quad ; \quad C_{IU} \leq C_I \leq C_{IS} \quad (4-67)$$

3) - Al sustituir la ecuación 4-67 en la ecuación 4-56 y al considerar el valor de la fluencia de umbral $P_0 = 4.33 \times 10^{21}$ n/m², se tiene:

$$\begin{aligned} t_P &= t_{P_0} - 5.41 \text{ Log}(P/P_0) \\ &= \frac{1.57 \times 10^{-3}}{C_I} - 5.41 \text{ Log} \left(\frac{P}{4.33 \times 10^{21}} \right) \\ & \quad ; \quad C_{IU} \leq C_I \leq C_{IS} \quad (4-68) \\ & \quad P > P_0 \end{aligned}$$

4) - Al sustituir las expresiones 4-37, 4-67 y 4-68 en las expresiones analíticas 4-58, se tiene:

$$\left. \begin{aligned}
 & \left(\frac{1.57 \times 10^{-3}}{C_I} - 5.41 \operatorname{Log} \frac{F}{4.33 \times 10^{21}} \right)^{1.454} \left(\frac{\sigma_{FECU}}{\sigma} \right)^{2.41} \\
 & \left(\frac{1.44 \times 10^{20}}{C_I \sigma^{9.27}} \right)^{0.454} \\
 & ; \left\{ \begin{array}{ll} F_0 < F \leq 6 \times 10^{25} & \text{n/m}^2 \\ \sigma_{FECU}^{ir} \leq \sigma \leq \sigma_{\theta}^{ir} & \text{MPa} \\ C_{IU} \leq C_I \leq C_{IS} & \text{g/cm}^2 \end{array} \right. \\
 & \geq \left(\frac{1.57 \times 10^{-3}}{C_I} - 5.41 \operatorname{Log} \frac{F}{4.33 \times 10^{21}} \right) \left(\frac{\sigma_{FECU}}{\sigma} \right)^{2.41} \\
 & ; \left\{ \begin{array}{ll} F_0 < F \leq 6 \times 10^{25} & \text{n/m}^2 \\ \sigma = \sigma_{FECU}^{ir} & \text{MPa} \\ C_{IU} \leq C_I \leq C_{IS} & \text{g/cm}^2 \end{array} \right. \\
 & \frac{1.44 \times 10^{20}}{C_I \sigma^{9.27}} ; \left\{ \begin{array}{ll} F \leq F_0 & \text{n/m}^2 \\ \sigma_{FECU} \leq \sigma \leq \sigma_{\theta} & \text{MPa} \\ C_{IU} \leq C_I \leq C_{IS} & \text{g/cm}^2 \end{array} \right. ; (4-69) \\
 & \geq \frac{1.57 \times 10^{-3}}{C_I} \left\{ \begin{array}{ll} F \leq F_0 & \text{n/m}^2 \\ \sigma = \sigma_{FECU} & \text{MPa} \\ C_{IU} \leq C_I \leq C_{IS} & \text{g/cm}^2 \end{array} \right.
 \end{aligned} \right\} t_f = \text{(h)}$$

em donde σ representa al esfuerzo aplicado, debiendo tomar en cuenta que:

$$t_f = t_f(C_{IU}) \quad ; \text{ sí } \quad C_I < C_{IU}$$

$$t_f = t_f(C_{IS}) \quad ; \text{ sí } \quad C_I > C_{IS}$$

$$\sigma_{FECU}^{ir} = \sigma_{FECU} \left((t'_{F_0} - 5.41 \operatorname{Log}(F/F_0)) / t'_{F_0} \right)^{0.188}$$

$$t'_{F_0} = 1.57 \times 10^{-3} / C_{IS}$$

$$\Delta_{\theta}^{ir} = \begin{cases} \Delta_{\theta} + 228 \text{ Log } (F/F_u) & ; 4.2 \times 10^{24} < F \leq 4 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 \\ \Delta_{\theta} & ; F \leq 4.2 \times 10^{24} \text{ n/m}^2 \end{cases}$$

Considerando que para el lote de circaloy-4 en estudio:

$$C_{IU} = 2.7 \times 10^{-6} \text{ g/cm}^2$$

$$C_{IS} = 6.55 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^2$$

$$\Delta_{FECU} = 300 \text{ MPa}$$

se tiene sustituyendo en la expresión 4-69:

$$t_f = \begin{cases} \frac{1.57 \times 10^7 C_I^{0.454}}{\Delta^{2.41}} \left(\frac{1.57 \times 10^{-3}}{C_I} - 5.41 \text{ Log } \frac{F}{4.33 \times 10^{21}} \right)^{1.454} & ; \begin{cases} 4.33 \times 10^{21} < F \leq 6 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 \\ \Delta_{FECU}^{ir} \leq \Delta \leq \Delta_{\theta}^{ir} \text{ MPa} \\ 2.7 \times 10^{-6} \leq C_I \leq 6.55 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^2 \end{cases} \\ \geq \frac{9.33 \times 10^5}{\Delta^{2.41}} \left(\frac{1.57 \times 10^{-3}}{C_I} - 5.41 \text{ Log } \frac{F}{4.33 \times 10^{21}} \right) & ; \begin{cases} 4.33 \times 10^{21} < F \leq 6 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 \\ \Delta = \Delta_{FECU}^{ir} \text{ MPa} \\ 2.7 \times 10^{-6} \leq C_I \leq 6.55 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^2 \end{cases} \\ \frac{1.44 \times 10^{20}}{C_I \Delta^{9.27}} & ; \begin{cases} F \leq 4.33 \times 10^{21} \text{ n/m}^2 \\ 300 \leq \Delta \leq \Delta_{\theta} \text{ MPa} \\ 2.7 \times 10^{-6} \leq C_I \leq 6.55 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^2 \end{cases} \\ \geq \frac{1.57 \times 10^{-3}}{C_I} & ; \begin{cases} F \leq 4.33 \times 10^{21} \text{ n/m}^2 \\ \Delta = 300 \text{ MPa} \\ 2.7 \times 10^{-6} \leq C_I \leq 6.55 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^2 \end{cases} \end{cases}$$

en donde:

$$t_f = t_f (2.7 \times 10^{-6} \text{ g/cm}^2) \quad ; \quad \text{sí } C_I < 2.7 \times 10^{-6} \text{ g/cm}^2$$

$$t_f = t_f (6.55 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^2) \quad ; \quad \text{sí } C_I > 6.55 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^2$$

$$\Delta_{\text{FECU}}^{\text{ir}} = 300 \left(\frac{\frac{1.57 \times 10^{-3}}{C_{\text{IS}}} - 5.41 \text{ Log } \frac{F}{4.33 \times 10^{21}}}{\frac{1.57 \times 10^{-3}}{C_{\text{IS}}}} \right)^{0.188}$$

$$\Delta_{\theta}^{\text{ir}} = \begin{cases} \frac{491}{t_f^{0.047}} + 228 \text{ Log } \frac{F}{4.2 \times 10^{24}} \quad ; \quad F > 4.2 \times 10^{24} \text{ n/m}^2 \\ \frac{491}{t_f^{0.047}} \quad ; \quad F \leq 4.2 \times 10^{24} \text{ n/m}^2 \end{cases}$$

El resultado de aplicar la ecuación 4-70 se dá en la tabla 18 , en la columna correspondiente a la temperatura de - 633 K.

4.E. - INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA SOBRE EL ESPUEZO DE FALLA Y TIEMPO DE FALLA.

I. - PARA CIRCALOY-4 (TF/LE), NO IRRADIADO.

A fin de determinar el comportamiento del fenómeno FEC ante la variación de la temperatura, se considera la información de Cubicciotti (6,7) referida en la gráfica 13, correspondiente al efecto de la temperatura sobre el tiempo de falla para el -- circularoy-4 a las temperaturas de 616, 644 y 672 K.

Como se observa en la gráfica 13, los puntos constituidos por los esfuerzos de umbral y los tiempos de falla (σ_{FECU}, t_p) se pueden unir mediante una recta, haciendo un ajuste en lo correspondiente a la temperatura de 672 K, al considerar 220 MPa en vez de 208 MPa señalados. En estas condiciones se considera la siguiente información:

T(K)	σ_{FECU} (MPa)	t_p (h)
616	289	30
644	262	20
672	220	12

a) Al relacionar los tiempos de falla con la temperatura en forma semilogarítmica considerando los siguientes puntos:

T(K)	t_p (h)
616	30
644	20
672	12

se tiene:

$$\text{Log } t_p - \text{Log } t_p' = n (T - T')$$

de donde:

$$n = (\text{Log } t_p'' - \text{Log } t_p') / (T'' - T') = - 0.007107$$

o sea:

$$\text{Log } (t_p/t_p') = - 0.007107 (T - T') \quad (4-71)$$

utilizando: $t'_F = t_{F0}$, se tiene:

$$t_F = t_{F0} \times 10^{-0.007107(T - T')}$$

b) Al relacionar el esfuerzo de umbral σ_{FECU} con la temperatura T , considerando los puntos siguientes:

σ_{FECU} (MPa)	T (K)
289	616
262	644
220	672

se obtiene:

$$\text{Log} (\sigma_{FECU} / \sigma'_{FECU}) = -2.116 \times 10^{-3} (T - T') \quad (4-72)$$

en donde σ'_{FECU} corresponde al tiempo de falla t_{F0} .

c) Haciendo uso de la información correspondiente al lote en estudio proporcionada en la gráfica 12 para circaloy-4 trabajado en frío y liberado de esfuerzo: $t_{F0} = 24$ h, $T = 633$ K, se tiene que :

$$t_F = 24 \times 10^{-0.007107(T - 633)} \quad (4-73)$$

el resultado de este ajuste en t_F se observa en la siguiente relación:

T (K)	t_F (h)
616	31.2
633	24.
644	20.
672	12.7

d) El ajuste en el esfuerzo se logra al considerar como referencia el valor de 300 MPa para el esfuerzo de umbral σ_{FECU} a 633 K, en la ecuación 4-72; con lo que se tiene:

$$\sigma_{FECU} = 300 \times 10^{-0.002116(T - 633)} \quad (4-74)$$

de cuya aplicación:

σ_{FECU} (MPa)	T (K)
326	616
284	644
248	672
300	633

sustituyendo en la ecuación 4-37, las expresiones 4-73 y 4-74 se tiene:

$$t_f = t_F (\nabla_{FEC} / \nabla_{FECU})^{-9.27} (C_{IS} / C_I)$$

$$t_f = t_{F0} \times 10^{-0.007107(T-T')} \left(\frac{\nabla_{FEC}}{\nabla'_{FECU} \times 10^{-0.00211(T-T')}} \right)^{-9.27} \left(\frac{C_{IS}}{C_I} \right)$$

con lo que resulta:

$$t_f = t_{F0} \times 10^{-0.0269(T-T')} \left(\frac{\nabla}{\nabla'_{FECU}} \right)^{-9.27} \left(\frac{C_{IS}}{C_I} \right) \quad (4-75)$$

sustituyendo los valores de referencia $\nabla'_{FECU} = 300$ MPa, $t_f = 24$ h, $T = 633$ K, $C_{IS} = 6.55 \times 10^{-5}$ g/cm², en la expresión 4-75 se tiene:

$$t_f = 1.54 \times 10^{37} (10^{-0.0269 T}) / (\nabla^{9.27} C_I) \quad (4-76)$$

de cuya aplicación se obtienen los resultados siguientes:

tes:

T(K)	∇ (MPa)	t_f (h)
616	500	0.6
	400	4.6
	325	32.5
644	500	0.1
	400	0.8
	300	12.3
	284	20.3
672	500	0.02
	400	0.14
	300	2.14
	248	12.76
633	500	0.21
	400	1.67
	350	5.70
	300	24.0

Comparando los resultados asociados a la temperatura de 633 K, se observa la congruencia con la curva 2 de la gráfica 39, a la concentración C_{IS} .

II. - PARA CIRCALLOY-2 (TF/LE), NO IRRADIADO.

Para obtener el comportamiento del circalloy-2 trabajado en frío y liberado de esfuerzo, a la concentración de saturación, ante la variación de la temperatura se hace un ajuste de la información proporcionada en la gráfica 7, considerando la siguiente ecuación:

$$t_f = t'_F \times 10^{a(T - T')} \left(\frac{\sigma}{\sigma_{FECU}} \right)^b \quad (4-77)$$

tomando en consideración a la ecuación 4-3, se tiene que :

$b = - 10.32$.- El exponente "a" se obtiene al considerar los siguientes puntos obtenidos de la gráfica 7:

T (K)	(MPa)	t_f (h)
593	500	1.0
	400	10.0
	340	53.5
633	410	1.0
	310	10.0
	280	50.0

al considerar la ecuación 4-3 y los valores: $\sigma = 400$ MPa, $T = 633$ K, se tiene que: $t_f = 1.26$ h

Usando la ecuación 4-70 se tiene:

$$a = \frac{\text{Log} (t_f / t'_f) (\sigma / \sigma_{FECU})^{-b}}{T - T'}$$

$$a = \frac{\text{Log} (50/53.5) (280/340)^{10.32}}{633 - 593} = -0.0225$$

en consecuencia:

$$t_f = t_{Fo} \times 10^{-0.0225(T - T')} \left(\frac{\sigma}{\sigma_{FECU}} \right)^{-10.32} \frac{C_{IS}}{C_I} \quad (4-78)$$

sustituyendo los valores de referencia $\nabla'_{FECU} = 340$ MPa,
 $t_f = 53.5$ h, $T = 593$ K, $C_{IS} = 5.14 \times 10^{-5}$ g/cm², $C_{IU} = 2 \times 10^{-6}$
 g/cm², en la expresión 4-78, se tiene:

$$t_f = \frac{1.51 \times 10^{35} \times 10^{-0.0225 T}}{\nabla^{10.32} C_I} \quad (4-78')$$

de cuya aplicación se obtienen los resultados siguientes, para
 la concentración C_{IS} :

T(K)	∇ (MPa)	t_f (h)
616	500	0.3
	400	3.0
	300	59.0
633	500	0.002
	400	0.02
	300	0.46
	200	30.0
593	500	1.0
	450	2.97
	400	10.0
	340	53.5

comparando los resultados asociados a la temperatura de 593 K
 con la curva 3 de la gráfica 30, se observa la congruencia con
 la ecuación 4-78'.

III. - PARA CIRCALOY IRRADIADO.

El procedimiento que se ha seguido para el desarrollo del modelo toma como referencia los puntos constituidos por los tiempos de falla t_F y los esfuerzos de umbral ∇_{FECU}^{ir} , y estos a su vez están referidos al punto (t_{Fo}, ∇_{FECU}) que corresponde al tiempo de falla del circaloy sin irradiar y a su respectivo esfuerzo de umbral a una temperatura dada. En consecuencia el efecto de la temperatura se introduce a través de estos valores de referencia, así en general:

$$t_F = t_{Fo} - m \log (F/Fo) \quad ; \quad Fo < F \leq 4 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$$

$$t_F(T) = t_F'(T) \times 10^{a(T-T')} \quad (4-79)$$

$$\nabla_{FECU}(T) = \nabla_{FECU}'(T') \times 10^{b(T-T')} \quad (4-80)$$

en donde t_{Fo}' y ∇_{FECU}' son valores de referencia a una temperatura T' y "m, a, b" son constantes específicas para un tipo de circaloy determinado.

Al sustituir estas expresiones en las ecuaciones 4-53 y 4-58 se obtendrá la ecuación general que dará el comportamiento del tiempo de falla en término de las variables FECU, la concentración de yodo C_I del ambiente, la fluencia F a la que se irradia el circaloy, el esfuerzo ∇ aplicado y de la temperatura T existente.

III.A. - PARA CIRCALOY-2 (TF/LE) IRRADIADO.

Para el circaloy-2 será necesario conocer los valores de "a" y de "b", los que se obtendrán considerando las ecuaciones 4-79 y 4-80 así como los siguientes valores de referencia, correspondientes a datos experimentales:

$$t_{Fo}' = 53.5 \text{ h}$$

$$t_{Fo} = 50 \text{ h}$$

$$T' = 593 \text{ K}$$

$$T = 633 \text{ K}$$

$$\nabla_{FECU}' = 340 \text{ MPa}$$

$$\nabla_{FECU} = 280 \text{ MPa}$$

$$a = \frac{\log (t_{Fo} / t'_{Fo})}{T - T'} = \frac{\log (50 / 53.5)}{633 - 593} = 0.000735$$

$$b = \frac{\log (\nabla_{FECU} / \nabla'_{FECU})}{T - T'} = \frac{\log (280 / 340)}{633 - 593} = - 0.00211$$

para corroborar estos resultados se utiliza la siguiente expresión resultante de la ecuación 4-71 :

$$\begin{aligned} a + 10.32 b &= - 0.0225 \\ - 0.000735 + 10.32 (-0.00211) &= - 0.02251 \end{aligned}$$

consecuentemente, para circaloy-2 trabajado en frío y liberado de esfuerzos:

$$t_{Fo} = t'_{Fo} \times 10^{-0.000735 (T - T')} \quad (4-81)$$

$$\nabla_{FECU} = \nabla'_{FECU} \times 10^{-0.00211 (T - T')} \quad (4-82)$$

considerando la ecuación 4-62', se tiene al introducir las expresiones 4-81 y 4-82:

$$\nabla_{FECU}^{ir} = \nabla'_{FECU} \times 10^{-0.00211(T-T')} \left(\frac{t'_{Fo} - 6.24 \log(F/Fo)}{t'_{Fo}} \right)^{0.305}$$

$$(4-83)$$

sustituyendo los valores de referencia para el circaloy-2, antes señalados, en las ecuaciones 4-81, 4-82 y 4-83, se tiene:

$$t_{Fo} = t'_{Fo} \times 10^{-0.000735 (T - 593)}$$

$$t_{Fo} = 146 \times 10^{-0.000735 T} \quad (4-84)$$

$$\begin{aligned} \nabla_{\text{FECU}} &= 340 \times 10^{-0.00211} (T - 593) \\ &= 6063 \times 10^{-0.00211} T \end{aligned} \quad (4-84)$$

Los valores de referencia t'_{Fo} y ∇'_{FECU} están referidos a la temperatura T' y a la concentración de saturación C_{IS} . Al introducir estas expresiones en la ecuación 4-53, se obtiene la expresión general para el circaloy-2 trabajado en frío y liberado de esfuerzos; en forma condensada:

$$t_f(h) = t_F^{1.6814} t_{Fo}^{0.6814} \left(\nabla_{\text{FECU}} / \nabla \right)^{2.234}$$

Considerando que:

$$t_F = \frac{7.5 \times 10^{-3}}{C_I \times 10^{0.000735 T}} - 6.24 \log \frac{F}{6.75 \times 10^{17}}$$

$$t_{Fo} = \frac{7.5 \times 10^{-3}}{C_I \times 10^{0.000735 T'}}$$

y definiendo:

$$B = \frac{\nabla'_{\text{FECU}} \times 10^{-0.00211} (T - T')}{\nabla}$$

se tiene:

$$\begin{aligned}
 t_f = & \left\{ \begin{array}{l}
 t_P^{1.6814} \quad t_{Fo}^{-0.6814} \quad B \quad 2.234 \\
 \geq t_P \quad B \quad 2.234 \\
 \frac{8.066 \times 10^{-36}}{c_I \sigma^{-10.32} \times 10^{0.0225 T}} \\
 \frac{7.5 \times 10^{-3}}{c_I \times 10^{0.000735 T}}
 \end{array} \right. ; \left\{ \begin{array}{l}
 6.75 \times 10^{17} < F \leq 4 \times 10^{25} \quad \text{n/m}^2 \\
 \sigma_{PECU}^{ir} \leq \sigma \leq \sigma_{\theta}^{ir} \quad \text{MPa} \\
 2 \times 10^{-6} \leq c_I \leq 5.14 \times 10^{-5} \quad \text{g/cm}^2 \\
 593 \leq T \leq 672 \text{ K} \\
 \\
 6.75 \times 10^{17} < F \leq 4 \times 10^{25} \quad \text{n/m}^2 \\
 \sigma = \sigma_{PECU}^{ir} \quad \text{MPa} \\
 2 \times 10^{-6} \leq c_I \leq 5.14 \times 10^{-5} \quad \text{g/cm}^2 \\
 593 \leq T \leq 672 \text{ K} \\
 \\
 F \leq 6.75 \times 10^{17} \quad \text{n/m}^2 \\
 \sigma_{PECU} \leq \sigma \leq \sigma_{\theta} \quad \text{MPa} \\
 2 \times 10^{-6} \leq c_I \leq 5.14 \times 10^{-5} \quad \text{g/cm}^2 \\
 593 \leq T \leq 672 \text{ K} \\
 \\
 F \leq 6.75 \times 10^{17} \quad \text{n/m}^2 \\
 \sigma = \sigma_{PECU} \\
 2 \times 10^{-6} \leq c_I \leq 5.14 \times 10^{-5} \\
 593 \leq T \leq 672 \text{ K}
 \end{array} \right.
 \end{aligned}$$

(4-86)

Expresiones analíticas que dan el comportamiento del circaloy-2, trabajado en frío y liberado de esfuerzos.

debiendo considerar adicionalmente que :

$$t_f = t_f(C_{IU}) \quad ; \quad \text{sí} \quad C_I \quad C_{IU}$$

$$t_f = t_f(C_{IS}) \quad ; \quad \text{sí} \quad C_I \quad C_{IS}$$

$$\sigma_{FECU}^{ir} = \sigma_{FECU}' \times 10^{-0.00211(T-T')} \left(\frac{t_{Fo}' - 6.24 \text{Log}(F/F_o)}{t_{Fo}'} \right)^{0.305}$$

$$\sigma_{\theta}^{ir} = \left(\sigma_{\theta} + 228 \text{Log}(F/F_u) \right) \times 10^{-0.0008(T-T')}$$

Para el lote en estudio, se tienen los siguientes valores de referencia:

$$\sigma_{FECU}' = 340 \text{ MPa}$$

$$t_{Fo}' = 53.5 \text{ h}$$

$$C_{IS} = 5.14 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^2$$

$$C_{IU} = 2 \times 10^{-6} \text{ g/cm}^2$$

$$F_o = 6.75 \times 10^{17} \text{ n/m}^2$$

$$T = 593 \text{ K}$$

Con lo cual se obtienen las expresiones que a continuación se indican:

$$\left. \begin{aligned}
 & \frac{7.916 \times 10^9 C_I^{0.6814}}{\sqrt{2.234 \times 10^{0.00421T}}} \left(\frac{7.5 \times 10^{-3}}{C_I \times 10^{0.000735T}} - 6.24 \log \frac{F}{6.75 \times 10^{17}} \right)^{1.6814} \\
 & \left. \begin{aligned}
 & \left\{ \begin{aligned}
 & 6.75 \times 10^{17} < F \leq 4 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 \\
 & \sigma_{FECU}^{ir} \leq \sigma \leq \sigma_{\theta}^{ir} \text{ MPa} \\
 & 2 \times 10^{-6} \leq C_I \leq 5.14 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^2 \\
 & 593 \leq T \leq 672 \text{ K}
 \end{aligned} \right. \\
 & \left. \begin{aligned}
 & \frac{2.82 \times 10^8}{\sqrt{2.234 \times 10^{0.00421T}}} \left(\frac{7.5 \times 10^{-3}}{C_I \times 10^{0.000735T}} - 6.24 \log \frac{F}{6.75 \times 10^{17}} \right) \\
 & \left. \begin{aligned}
 & \left\{ \begin{aligned}
 & 6.75 \times 10^{17} < F \leq 4 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 \\
 & \sigma_{FECU}^{ir} = \sigma \\
 & 2 \times 10^{-6} \leq C_I \leq 5.14 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^2 \\
 & 593 \leq T \leq 672 \text{ K}
 \end{aligned} \right. \\
 & \frac{8.066 \times 10^{36}}{C_I \times 10^{0.0225T} \sqrt{10.32}} \left. \begin{aligned}
 & \left\{ \begin{aligned}
 & F \leq 6.75 \times 10^{17} \text{ n/m}^2 \\
 & \sigma_{FECU} \leq \sigma \leq \sigma_{\theta} \text{ MPa} \\
 & 2 \times 10^{-6} \leq C_I \leq 5.14 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^2 \\
 & 593 \leq T \leq 672 \text{ K}
 \end{aligned} \right. \\
 & \frac{7.5 \times 10^{-3}}{C_I \times 10^{0.000735T}} \left. \begin{aligned}
 & \left\{ \begin{aligned}
 & F \leq 6.75 \times 10^{17} \text{ n/m}^2 \\
 & \sigma = \sigma_{FEC} \\
 & 2 \times 10^{-6} \leq C_I \leq 5.14 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^2 \\
 & 593 \leq T \leq 672 \text{ K}
 \end{aligned} \right.
 \end{aligned} \right.
 \end{aligned}
 \right.
 \end{aligned}
 \right.
 \end{aligned}$$

(4-87)

en la cual debe considerarse:

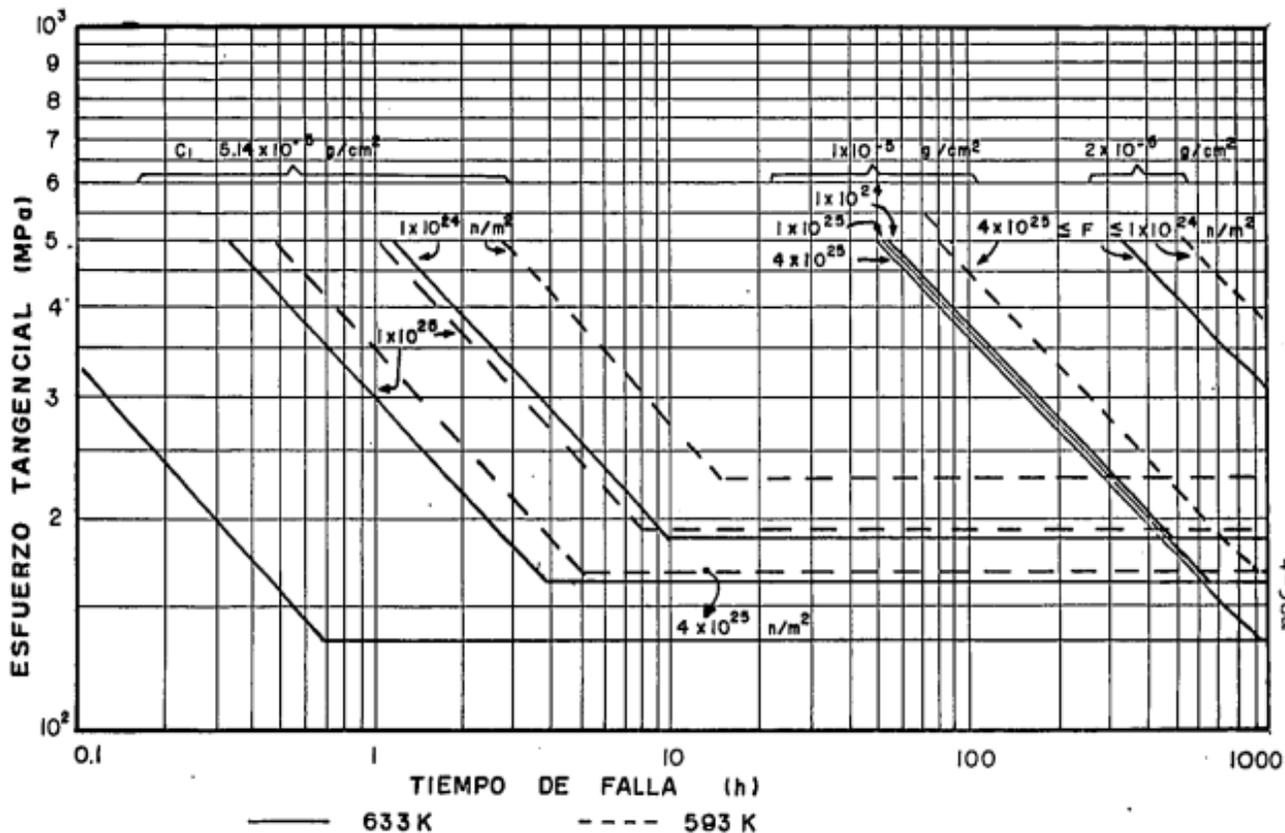
$$t_f = t_f (2 \times 10^{-6} \text{ g/cm}^2) \quad ; \quad \text{sí } C_I < 2 \times 10^{-6} \text{ g/cm}^2$$

$$t_f = t_f (5.14 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^2) \quad ; \quad \text{sí } C_I > 5.14 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^2$$

$$\tau_{FECU}^{ir} = 6063 \times 10^{-0.00211 T} \left(1 - 0.1166 \log(F/6.75 \times 10^{17}) \right)^{0.305}$$

$$\tau_{\theta}^{ir} = \left(\tau_{\theta} + 228 \log(F/4.2 \times 10^{24}) \right) \times 3 \times 10^{-0.0008 T}$$

Los resultados que se obtienen al aplicar esta expresión se presentan en la tabla 17, así como en la gráfica 41 en la cual se representan los tiempos de falla correspondientes a las concentraciones de yodo de 5.14×10^{-5} , 1×10^{-5} y 2×10^{-6} g/cm², a las fluencias de 4×10^{25} , 1×10^{25} y 1×10^{24} n/m² y a las temperaturas de 593 y 633 K.



GRAFICA 41.- COMPORTAMIENTO DEL CIRCALLOY-2 (TF/LE) A LAS TEMPERATURAS DE 593 K Y 633 K, A LAS FLUENCIAS Y CONCENTRACIONES DE YODO INDICADAS, CONFORME A LO EXPRESADO EN LA ECUACION 4-87.

III.B. - PARA CIRCALOY-4 (TF/LE) IRRADIADO.

Para el circaloy-4 trabajado en frío y liberado de esfuerzo, la expresión general se obtiene al introducir las ecuaciones 4-73 y 4-74 :

$$t_F = t_{F_0} - 5.41 \text{ Log} (F / F_0)$$

$$t_{F_0} = t'_{F_0} \times 10^{-0.007107 (T - T')}$$

en la expresión 4-58 y considerando a:

$$B = \sqrt[3]{\sigma'_{FECU} \times 10^{-0.002116 (T - T')}} / \sqrt[3]{\sigma}$$

se tiene:

$$t_f = \left\{ \begin{array}{l} t_F^{1.454} t_{F_0}^{-0.454} B^{2.41} \\ \\ \geq t_F B^{2.41} \\ \\ t_{F_0} \\ \\ \geq t_{F_0} \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} F_0 < F \leq 6 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 \\ \sigma_{FECU}^{ir} \leq \sigma \leq \sigma_{\theta}^{ir} \text{ MPa} \\ C_{IU} \leq C_I \leq C_{IS} \text{ g/cm}^2 \\ 593 \leq T \leq 633 \text{ K} \\ \\ F_0 < F \leq 6 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 \\ \sigma_{FECU}^{ir} = \sigma \text{ MPa} \\ C_{IU} \leq C_I \leq C_{IS} \text{ g/cm}^2 \\ 593 \leq T \leq 633 \text{ K} \\ \\ F < F_0 \\ \sigma_{FECU} \leq \sigma \leq \sigma_{\theta} \text{ MPa} \\ C_{IU} \leq C_I \leq C_{IS} \text{ g/cm}^2 \\ 593 \leq T \leq 633 \text{ K} \\ \\ F < F_0 \text{ n/m}^2 \\ \sigma_{FECU} = \sigma \text{ MPa} \\ C_{IU} \leq C_I \leq C_{IS} \text{ g/cm}^2 \\ 593 \leq T \leq 633 \text{ K} \end{array} \right.$$

debiendo considerar:

$$t_f = t_f(C_{IU}) \quad ; \quad \text{sí} \quad C_I < C_{IU}$$

$$t_f = t_f(C_{IS}) \quad ; \quad \text{sí} \quad C_I < C_{IS}$$

Sustituyendo los siguientes valores de referencia, correspondientes a la curva 4 de la gráfica 30;

$$t_{Fo} = 24 \text{ h}$$

$$\sigma_{FECU} = 300 \text{ MPa}$$

$$C_{IS} = 6.55 \times 10^{-5} \quad \text{g/cm}^2$$

$$C_{IU} = 2.7 \times 10^{-6} \quad \text{g/cm}^2$$

$$F_o = 4.33 \times 10^{21} \quad \text{n/m}^2$$

se tiene que t_{Fo} y σ_{FECU} , quedan expresados por :

$$t_{Fo} = 49.57 / (C_I \times 10^{0.007107 T})$$

$$\sigma_{FECU} = 6555 \times 10^{-0.002116 T}$$

$$\sigma_{FECU}^{ir} = \frac{6555}{10^{0.002116T}} \left(1 - 0.2254 \text{ Log} \frac{F}{4.33 \times 10^{21}} \right)^{0.188}$$

con lo cual el tiempo de falla en las diferentes regiones, resulta quedar expresada como a continuación se indica:

$$\left. \begin{aligned}
 & \frac{2.65 \times 10^8 C_I^{0.454}}{\nabla^{2.41} \times 10^{0.00187 T}} \left(\frac{49.57}{C_I \times 10^{0.007107 T}} - 5.41 \log \frac{F}{4.33 \times 10^{21}} \right)^{1.454} \\
 & \left. \begin{aligned}
 & \left\{ \begin{aligned}
 & 4.33 \times 10^{21} < F \leq 6 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 \\
 & \nabla_{\text{FECU}}^{ir} \leq \nabla \leq \nabla_{\theta}^{ir} \text{ MPa} \\
 & 2.7 \times 10^{-6} \leq C_I \leq 6.55 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^2 \\
 & 593 \leq T \leq 633 \text{ K}
 \end{aligned} \right. \\
 & \frac{1.577 \times 10^9}{\nabla^{2.41} \times 10^{0.0051 T}} \left(\frac{49.57}{C_I \times 10^{0.007107 T}} - 5.41 \log \frac{F}{4.33 \times 10^{21}} \right) \\
 & \left. \begin{aligned}
 & \left\{ \begin{aligned}
 & 4.33 \times 10^{21} < F \leq 6 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 \\
 & \nabla = \nabla_{\text{FECU}}^{ir} \text{ MPa} \\
 & 2.7 \times 10^{-6} \leq C_I \leq 6.55 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^2 \\
 & 593 \leq T \leq 633 \text{ K}
 \end{aligned} \right. \\
 & \frac{1.535 \times 10^{37}}{C_I \nabla^{9.27} \times 10^{0.0269 T}} \\
 & \left. \begin{aligned}
 & \left\{ \begin{aligned}
 & F \leq 4.33 \times 10^{21} \text{ n/m}^2 \\
 & 300 \leq \nabla \leq \nabla_{\theta} \text{ MPa} \\
 & 2.7 \times 10^{-6} \leq C_I \leq 6.55 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^2 \\
 & 593 \leq T \leq 633 \text{ K}
 \end{aligned} \right. \\
 & \frac{49.57}{C_I \times 10^{0.007107 T}} \\
 & \left. \begin{aligned}
 & \left\{ \begin{aligned}
 & F \leq 4.33 \times 10^{21} \text{ n/m}^2 \\
 & \nabla = 300 \text{ MPa} \\
 & 2.7 \times 10^{-6} \leq C_I \leq 6.55 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^2 \\
 & 593 \leq T \leq 633 \text{ K}
 \end{aligned} \right.
 \end{aligned} \right.
 \end{aligned}
 \right.
 \end{aligned}
 \right.
 \end{aligned}$$

En particular si la concentración C_I resulta ser menor que el valor umbral de 2.7×10^{-6} g/cm², entonces el tiempo de falla se puede expresar como:

$$t_f = t_f(2.7 \times 10^{-6} \text{ g/cm}^2) \quad ; \quad \text{si } C_I < 2.7 \times 10^{-6} \text{ g/cm}^2$$

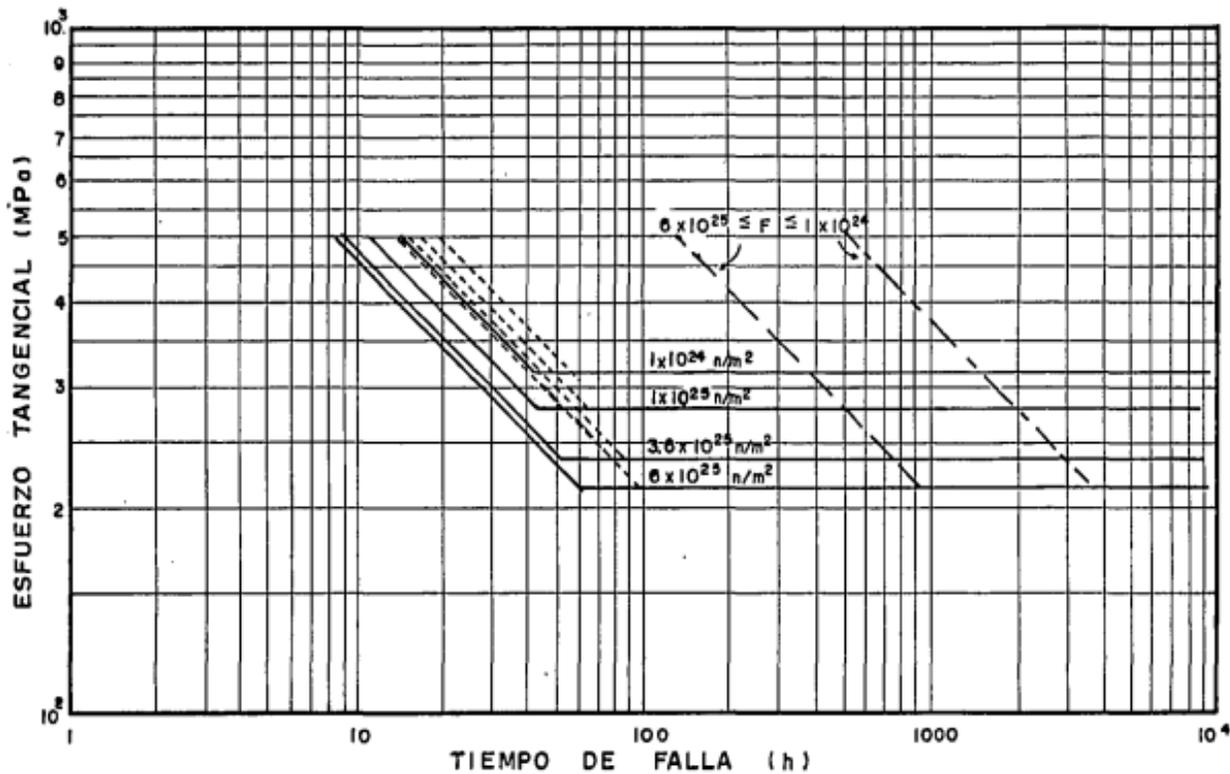
Adicionalmente, en el caso de que la concentración de yodo sea mayor que el valor de saturación de 6.55×10^{-5} g/cm² entonces el tiempo de falla queda determinado por:

$$t_f = t_f(6.55 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^2) \quad ; \quad \text{si } C_I > 6.55 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^2.$$

Los resultados que se obtienen de aplicar esta expresión se presentan en la tabla 18, así como en las gráficas 42 a 44.

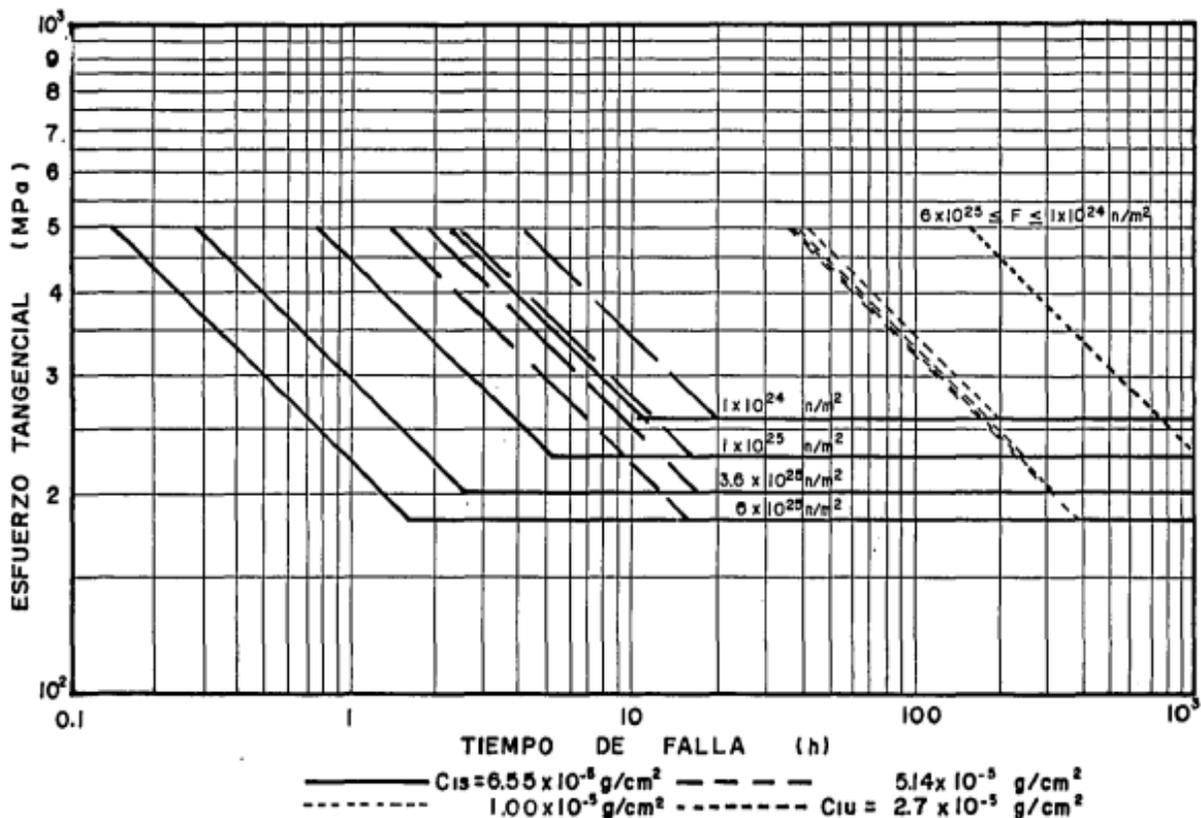
Con todas las expresiones que se han determinado para el circaloy-2 y circaloy-4 en donde se han tomado en consideración la concentración de yodo C_I , la fluencia neutrónica F , la temperatura de prueba u operación T y el esfuerzo aplicado σ se puede observar que nuestro modelo para predecir el tiempo de falla tiene una forma genérica de la siguiente forma:

$$t_f = \left(t_{Fo} \cdot C_I \cdot \text{Exp}(aT) - m \text{Log} \frac{F}{F_u} \right)^n \left(\frac{A C_I^{n-1}}{b \text{Exp}(cT)} \right)$$

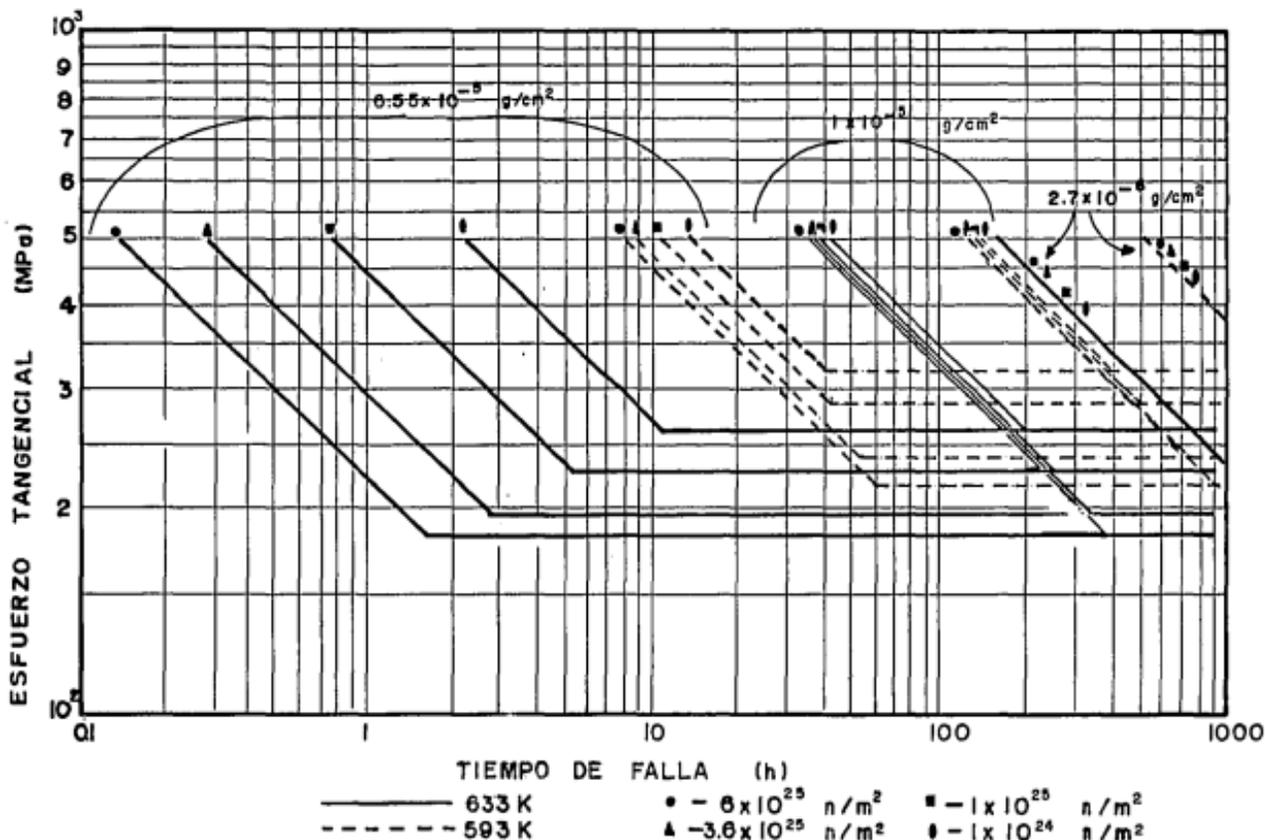


——— $C_{is} = 6.55 \times 10^{-5}$ - - - - - 5.14×10^{-5}
 - - - - - 1.00×10^{-5} - - - - - 2.7×10^{-5}

GRAFICA 42.- COMPORTAMIENTO DEL CIRCALOY-4 (TF/LE) A 593 K, A LAS FLUENCIAS Y CONCENTRACIONES DE YODO INDICADAS, CONFORME A LO EXPRESADO MEDIANTE LA ECUACION 4-89.



GRAFICA- 43.- COMPORTAMIENTO DEL CIRCALLOY - 4 (TF/LE) A 633 K, A LAS FLUENCIAS Y CONCENTRACIONES DE YODO INDICADAS, CONFORME A LO EXPRESADO MEDIANTE LA ECUACION 4-89.



GRAFICA 44.- COMPORTAMIENTO DEL CIRCALLOY-4 (TE/LE) A 593 Y 633K A LAS FLUENCIAS Y CONCENTRACIONES DE YODO INDICADAS, CONFORME A LO EXPRESADO MEDIANTE LA ECUACION 4-89

4.F. - ACCION DEL YODO SOBRE CIRCALOY IRRADIADO.

Como se menciona al inicio de este capítulo, la acción del yodo se puede observar de las gráficas 38 y 39, al comparar las curvas correspondientes al circaloy irradiado a una fluencia dada y expuesto al yodo, con aquellos del circaloy irradiado a la misma influencia neutrónica y no expuesto al yodo. Por lo que, para obtener la expresión que describa el comportamiento de la acción del yodo en tales circunstancias se usan las ecuaciones generales determinadas en los incisos anteriores, que expresan el comportamiento del esfuerzo de falla bajo irradiación σ_{θ}^{ir} y el esfuerzo de falla bajo el efecto de la irradiación y la acción del yodo σ_{FECU}^{ir} .

En general:

$$\text{ACCION DEL YODO} = \Delta \sigma_{FEC}^{ir} = \sigma_{\theta}^{ir} - \sigma_{FEC}^{ir} = \sigma_{\theta}^{ir} - \sigma$$

en donde σ representa el esfuerzo aplicado.

4.F.A.- PARA CIRCALOY-2 (TF/LE).

Para circaloy-2 trabajado en frío y liberado de esfuerzo a la temperatura de 593 K, se emplean las ecuaciones 4-45 y 4-86 para obtener la expresión general. Despejando al esfuerzo aplicado en la ecuación 4-86 y restandola a la ecuación 4-45, se tiene:

$$\frac{\sigma_{\theta} + 228 \log \frac{F}{F_u}}{10^{0.0008(T-T')}} - \frac{t_F^{0.7526} \sigma_{FEUCU} \times 10^{-0.00211(T-T')}}{t_{F_0}^{0.305} t_f^{0.4476}}$$

$$\begin{cases} F_u < F \leq 4 \times 10^{25} & n/m^2 \\ t_{\theta} \leq t_f \leq t_F & h \end{cases}$$

$$\frac{\sigma_{\theta}}{10^{0.0008(T-T')}} - \frac{t_F^{0.7526} \sigma_{FEUCU} \times 10^{-0.00211(T-T')}}{t_{F_0}^{0.305} t_f^{0.4476}}$$

$$\begin{cases} F_0 < F \leq F_u & n/m^2 \\ t_{\theta} \leq t_f \leq t_F & h \end{cases}$$

$$\frac{\sigma_{\theta} + 228 \log \frac{F}{F_u}}{10^{0.0008(T-T')}} - \left(\frac{t'_F}{t'_{F_0}} \right)^{0.305} \sigma_{FEUCU} \times 10^{-0.00211(T-T')}$$

$$\begin{cases} F_u < F \leq 4 \times 10^{25} & n/m^2 \\ t_f \geq t_F & h \end{cases}$$

 $\Delta \sigma_{FEUC}^{ir} =$

(MPa)

(4-89)

$$\frac{\sigma_{\theta}}{10^{0.0008(T-T')}} - \left(\frac{t'_F}{t'_{F_0}} \right)^{0.305} \sigma_{FEUCU} \times 10^{-0.00211(T-T')}$$

$$\begin{cases} F_0 < F < F_u & n/m^2 \\ t_f \geq t_F & h \end{cases}$$

$$\frac{\sigma_{\theta}}{10^{0.0008(T-T')}} - \left(\frac{t'_F}{t'_f} \right)^{0.0969} \sigma_{FEUCU} \times 10^{-0.00211(T-T')}$$

$$\begin{cases} F \leq F_0 & n/m^2 \\ t_{\theta} \leq t_f \leq t_{F_0} & h \end{cases}$$

$$\frac{\sigma_{\theta}}{10^{0.0008(T-T')}} - \sigma_{FEUCU} \times 10^{-0.00211(T-T')}$$

$$\begin{cases} F \leq F_0 & n/m^2 \\ t_f \geq t_{F_0} & h \end{cases}$$

en donde hay que recordar que las expresiones anteriores son válidas en el intervalo de :

$$C_{IU} \leq C_I \leq C_{IS} \quad \text{g/cm}^2$$

$$593 \leq T \leq 633 \quad \text{K}$$

adicionalmente se tiene que :

- ∇_{FECU} - Corresponde al tiempo t'_{Fo} y a la temperatura T' de referencia, siendo independiente de la concentración de yodo C_I .
- t_{θ} - Representa al tiempo correspondiente a la intersección de las curvas asociadas a ∇_{θ}^{ir} y ∇_{FEC}^{ir} ó (∇_{θ} con ∇_{FEC}) y su valor se puede obtener al considerar que $\Delta \nabla_{FEC}^{ir} = 0$, con lo cual resulta:

$$497 t_{\theta}^{0.431} + (228 \text{ Log } \frac{F}{F_u}) t_{\theta}^{0.4476} = \frac{t_F^{0.7526} \nabla_{FECU}}{t_{Fo}^{0.305} 10^{0.0013(T-T')}} \quad 2.23$$

$$t_{\theta} \sim \left(\frac{t_F^{0.7526} \nabla_{FECU}}{t_{Fo}^{0.305} 10^{0.00131(T-T')} (497 + 228 \text{ Log } \frac{F}{F_u})} \right)^{2.23}$$

Como se podrá observar, la ACCION DEL YODO queda determinada por las expresiones 4-89 dependientes de los intervalos de la frecuencia neutrónica y del tiempo de falla.

Al considerar los valores de referencia para el lote de circaloy-2 trabajado en frío y liberado de esfuerzos, sujeto a estudio, se obtiene la expresión particular:

$$\begin{aligned} T' &= 593 \text{ K} & t'_{Fo} &= 53.5 \text{ h} \\ C_{IS} &= 5.14 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^2 & C_{IU} &= 2 \times 10^{-6} \text{ g/cm}^2 \\ F_u &= 4 \times 10^{24} \text{ n/m}^2 & F_o &= 6.75 \times 10^{17} \text{ n/m}^2 \\ \nabla_{\theta} &= 340 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\left\{ \frac{\frac{1482}{t_f^{0.01667}} + 680 \text{ Log } \frac{F}{4.2 \times 10^{24}}}{10^{0.0008 T}} \right\} -$$

$$\left\{ \frac{26968 C_I^{0.305} \left(\frac{7.5 \times 10^{-3}}{C_I \times 10^{0.000735T}} - 6.24 \text{ Log } \frac{F}{6.75 \times 10^{17}} \right)^{0.7562}}{10^{0.001885 T} \times t_f^{0.4476}} \right\}$$

$$; \begin{cases} F_u < F \leq 4 \times 10^{25} & n/m^2 \\ t_\theta \leq t_f \leq t_F & h \end{cases}$$

$$\left\{ \frac{1482}{t_f^{0.01667} \times 10^{0.0008 T}} \right\} -$$

$$\left\{ \frac{26968 C_I^{0.305} \left(\frac{7.5 \times 10^{-3}}{C_I \times 10^{0.000735T}} - 6.24 \text{ Log } \frac{F}{6.75 \times 10^{17}} \right)^{0.7562}}{10^{0.001885 T} \times t_f^{0.4476}} \right\}$$

$$; \begin{cases} 6.75 \times 10^{17} < F \leq 4.2 \times 10^{24} & n/m^2 \\ t_\theta < t_f \leq t_F & h \end{cases}$$

$$\left\{ \frac{\frac{1482}{t_f^{0.01667}} + 680 \text{ Log } \frac{F}{4.2 \times 10^{24}}}{10^{0.0008 T}} \right\} -$$

$$\left\{ 6063 \times 10^{-0.00211 T} \left(1 - 0.1166 \text{ Log } \frac{F}{6.75 \times 10^{17}} \right)^{0.305} \right\}$$

$$; \begin{cases} 4.2 \times 10^{24} < F \leq 4 \times 10^{25} & n/m^2 \\ t_f \geq t_F & h \end{cases}$$

 $\Delta_{FEC}^{ir} =$

(4-90)

CONTINUA ECUACION 4-90

$$\Delta \sqrt{\frac{ir}{FEC}} \left\{ \begin{array}{l} \frac{1482}{t_f^{0.01667} \times 10^{0.0008T}} - \frac{6063}{10^{0.00211T}} (1 - 0.1166 \text{ Log} \frac{F}{6.75 \times 10^{17}})^{0.305} \\ ; \left\{ \begin{array}{l} 6.75 \times 10^{17} < F \leq 4.2 \times 10^{24} \quad n/m^2 \\ t_f > t_f \quad h \end{array} \right. \\ \\ \frac{1482}{t_f^{0.01667} \times 10^{0.0008T}} - \frac{3770}{c_I^{0.0969} \times 10^{0.00211T} t_f^{0.0969}} \\ ; \left\{ \begin{array}{l} F \leq 6.75 \times 10^{17} \quad n/m^2 \\ t_\theta < t_f \leq t_{Fo} \quad h \end{array} \right. \\ \\ \frac{1482}{10^{0.0008T} t_f^{0.01667}} - 6063 \times 10^{-0.00211T} \\ ; \left\{ \begin{array}{l} F \leq 6.75 \times 10^{17} \quad n/m^2 \\ t_f > t_{Fo} \quad h \end{array} \right. \end{array} \right.$$

las expresiones anteriores son válidas en el intervalo de:

$$2 \times 10^{-6} \leq c_I \leq 5.14 \times 10^{-5} \quad g/cm^2$$

$$593 \leq T \leq 633 \quad K$$

4.F.B. - PARA CIRCALOY-4 (TF/LE)

Para circaloy-4 trabajado en frío y liberado de esfuerzo a la temperatura de 633 K, se emplean las ecuaciones 4-45 y 4-88 para obtener la expresión general. Despejando al esfuerzo aplicado de la ecuación 4-88 y restandola a la ecuación 4-45 - se tiene:

$$\Delta \sigma_{FEC}^{ir} = \left\{ \begin{array}{l} \frac{\sigma_{\theta} + 228 \log \frac{F}{F_u}}{10^{0.0008(T-T')}} - \frac{t_F^{0.6033} \sigma_{FECU} \times 10^{-0.002116(T-T')}}{t_{Fo}^{0.1884} t_f^{0.415}} \\ \quad ; \left\{ \begin{array}{l} F_u < F \leq 6 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 \\ t_{\theta} \leq t_f \leq t_F \quad h \end{array} \right. \\ \frac{\sigma_{\theta}}{10^{0.0008(T-T')}} - \frac{t_F^{0.6033} \sigma_{FECU} \times 10^{-0.002116(T-T')}}{t_{Fo}^{0.1884} t_f^{0.415}} \\ \quad ; \left\{ \begin{array}{l} F_o < F < F_u \quad \text{n/m}^2 \\ t_{\theta} \leq t_f \leq t_F \quad h \end{array} \right. \\ \frac{\sigma_{\theta} + 228 \log \frac{F}{F_u}}{10^{0.0008(T-T')}} - \left(\frac{t'_F}{t'_{Fo}} \right)^{0.0188} \sigma_{FECU} \times 10^{-0.002116(T-T')} \\ \quad ; \left\{ \begin{array}{l} F_u < F \leq 6 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 \\ t_f \geq t_F \quad h \end{array} \right. \\ \frac{\sigma_{\theta}}{10^{0.0008(T-T')}} - \left(\frac{t'_F}{t'_{Fo}} \right)^{0.0188} \sigma_{FECU} \times 10^{-0.002116(T-T')} \\ \quad ; \left\{ \begin{array}{l} F_o < F < F_u \quad \text{n/m}^2 \\ t_f \geq t_F \quad h \end{array} \right. \\ \frac{\sigma_{\theta}}{10^{0.0008(T-T')}} - \left(\frac{t'_{Fo}}{t'_f} \right)^{0.1079} \sigma_{FECU} \times 10^{-0.002116(T-T')} \\ \quad ; \left\{ \begin{array}{l} F \leq F_o \quad \text{n/m}^2 \\ t_{\theta} \leq t_f \leq t_{Fo} \end{array} \right. \\ \frac{\sigma_{\theta}}{10^{0.0008(T-T')}} - \sigma_{FECU} \times 10^{-0.002116(T-T')} \\ \quad ; \left\{ \begin{array}{l} F \leq F_o \quad \text{n/m}^2 \\ t_f \geq t_{Fo} \quad h \end{array} \right. \end{array} \right.$$

(MPa)
(4-91)

recordando que las expresiones anteriores son válidas en el intervalo de :

$$C_{IU} \leq C_I \leq C_{IS} \quad \text{g/cm}^2$$

$$593 \leq T \leq 633 \quad \text{K}$$

adicionalmente que :

τ_{FECU} - Corresponde al tiempo t_{Fo} y a la temperatura T' de referencia, siendo independiente de la concentración de yodo C_I .

t_{θ} - Representa al tiempo correspondiente a la intersección de las curvas asociadas con τ_{θ}^{ir} y τ_{FEC}^{ir} ó (τ_{θ} y τ_{FEC}) y su valor se puede obtener al considerar que $\Delta\tau_{FEC}^{ir} = 0$ con lo cual resulta:

$$491 t_{\theta}^{0.368} + (228 \text{Log } \frac{F}{F_u}) t_{\theta}^{0.415} = \frac{t_F^{0.6033} \tau_{FECU}}{10^{0.001316(T-T')}} t_{Fo}^{0.1884}$$

$$t_{\theta} \sim \left(\frac{t_F^{0.6033} \tau_{FECU}}{t_{Fo}^{0.1884} \times 10^{0.001316(T-T')} (491 + 228 \text{Log } \frac{F}{F_u})} \right)^{2.41}$$

Al igual que para el caso del circaloy-2, la ACCION DEL YODO queda determinada por las expresiones 4-91, dependientes de los intervalos de la fluencia neutrónica y del tiempo de falla.

Considerando los siguientes valores de referencia, para el lote de vainas de circaloy-4 sujeto a estudio:

$$T' = 633 \quad \text{K}$$

$$t'_{Fo} = 24 \quad \text{h}$$

$$C_{IS} = 6.55 \times 10^{-5} \quad \text{g/cm}^2$$

$$C_{IU} = 2.7 \times 10^{-6} \quad \text{g/cm}^2$$

$$F_u = 4 \times 10^{24} \quad \text{n/m}^2$$

$$F_o = 4.33 \times 10^{21} \quad \text{n/m}^2$$

$$\tau_{FECU} = 300 \quad \text{MPa}$$

al sustituirlos en la expresión 4-91 se tiene:

$$\left\{ \frac{\frac{1577}{t_f^{0.047}} + 732 \log \frac{F}{4.2 \times 10^{24}}}{10^{0.0008 T}} \right\} -$$

$$\left\{ \frac{3127 C_I^{0.188}}{10^{0.000776 T} t_f^{0.415}} \left(\frac{49.57}{C_I \times 10^{0.007107 T}} - 5.41 \log \frac{F}{4.33 \times 10^{21}} \right)^{0.6033} \right\}$$

$$; \begin{cases} 4.2 \times 10^{24} < F \leq 6. \times 10^{25} & \text{n/m}^2 \\ t_\theta \leq t_f \leq t_F & \text{h} \end{cases}$$

$$\left\{ \frac{1577}{10^{0.0008 T} t_f^{0.047}} \right\} -$$

$$\left\{ \frac{3127 C_I^{0.188}}{10^{0.000776 T} t_f^{0.415}} \left(\frac{49.57}{C_I \times 10^{0.007107 T}} - 5.41 \log \frac{F}{4.33 \times 10^{21}} \right)^{0.6033} \right\}$$

$$; \begin{cases} 4.33 \times 10^{21} < F \leq 4.2 \times 10^{24} & \text{n/m}^2 \\ t_\theta \leq t_f \leq t_F & \text{h} \end{cases}$$

$\Delta T_{FBC}^{ir} =$
(4-92)

$$\left\{ \frac{\frac{1577}{t_f^{0.047}} + 732 \log \frac{F}{4.2 \times 10^{24}}}{10^{0.0008 T}} \right\} -$$

$$\left\{ \frac{6555}{10^{0.002116 T}} \left(1 - 0.2254 \log \frac{F}{4.33 \times 10^{21}} \right)^{0.188} \right\}$$

$$; \begin{cases} 4.2 \times 10^{24} < F \leq 6 \times 10^{25} & \text{n/m}^2 \\ t_f > t_F & \text{h} \end{cases}$$

CONTINUA ECUACION 4-92

$$\left\{ \begin{aligned} & \left\{ \frac{1577}{10^{0.0008T} \times t_f^{0.047}} \right\} - \\ & \left\{ \frac{6555}{10^{0.002116T}} 1 - 0.2254 \log \frac{F}{4.33 \times 10^{21}} \right. \\ & \qquad \qquad \qquad \left. \begin{aligned} & 0.188 \\ & ; \left\{ \begin{aligned} & 4.33 \times 10^{21} \leq F \leq 4.2 \times 10^{24} \quad n/m^2 \\ & t_f \geq t_F \quad h \end{aligned} \right. \end{aligned} \right. \\ & \left\{ \frac{1577}{10^{0.0008T} \times t_f^{0.047}} \right\} - \left\{ \frac{10270}{t_f^{0.108} C_I^{0.108} \times 10^{0.0029 T}} \right\} \\ & \qquad \qquad \qquad ; \left\{ \begin{aligned} & F \leq 4.33 \times 10^{21} \quad n/m^2 \\ & t_\theta \leq t_f \leq t_{F0} \quad h \end{aligned} \right. \\ & \left\{ \frac{1577}{10^{0.0008T} \times t_f^{0.047}} \right\} - \left\{ 6555 \times 10^{-0.002116 T} \right\} \\ & \qquad \qquad \qquad ; \left\{ \begin{aligned} & F < 4.33 \times 10^{21} \quad n/m^2 \\ & t_f \geq t_{F0} \quad h \end{aligned} \right. \end{aligned} \right.$$

Las expresiones anteriores son válidas en el intervalo de:

$$2.7 \times 10^{-6} \leq C_I \leq 6.55 \times 10^{-5} \quad g/cm^2$$

$$593 \leq T \leq 633 \text{ K}$$

Los resultados de aplicar las expresiones 4-91 y 4-92 para representar la influencia del yodo, en el fenómeno FEC, sobre el circaloy-2 y circaloy-4, ambos trabajados en frío y liberados de esfuerzos, se proporcionan en las tablas 15 y 16, así como en las figuras de la 45 a la 48, respectivamente.

TABLA 15
 ACCION DEL YODO SOBRE CIRCALOY-2 (TF/LE)
 CONFORME A LA ECUACION 4-90.

t_f (h)	F (n/m ²)	T (K)	C_I (g/cm ²)	σ_{θ}^{ir} (MPa)	σ_{FEC}^{ir} (MPa)	$\Delta\sigma_{FEC}^{ir}$ (MPa)			
0.5	4 x 10 ²⁵	593	5.14x10 ⁻⁵	726	465	261			
1.0				720	341	379			
5.0				707	166	541			
10.				701	165	536			
20.				695	165	530			
50.				688	165	523			
100				683	165	518			
500				672	165	507			
1000				666	165	501			
50				1.0 x 10 ⁻⁵			689	643	46
100							683	471	212
300							675	346	329
400							673	254	419
500							671	230	441
700							669	197	472
1000							666	168	498
1050				666	165	501			
300				2.0 x 10 ⁻⁶			675	504	171
400							673	443	230
600	670	370	300						
800	668	324	344						
1000	666	294	372						
1260	664	265	400						
0.1	633	5.14x10 ⁻⁵	687	321	366				
0.3				196	482				
0.5				156	518				
0.7				134	538				
1.0				134	555				
5.0				134	523				
10.				134	510				
50				134	506				
100				134	501				
500				134	490				
1000				134	485				

CONTINUA TABLA 15.

t_f (h)	F (n/m ²)	T (K)	C_I (ϵ/cm^2)	∇_{θ}^{ir} (MPa)	∇_{FEC}^{ir} (MPa)	$\Delta \nabla_{FEC}^{ir}$ (MPa)	
50	4 x 10 ²⁵	633	1.0x10 ⁻⁵	640	508	132	
100				635	372	263	
300				627	228	399	
500				624	181	443	
700				621	155	466	
900				618	139	479	
950				618	136	482	
1000				617	135	482	
300				2.0x10 ⁻⁶	627	535	92
500			624		426	198	
700			621		367	254	
1000			619		312	307	
2000			614		229	385	
4000			609		168	441	
6000			606		140	467	
6400			606		136	470	
1.0			1 x 10 ²⁵		593	5.14x10 ⁻⁵	583
2.0	577	382		195			
3.0	574	318		256			
4.0	572	280		292			
5.0	570	253		317			
8.0	566	205		361			
9.0	565	195		370			
10.	564	195		369			
50.	552	195		357			
100	546	195		351			
500	552	195		339			
1000	529	195		334			
86	1.0 x 10 ⁻⁵	548		501			47
100		546		468			78
200		541		344			197
300		538		286			252
500		534		228			306
700		532	196	336			
1000		529	195	334			

CONTINUA TABLA 15

t_f (h)	F (n/m ²)	T (K)	C_I (g/cm ²)	∇_{θ}^{ir} (MPa)	∇_{FEC}^{ir} (MPa)	$\Delta \nabla_{FEC}^{ir}$ (MPa)				
500	1 x 10 ²⁵	593	2.0 x 10 ⁻⁶	534	534	0				
600				533	494	39				
700				532	460	72				
800				531	434	97				
1000				529	393	136				
2000				524	288	236				
3000				521	240	281				
4000				519	211	308				
4800		517	195	322						
0.3		1 x 10 ²⁵	633	5.14x10 ⁻⁵	550	491	60			
0.5					547	390	157			
0.7					544	336	208			
1.0					541	286	255			
2.0					536	210	326			
3.7					531	160	371			
10.					524	160	364			
50.					512	160	352			
100					507	160	347			
500					496	160	336			
1000	491				160	331				
50	1 x 10 ²⁵		633	1.0 x 10 ⁻⁵	512	514	--			
100					507	377	130			
300					500	230	270			
500					496	183	313			
650					494	163	331			
1000					491	160	328			
300					1 x 10 ²⁵	633	2.0 x 10 ⁻⁶	500	535	--
400								497	470	27
500		496						426	70	
600		495						393	102	
1000		491						312	179	
3000		483	191	293						
4300		481	160	321						

CONTINUA TABLA 15

t_f (h)	F (n/m^2)	T (K)	C_I (g/cm^2)	σ_{θ}^{ir} (MPa)	σ_{FEC}^{ir} (MPa)	$\Delta\sigma_{FEC}^{ir}$ (MPa)				
2.5	1. $\times 10^{24}$	593	5.14×10^{-5}	490	514	--				
3.0				488	474	14				
5.0				484	377	107				
7.0				481	324	157				
10.				478	277	201				
15.				475	230	245				
100				460	230	230				
500				448	230	218				
1000				443	230	213				
100				633	1.0×10^{-5}	460	478	--		
200						455	350	105		
300						452	292	160		
500						448	232	216		
700						445	230	215		
1000						443	230	213		
1000		633	2.0×10^{-6}			443	394	49		
2000						438	289	149		
3000						435	241	194		
3300						434	231	203		
2.0						633	5.14×10^{-5}	490	470	20
3.0								488	392	96
5.0								484	312	172
10.								478	228	250
15.								475	190	284
100				427	190			238		
500				416	190			226		
1000				411	190			221		
50				633	1.0×10^{-5}			432	526	--
100								427	385	42
300								420 ³	236	184
320		420	230					190		
400		418	207					211		
485		416	190					226		
1000	411	190	221							

CONTINUA TABLA 15

t_f (h)	P (n/m ²)	T (K)	C_I (g/cm ²)	∇_{θ}^{ir} (MPa)	∇_{FEC}^{ir} (MPa)	$\Delta \nabla_{FEC}^{ir}$ (MPa)
340 700 1000 2000 3000	1×10^{24}	633	2.0×10^{-6}	420 414 411 407 404	509 369 314 230 190	--- 45 97 177 214
1.0 3.0 5.0 10 30 53.5 100 500 1000	MENOR QUE 6.75×10^{17}	593	5.14×10^{-5}	497 488 484 478 468 465 460 448 443	500 449 428 400 360 340 340 340 340	--- 39 56 78 109 125 120 108 103
5.0 10 30 50 100 275 500 1000			1×10^{-5}	484 478 468 465 460 452 448 443	502 469 422 401 375 340 340 340	--- 9 46 64 85 112 108 103
50 100 200 500 1000 1400			2×10^{-6}	465 460 455 448 443 440	469 438 410 375 351 340	--- 22 45 73 92 100
0.2 0.5 1.0 3.0 10 50 100 500 1000		633	5.14×10^{-5}	480 467 462 453 444 433 427 416 411	478 438 409 368 327 280 280 280 280	2 29 53 85 117 153 147 136 131

CONTINUA TABLA 15

t_f (h)	P (n/m ²)	T (K)	C_I (g/cm ²)	∇_{θ}^{ir} (MPa)	∇_{FEC}^{ir} (MPa)	$\Delta \nabla_{FEC}^{ir}$ (MPa)	
3.0	MENOR QUE 6.75×10^{-17}	633	1×10^{-5}	453	431	22	
5.0				450	410	40	
10				444	383	61	
50				433	328	105	
100				427	307	120	
250				421	280	141	
500				416	280	136	
1000				411	280	131	
10			2×10^{-6}		444	448	---
20					439	420	19
50					433	384	49
100					427	359	68
300					420	322	98
500					416	307	109
700	414	297			117		
1000	411	287			124		
1300	410	280	130				

TABLA 16
 ACCION DEL YODO SOBRE CIRCALOY-4 (TF/LE)
 CONFORME A LA EXPRESION 4- 92.

t_f (h)	F (n/m ²)	T (K)	C_I (g/cm ²)	∇_{θ}^{ir} (MPa)	∇_{FEC}^{ir} (MPa)	$\Delta \nabla_{FEC}^{ir}$ (MPa)						
8.0	4 x 10 ²⁵	593	6.55x10 ⁻⁵	720	517	203						
9.0				717	492	225						
10.				715	471	244						
20.				700	354	346						
25.				695	323	372						
50.				681	242	439						
51.				681	240	441						
100				666	240	426						
500				635	240	395						
1000				623	240	383						
14				4 x 10 ²⁵	593	5.14x10 ⁻⁵	707	503	204			
20							700	434	266			
30							691	367	324			
50							681	296	385			
83							676	240	436			
100							666	240	426			
500							635	240	395			
1000							623	240	383			
130							4 x 10 ²⁵	593	1 x 10 ⁻⁵	661	495	166
200		652	414							238		
300	645	350	295									
500	635	283	352									
750	629	240	389									
1000	623	240	383									
0.2	4 x 10 ²⁵	633	6.55x10 ⁻⁵							753	565	187
0.5										730	387	343
0.7										723	336	387
1.0										714	290	424
1.5										705	245	460
2.0				699	217	481						
2.55				692	197	495						
100				619	197	422						
500				590	197	393						
1000				578	197	381						

t_f (h)	F (n/m^2)	T (K)	C_I (g/cm^2)	∇_{θ}^{ir} (MPa)	∇_{FEC}^{ir} (MPa)	$\Delta \nabla_{FEC}^{ir}$ (MPa)				
1.5 3.0 5.0 7.0 9.0 14.5 100 500 1000	4×10^{25}	633	5.14×10^{-5}	705	506	199				
				690	380	309				
				678	307	372				
				671	267	404				
				666	240	426				
				655	197	457				
				619	197	422				
				590	197	393				
				578	197	381				
40 80 100 200 300 350 500 1000					1×10^{-5}	636	485	151		
						633	364	259		
						619	332	287		
						606	249	357		
						601	210	391		
						598	197	401		
						590	197	393		
						578	197	381		
160 300 400 500 700 1000 1530					2.70×10^{-6}	610	502	108		
						599	387	212		
						594	343	251		
						590	313	277		
						584	272	312		
						578	235	343		
						566	197	369		
10 20 30 40 42 50 100 500 1000			1×10^{25}	593	6.55×10^{-5}	567	509	58		
								552	381	171
								546	322	224
						539	286	253		
						538	280	258		
						533	280	249		
						519	280	239		
						488	280	208		
						475	280	195		
16 20 30 60 65 100 500 1000					5.14×10^{-5}	557	501	56		
						552	456	96		
						543	386	157		
						532	289	243		
						529	280	249		
						519	280	239		
			488	280		208				
			475	280		195				

CONTINUA TABLA 16

t_f (h)	F (n/m^2)	T (K)	c_I (g/cm^2)	∇_{θ}^{ir} (MPa)	∇_{FEC}^{ir} (MPa)	$\Delta \nabla_{FEC}^{ir}$ (MPa)			
130	1×10^{25}	593	1×10^{-5}	513	499	14.5			
200				505	417	88			
250				500	380	120			
300				497	353	144			
500				488	285	203			
523				486	260	206			
1000				475	280	195			
500				2.7×10^{-6}			488	505	--
700							481	440	41
1000							475	379	96
1300		470	340				130		
1500		468	320				148		
2000		461	284				177		
2070		460	280				180		
0.8			633				6.55×10^{-5}	582	522
0.9				578	498	80			
1.0				577	476	101			
2.0				561	357	204			
3.0	554			302	252				
3.6	551			280	271				
5.0	541			280	261				
100	481			280	201				
500	453			280	173				
1000	440			280	160				
2.5	5.14×10^{-5}				556	492	64		
5.0					541	369	172		
7.0					534	321	213		
9.7					528	280	248		
100					481	280	201		
500					453	280	173		
1000					440	280	160		
40					1×10^{-5}			499	492
50	495	448	47						
100	481	336	145						
156	474	280	194						
200	470	280	190						
500	453	280	173						
1000	440	280	160						

CONTINUA TABLA 16

t_f (h)	F (n/m^2)	T (K)	G_I (g/cm^2)	∇_{θ}^{ir} (MPa)	∇_{FEC}^{ir} (MPa)	$\Delta \nabla_{FEC}^{ir}$ (MPa)
160 200 500 659 700 800 1000	1×10^{25}	633	2.7×10^{-6}	473 468 453 448 447 445 440	503 459 314 280 280 280 280	--- 77 214 168 167 165 160
15 20 30 40 40.7 100 500 1000	1×10^{24}	593	6.55×10^{-5}	465 460 451 442 441 426 395 382	478 424 359 318 316 316 316 316	--- 36 92 124 125 110 79 66
20 30 40 50 58.2 100 500 1000			5.14×10^{-5}	460 451 445 441 438 426 395 382	492 416 369 336 316 316 316 316	--- 35 76 104 122 110 79 66
200 300 330 402 500 1000			1×10^{-5}	412 405 403 400 395 382	422 357 343 316 316 316	-- 48 60 84 79 66
1000 1200 1500 1560			2.7×10^{-6}	382 380 375 374	380 352 321 316	2 27 54 58

CONTINUA TABLA 16

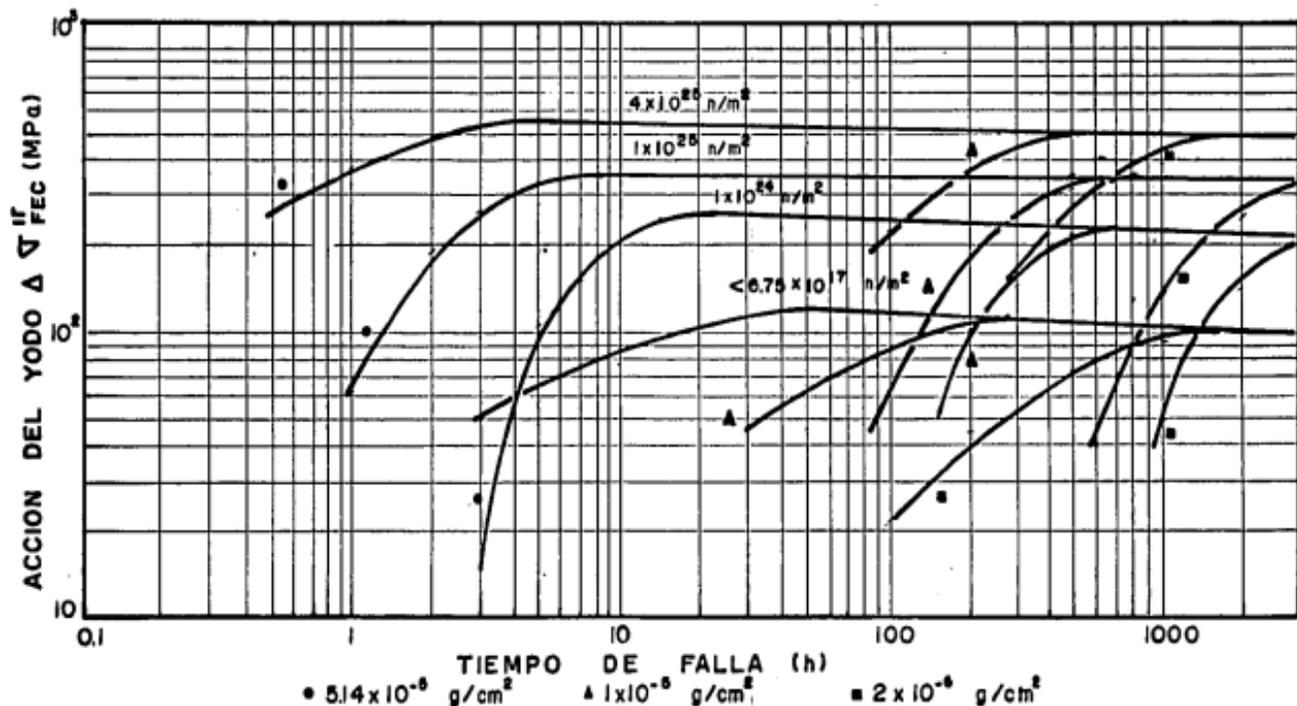
t_f (h)	F (n/m ²)	(K)	C_I (g/cm ²)	∇_{θ}^{ir} (MPa)	∇_{FEC}^{ir} (MPa)	$\Delta \nabla_{FEC}^{ir}$ (MPa)		
3.0	1 x 10 ²⁴	633	6.55x10 ⁻⁵	466	450	16		
5.0				455	364	91		
10.				440	272	169		
11.2				438	260	178		
50				409	260	149		
100				395	260	135		
500				367	260	107		
1000				355	260	95		
7.0			5,14x10 ⁻⁵			448	400	48
10.						441	344	97
20.						427	260	167
50.						409	260	149
100						395	260	135
500						367	260	107
1000						355	260	95
50						1 x 10 ⁻⁵		
100			395	344	51			
150			388	290	97			
180			385	270	115			
197			381	260	121			
500			367	260	107			
1000			355	260	95			
300			2.7 x 10 ⁻⁵					
400						371	346	25
500	367	316				51		
700	361	275				86		
800	358	260				98		
1000	355	260				95		
2.5	MENOR QUE 4.33x10 ²¹	593	6.55x10 ⁻⁵	506	502	4		
5.0				490	466	24		
10.				475	432	43		
20.				460	401	59		
50.				440	364	76		
100				426	364	62		
500				393	364	30		
1000				383	364	20		

CONTINUA TABLA 16

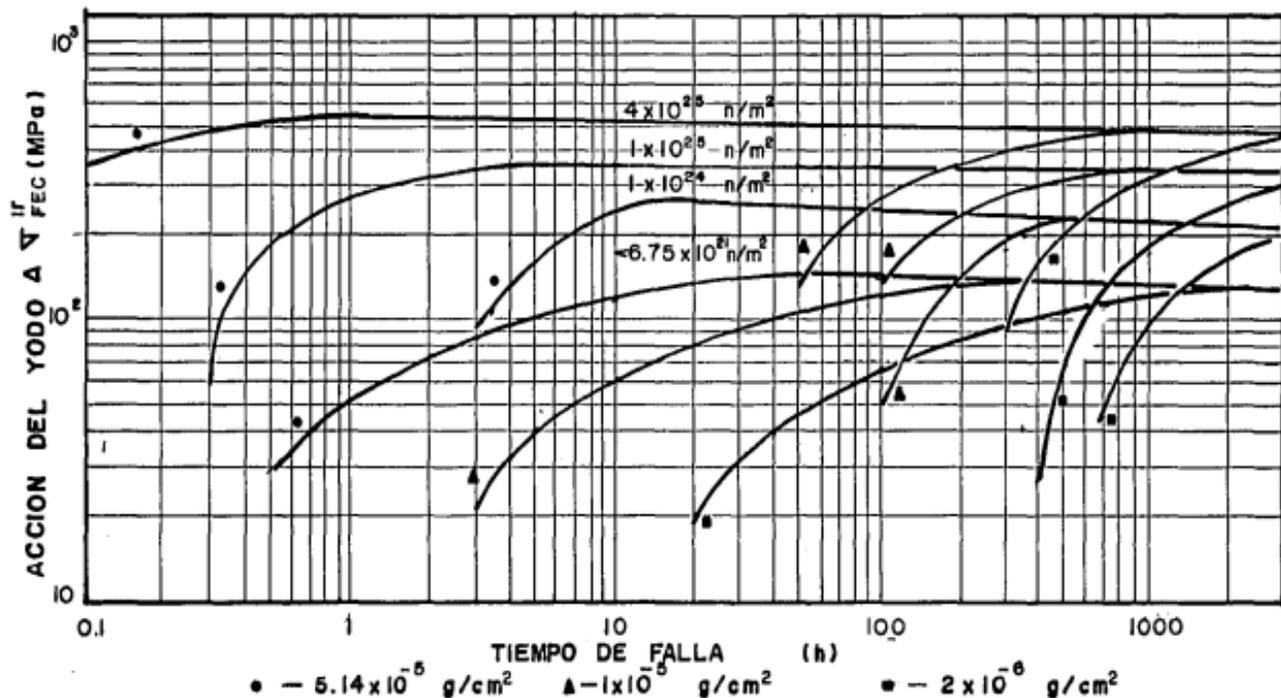
t_f (h)	F (μ/m^2)	T (K)	G_I (g/cm^2)	∇_{θ}^{ir} (MPa)	∇_{PEC}^{ir} (MPa)	$\Delta \nabla_{PEC}^{ir}$ (MPa)				
3.2	MENOR QUE 4.33×10^{21}	593	5.14×10^{-5}	502	502	0				
5.0				490	478	12				
7.0				483	461	22				
10.				475	444	31				
20				460	411	49				
50				440	373	67				
62				436	364	72				
100				426	364	62				
500				393	364	29				
1000				383	364	19				
50		1×10^{-5}			440	445	-5			
100					426	413	13			
200					413	383	30			
300					405	367	38			
312					404	364	40			
500					393	364	31			
1000					383	364	19			
700					2.7×10^{-5}			389	385	4
1000								383	371	12
1180								379	364	15
0.2			633	6.55×10^{-5}	530	505	25			
0.3	520				483	37				
0.7	499				441	53				
1.0	491				424	67				
2.0	475				394	81				
3.0	466				377	89				
4.0	460				365	95				
24-	423				300	123				
50	409				300	109				
100	395				300	95				
500	367				300	67				
1000	355				300	55				
0.3						5.14×10^{-5}	520	496	24	
0.5							507	469	38	
0.7							499	453	46	
1.0		491	436	55						
5.0		455	366	89						

CONTINUA TABLA 16

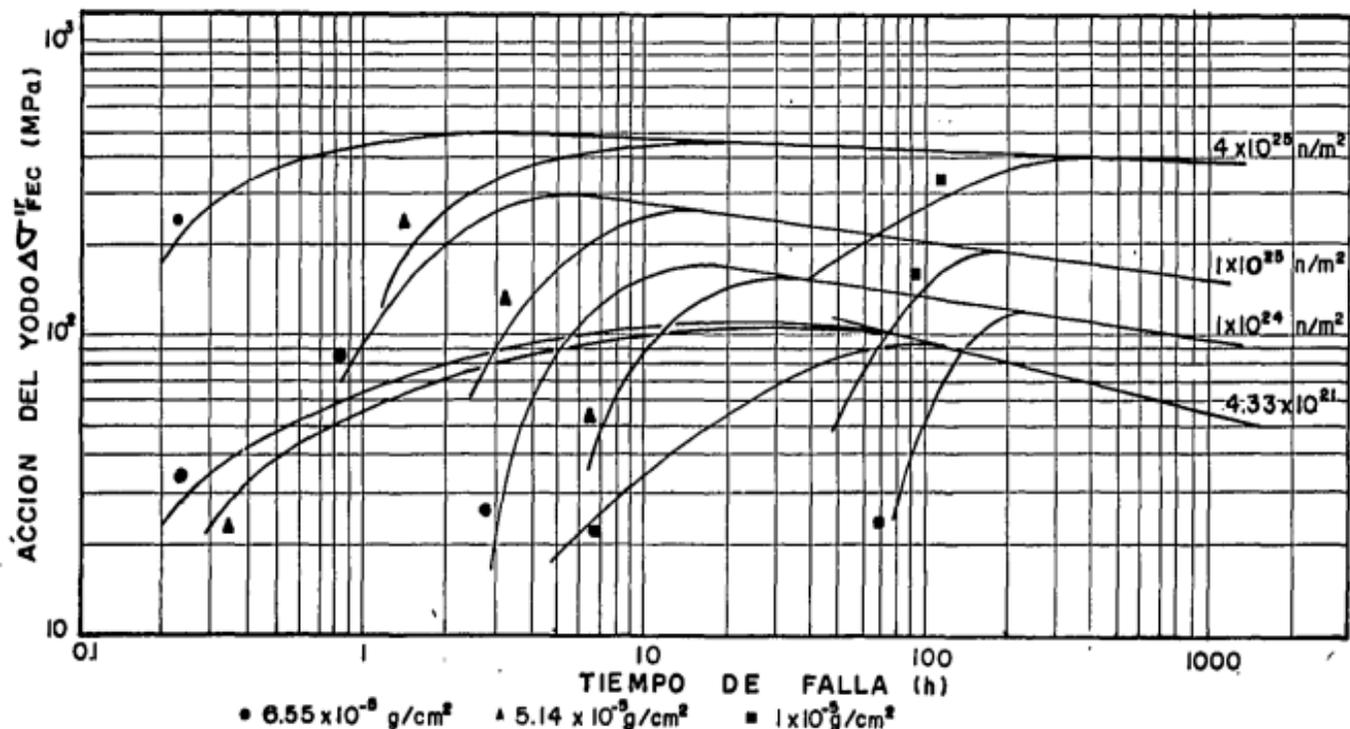
t_f (h)	F (n/m^2)	T (K)	C_I (g/cm^2)	∇_{θ}^{ir} (MPa)	∇_{PEC}^{ir} (MPa)	$\Delta \nabla_{PEC}^{ir}$ (MPa)		
10	MENOR QUE 4.33×10^{21}	633	5.14×10^{-5}	441	340	101		
32				417	300	117		
100				395	300	95		
500				367	300	67		
1000				355	300	55		
2.0			1×10^{-5}			475	482	--
5.0						455	437	18
10.						441	405	36
50						409	340	69
70						402	328	74
100						395	316	79
160						387	300	87
500						367	300	67
1000						355	300	55
50						2.7×10^{-6}		
100			395	364	31			
200			383	338	45			
300	376	323	53					
500	367	306	61					
585	364	300	64					
1000	355	300	55					



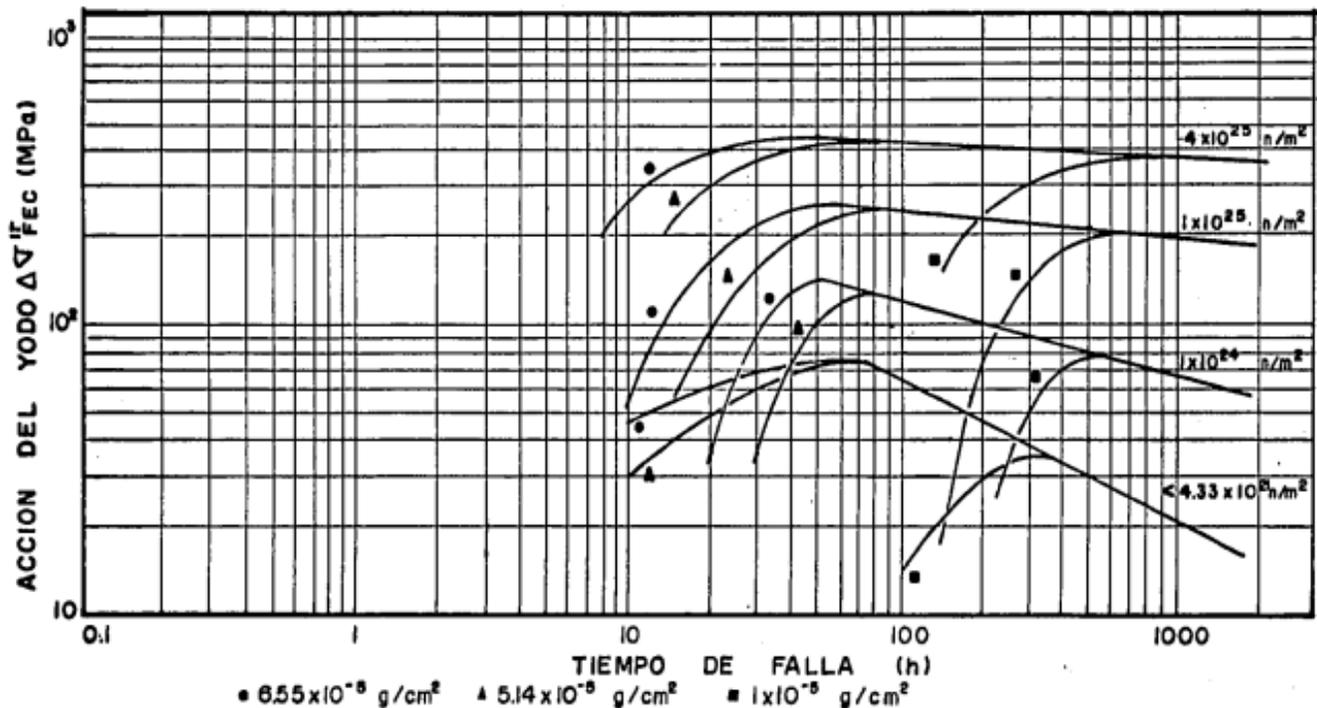
GRAFICA 45.- ACCION DEL YODO SOBRE CIRCALOY-2 (TF/LE) A 593 K A LAS FLUENCIAS Y CONCENTRACIONES DE YODO QUE SE INDICAN.



GRAFICA 46.- ACCION DEL YODO SOBRE CIRCALOY-2 (TE/LE) A 633 K A LAS FLUENCIAS Y CONCENTRACIONES DE YODO QUE SE INDICAN.



GRAFICA 47.- ACCION DEL YODO SOBRE CIRCALOY-4 (TF/LE) A LA TEMPERATURA DE 633 K, A LAS FLUENCIAS Y CONCENTRACIONES QUE SE INDICAN.



GRAFICA 48 : ACCION DEL YODO SOBRE CIRCALOY - 4 (TF/LE) A 593 K, A LAS FLUENCIAS Y CONCENTRACIONES DE YODO QUE SE INDICAN.

5 . - COMPARACION CON RESULTADOS EXPERIMENTALES.

En este capítulo se presenta una comparación de los resultados que se generan al usar el modelo, producto de este estudio, con aquellos datos experimentales proporcionados por Cubicciotti (6,7), Yaggee (9) y Miller (10), que corresponden a lotes de circaloy-2 y circaloy-4 que se tomaron como referencia en condiciones de irradiación, bajo ambientes de yodo a concentraciones iguales o mayores a la de saturación, a dos temperaturas 593 y 633 K y a esfuerzos aplicados comprendidos en el intervalo: desde el esfuerzo de umbral hasta 500 MPa.

Como se podrá observar de las gráficas 38 y 39 existe una pequeña diferencia entre el circaloy-2 y circaloy-4 -- que se manifiesta como una diferencia en las pendientes de las líneas (en escala log-log, figuras 49 y 50) y por la diferencia en los esfuerzos de umbral ∇_{FECU}^{ir} y ∇_{FECU} , así como en los tiempos mínimos de falla t_f para una concentración de yodo en el ambiente de prueba. En igual forma se puede observar -- tal cambio entre el circaloy de un mismo lote en condiciones de irradiación y de no irradiación, situación que hace que la expresión del comportamiento se deba expresar mediante dos ecuaciones básicas, a decir:

$$t_f = \frac{A C_I^{n-1}}{\nabla^b \text{Exp}(cT)} \left(\frac{B}{C_I \text{Exp}(aT)} - C \text{Log} \frac{F}{F_u} \right)^n$$

para circaloy irradiado, en donde " A, B, C, a, b, c, n, " son constantes específicas para cada tipo de circaloy, y :

$$t_f = D / (C_I \nabla^d \text{Exp}(eT))$$

para circaloy no irradiado, en la cual "D, d, e," son constantes específicas del tipo de circaloy.

A fin de poder observar la aproximación obtenida por este modelo, se utilizan tablas y gráficas que muestran los resultados teóricos y experimentales ya mencionados.

Para circaloy-2 trabajado en frío y liberado de esfuerzos, la comparación usando la ecuación 4-87, se lleva a efecto en la gráfica 51, así como en la tabla 17 para la condición de irradiación y no irradiación a las temperaturas de 593 y 633 K; a la concentración de saturación C_{IS} , 1×10^{-5} g/cm² y a la concentración de umbral C_{IU} , observándose que la predicción del modelo cae prácticamente dentro de los valores experimentales, quedando dentro del error del 3 %, porcentaje menor al 5 % de incertidumbre reportado por Cubicciotti (6) y Yaggee (9), en donde las curvas representan la predicción del modelo y los puntos a la información experimental recopilada.

Para circaloy-4 trabajado en frío y liberado de esfuerzos, la comparación se efectúa mediante los resultados teóricos y experimentales reportados en la gráfica 52, y en la tabla 18 para la condición de irradiación y no irradiación a la concentración de saturación, obtenidos al usar la ecuación 4-89. Se podrá observar que al igual que en el caso del circaloy-2, el error queda comprendido dentro del porcentaje del 5 % de incertidumbre experimental.

TABLA 17
 TIEMPO DE FALLA PARA CIRCALOY-2, CONFORME A LA ECUACION 4-87 Y
 COMPARACION CON LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES EXISTENTES.

F (n/m ²)	C _I (g/cm ²)	(MPa)	t _f (h)			
			T = 593		T = 633 K	
			TEORICO	EXPERI MENTAL	TEORICO	EXPERI MENTAL
4.0 x 10 ²⁵	5.14 x 10 ⁻⁵	500	0.42	0.42	0.04	
		400	0.70	0.72	0.06	
		300	1.32	1.30	0.12	
		200	3.27	3.20	0.29	
		165	5.00	5.00	0.44	
		136	----	----	0.69	
	1.0 x 10 ⁻⁵	500	84		49.6	
		400	140		82.0	
		300	263		155	
		200	652		385	
		165	1000		591	
		136	----		910	
	2.0 x 10 ⁻⁶	500	550		331	
		400	904		545	
		300	1720		1036	
		200	4250		2563	
		165	6500		3940	
		136	----		6067	
1.0 x 10 ²⁵	5.14 x 10 ⁻⁵	500	1.03	1.00	0.31	
		400	1.70	1.80	0.51	
		300	3.22	3.20	0.97	
		200	8.0	8.10	2.41	
		195	8.5	8.50	----	
		160	---	----	3.97	
	1.0 x 10 ⁻⁵	500	86		51.0	
		400	142		83.0	
		300	270		159	
		200	670		393	
		195	710		---	
		160	---		648	

CONTINUA TABLA 17

F (n/m ²)	C _I (g/cm ²)	(MPa)	t _f (h)			
			T = 593 K		T = 633 K	
			TEORICO	EXPERI MENTAL	TEORICO	EXPERI MENTAL
1.0 x10 ²⁵	2.0 x10 ⁻⁶	500	550		333	
		400	908		547	
		300	1730		1040	
		200	4270		2580	
		160	-----		4240	
1.0 x10 ²⁴	5.14x10 ⁻⁵	500	2.67	2.7	1.16	
		400	4.40	4.1	1.91	
		300	8.37	8.5	3.70	
		230	15.0	15.0	---	
		190	----	----	10.2	
	1.0 x10 ⁻⁵	500	90		51	
		400	150		83.5	
		300	280		159	
		230	500		320	
		190	---		446	
	2.0 x10 ⁻⁶	500	556		336	
		400	916		553	
		300	1740		1050	
		230	3300		2000	
		190	----		2950	
MENOR QUE 6.75x10 ¹⁷	5.14x10 ⁻⁵	500	1.00	0.9	0.126	
		450	2.97	2.4	0.37	
		400	10.0	7.0	1.26	
		340	53.5	53.5	6.73	
		280	----	----	50.0	
	1.0x10 ⁻⁵	500	5.14		0.65	
		450	15.24		1.92	
		400	51.4		6.73	
		340	275		34.6	
		280	----		247	

CONTINUA TABLA 17

F (n/m ²)	C _I (g/cm ²)	(MPa)	t _f (h)			
			T = 593 K		T = 633 K	
			TEORICO	EXPERI MENTAL	TEORICO	EXPERI MENTAL
MENOR QUE 6.75x10 ¹⁷	2.0 x10 ⁻⁶	500	25.7		3.23	
		450	76.0		9.59	
		400	257		32.3	
		340	1375		173.	
		280	-----		1283.	

TABLA 18

TIEMPO DE PALLA PARA EL CIRCALOY-4, CONFORME A LA ECUACION 4-89
Y COMPARACION CON LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES EXISTENTES.

F (n/m ²)	C _I (g/cm ²)	σ (MPa)	t _f (h)			
			T = 593 K		T = 633 K	
			TEORICO	EXPERI MENTAL	TEORICO	EXPERI MENTAL
6.00x10 ²⁵	6.55x10 ⁻⁵	500	8.15		0.13	0.13
		450	10.51		0.174	0.18
		400	13.96		0.232	0.24
		350	19.26		0.32	0.33
		300	27.93		0.463	0.48
		250	43.34		0.72	0.73
		220	59.64		----	----
		200	-----		1.23	1.15
		180	-----		1.58	1.60
		5.14x10 ⁻⁵	500	13.6		1.3
	450		17.53		1.68	
	400		23.27		2.23	
	350		32.11		3.08	
	300		46.56		4.46	
	250		72.25		6.92	
	220		99.40		----	
	200		-----		11.86	
	180		-----		15.28	
	1.00x10 ⁻⁵		500	125		36.5
		450	162		47	
		400	215		62.4	
		350	296		86	
		300	429		125	
		250	666		194	
		220	917		----	
		200	----		332	
		180	----		407	
		2.70x10 ⁻⁶	500	504		159
	450		650		205	
	400		863		273	
	350		1191		376	
	300		1727		546	

CONTINUA TABLA 16

ρ (n/n ²)	q_I (g/cm ²)	∇ (MPa)	t_f (h)			
			T = 593 K		T = 633 K	
			TEORICO	EXPERI MENTAL	TEORICO	EXPERI MENTAL
6.00x10 ²⁵	2.70x10 ⁻⁶	250	2680		847	
		220	3690		---	
		200	----		1450	
		180	----		1870	
3.60x10 ²⁵	6.55x10 ⁻⁵	500	8.76		0.305	0.28
		450	11.3		0.39	0.38
		400	15.0		0.52	0.50
		350	20.7		0.72	0.67
		300	30.0		1.045	0.90
		250	46.6		1.62	1.50
		240	51.4		----	----
		200	----		2.75	2.80
	5.14x10 ⁻⁵	500	14.25		1.89	
		450	18.4		2.43	
		400	24.4		3.23	
		350	33.66		4.46	
		300	48.8		6.47	
		250	75.7		10.0	
		240	83.6		----	
		200	----		17.0	
	1.00x10 ⁻⁵	500	126		37	
		450	163		48	
		400	216		63	
		350	298		87	
		300	432		126	
		250	670		196	
		240	740		----	
		200	---		336	
2.70x10 ⁻⁶	500	505		160		
	450	651		206		
	400	865		274		
	350	1193		378		
	300	1730		548		
	250	2685		850		
	240	2962		----		
	200	----		1455		

CONTINUA TABLA 18

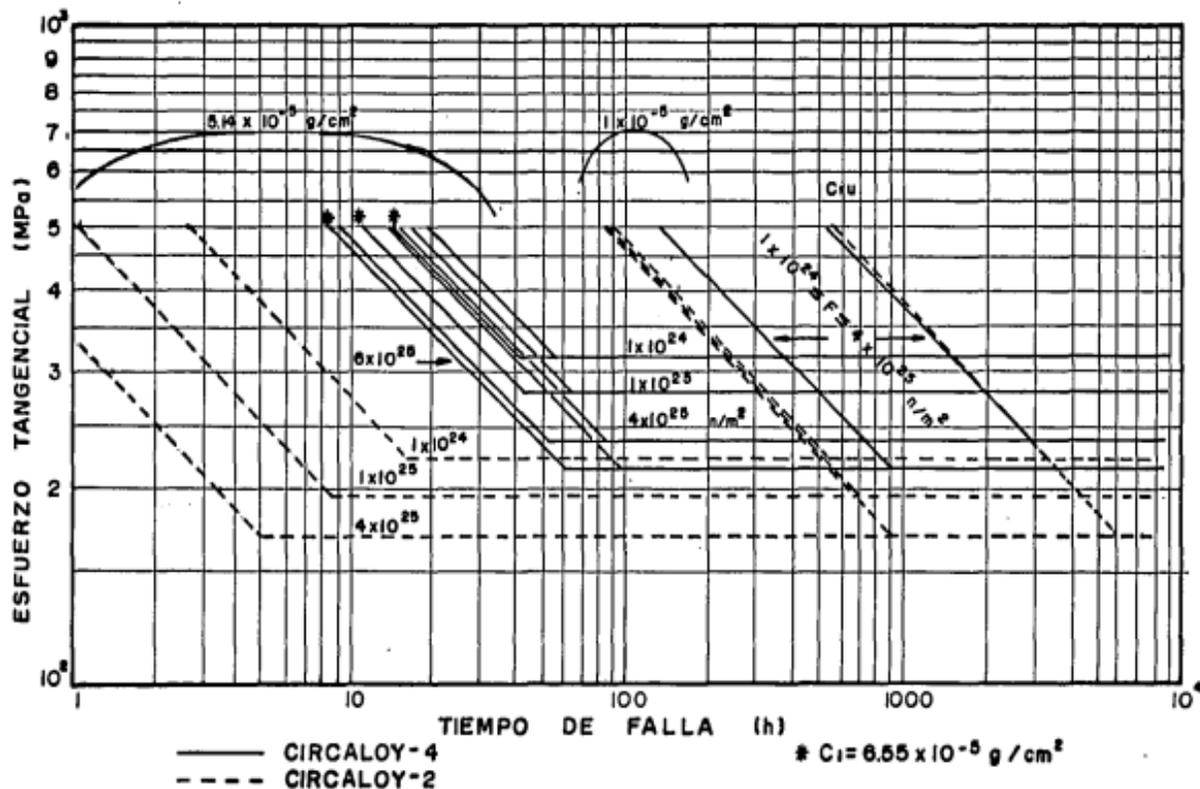
F (n/m ²)	C _I (g/cm ²)	∇ (MPa)	t _r (h)			
			T = 593 K		T = 633 K	
			TEORICO	EXPERI MENTAL	TEORICO	EXPERI MENTAL
1.00x10 ²⁵	6.55x10 ⁻⁵	500	10.3		0.78	
		450	13.3		1.01	
		400	17.7		1.34	
		350	24.4		1.85	
		300	35.4		2.68	
		280	41.8		----	
		250	----		4.16	
		230	----		5.09	
	5.14x10 ⁻⁵	500	15.93		2.38	
		450	20.54		3.07	
		400	27.3		4.10	
		350	37.65		5.63	
		300	54.57		7.72	
		280	64.45		9.64	
		230	-----		15.48	
	1.00x10 ⁻⁵	500	128		38.1	
		450	165		49.1	
		400	220		65.25	
		350	303		90.0	
		300	439		130	
280		518		154		
230		---		248		
2.70x10 ⁻⁶	500	507		161		
	450	654		208		
	400	868		276		
	350	1198		380		
	300	1737		552		
	250	2051		652		
	230	----		1047		
1.00x10 ²⁴	6.55x10 ⁻⁵	500	13.36		2.30	
		450	17.23		2.97	
		400	22.88		3.94	
		350	31.57		5.43	
		316	40.38		6.95	

CONTINUA TABLA 13

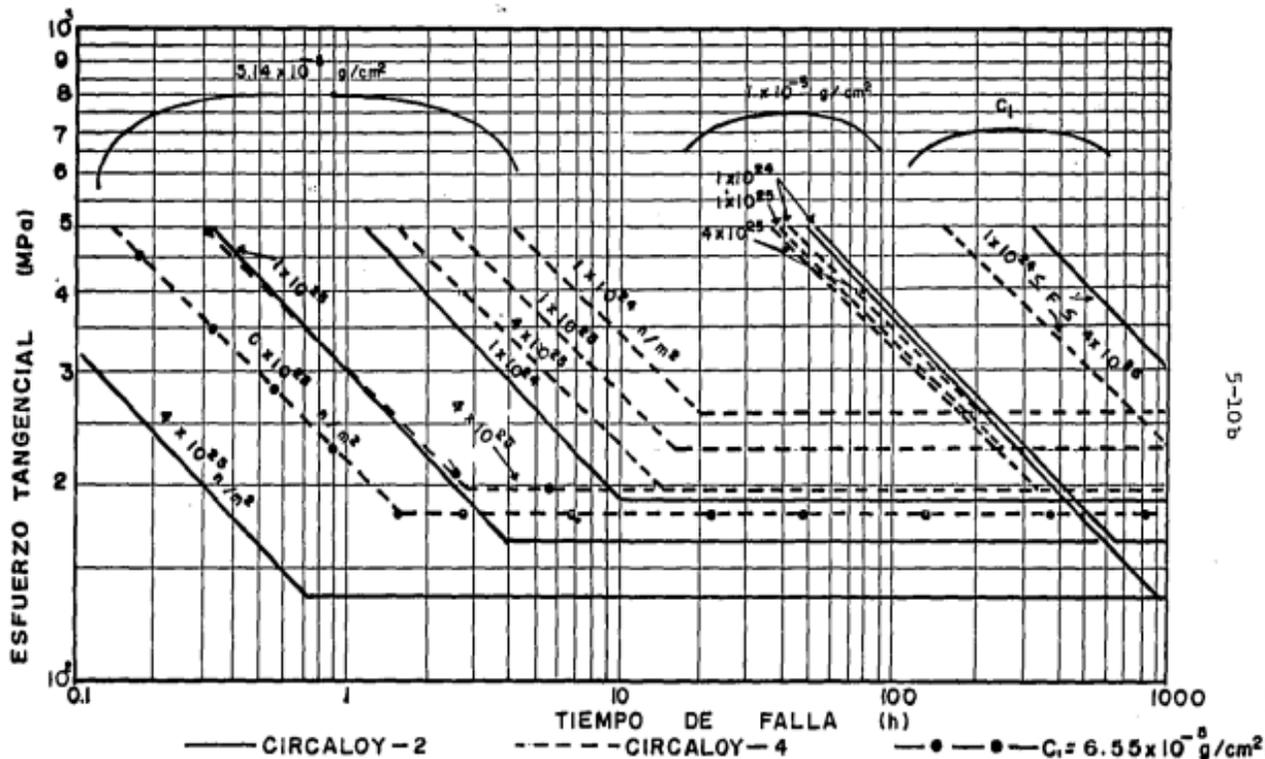
F (n/m ²)	C _I (g/cm ²)	▽ (MPa)	t _f (h)			
			T = 593 K		T = 633 K	
			TEORICO	EXPERI MENTAL	TEORICO	EXPERI MENTAL
1.00x10 ²⁴	6.55x10 ⁻⁵	300	---		7.88	
		260	---		11.13	
	5.14x10 ⁻⁵	500	19.11		4.04	
		450	24.63		5.20	
		400	32.72		6.90	
		350	45.14		7.88	
		316	57.74		12.20	
		300	----		13.82	
		260	----		19.51	
	1.00x10 ⁻⁵	500	131		40.28	
		450	170		51.93	
		400	225		68.97	
		350	311		95.16	
		316	398		121.7	
		300	451		138	
		260	637		195	
	2.7x10 ⁻⁶	500	510		163	
		450	658		210	
		400	874		280	
		350	1206		386	
		316	1543		494	
300		1749		560		
260		2470		790		
MENOR QUE 4.33x10 ²¹	6.55x10 ⁻⁵	500	2.5		0.21	0.20
		450	6.65		0.56	0.55
		400	19.82		1.66	1.50
		364	47.5		3.20	2.60
		300	----		23.95	24.00
	5.14x10 ⁻⁵	500	3.20		0.27	
		450	43.56		3.66	
		400	130		10.9	
		364	311		26.1	
		300	---		157	

CONTINUA TABLA 18.

F (n/m ²)	c _I (g/cm ²)	σ (MPa)	t _r (h)			
			T = 593 K		T = 633 K	
			TEORICO	EXPERI MENTAL	TEORICO	EXPERI MENTAL
MENOR QUE 4.33x10 ²¹	1.00x10 ⁻⁵	500	16.4		1.38	
		450	43.56		3.66	
		400	130		10.9	
		364	311		26.1	
		300	---		157	
	2.70x10 ⁻⁶	500	60.75		5.1	
		450	161		13.54	
		400	481		40.36	
		364	1152		96.75	
		300	-----		581.	

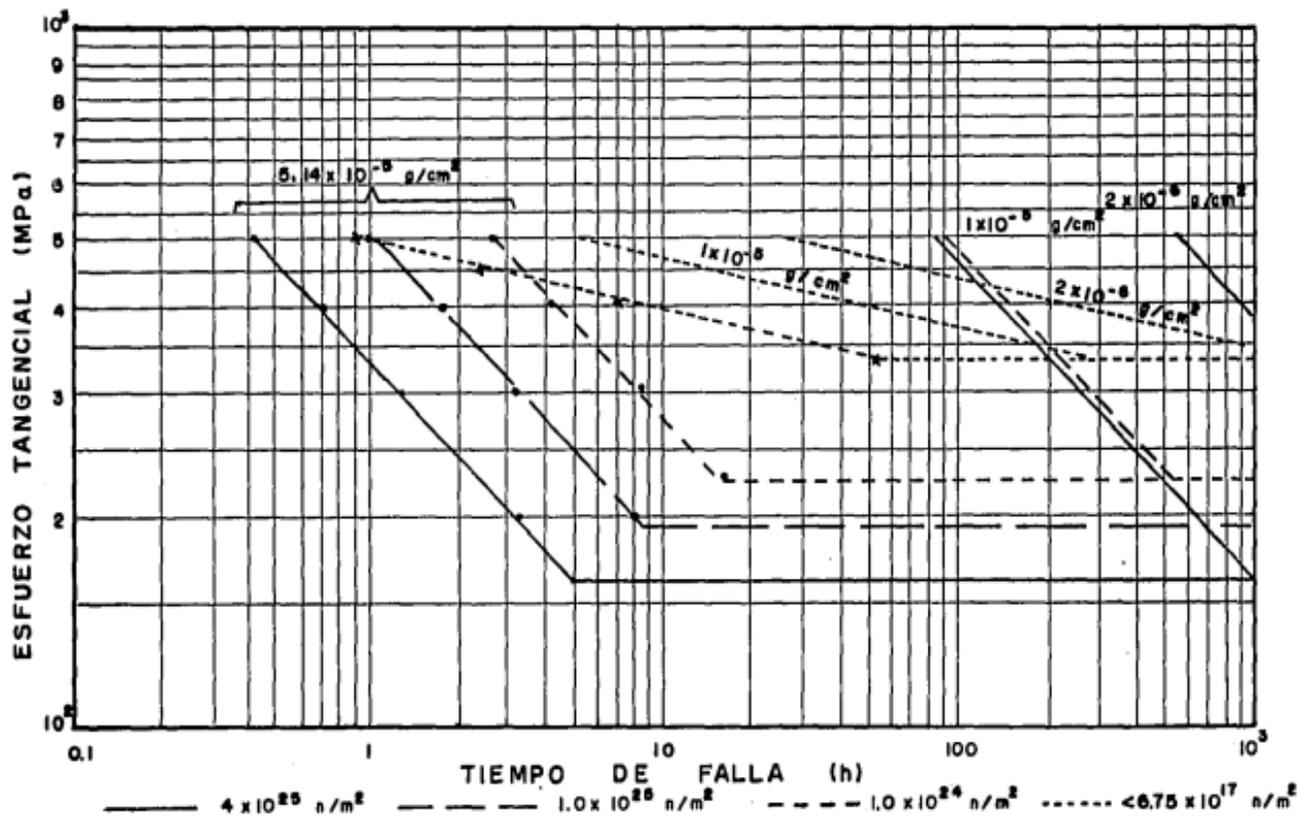


GRAFICA 49.- COMPARACION TEORICA DEL EFECTO DEL FENOMENO FEC SOBRE CIRCALOY-2 Y CIRCALOY-4 AMBOS (TF/LE) A LAS FLUENCIAS Y CONCENTRACIONES DE YODO INDICADAS, A LA TEMPERATURA DE 593 K.

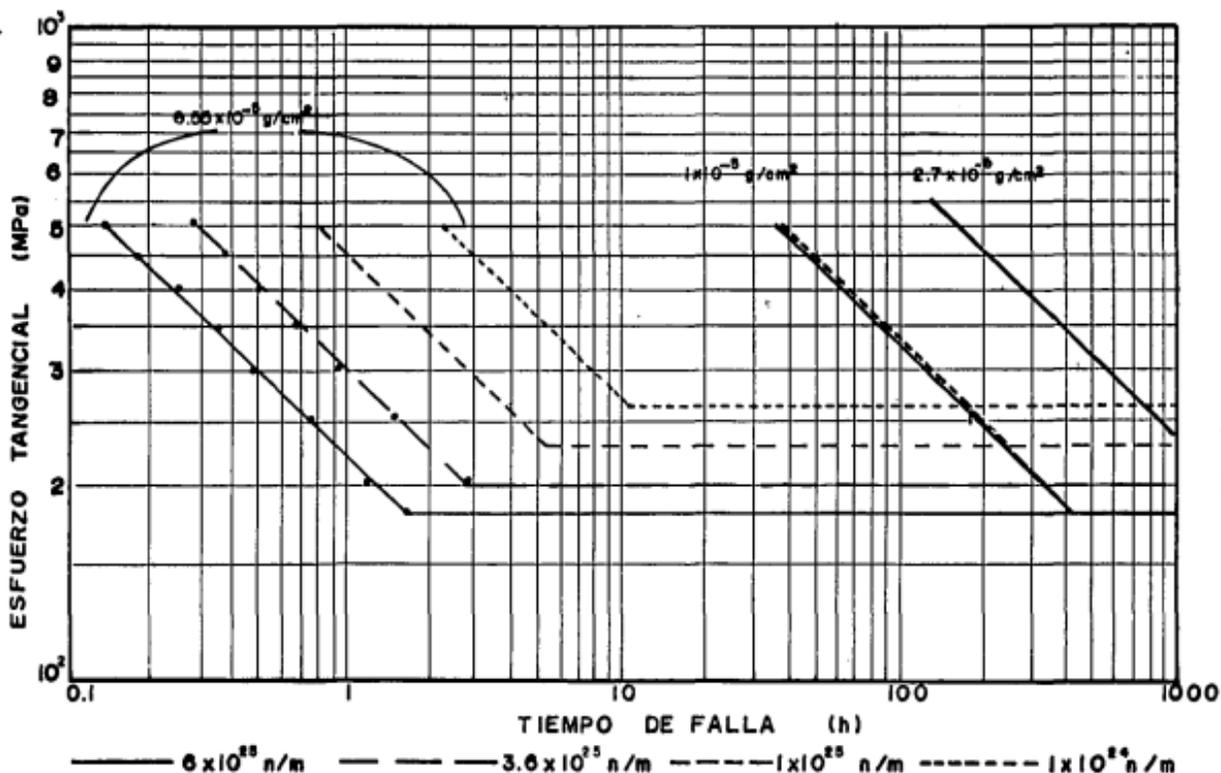


5-10b

GRAFICA 50.- COMPARACION TEORICA DEL EFECTO DEL FENOMENO FEC SOBRE CIRCALOY-2 Y CIRCALOY-4 AMBOS (TF/LE) A LAS FLUENCIAS Y CONCENTRACIONES DE YODO INDICADAS, A LA TEMPERATURA DE 633 K.



GRAFICA 51 : COMPARACION DE RESULTADOS TEORICOS SEGUN ECUACION 4-87 Y DATOS EXPERIMENTALES (x,x) A LA TEMPERATURA DE 593 K, PARA CIRCALLOY - 2 .



5-103

GRAFICA 5.2.- COMPARACION DE RESULTADOS TEORICOS SEGUN ECUACION 4-89 Y DATOS EXPERIMENTALES (*) A LA TEMPERATURA DE 633 K. PARA CIRCALLOY-4.

6 . - CONCLUSIONES.

Se ha derivado un modelo para el fenómeno de falla por esfuerzos bajo corrosión de vainas de circaloy, con el cual se predice el tiempo de falla en función del esfuerzo aplicado, la temperatura de la vaina, la concentración de yodo y de la fluencia neutrónica a las que se ve sometida una vaina combustible. Dicho modelo se elaboró partiendo de la información experimental recopilada de diversas fuentes.

El modelo se basa en el valor del tiempo mínimo de falla t_{F_0} correspondiente al esfuerzo umbral de falla ∇_{FECU} bajo condiciones de no irradiación y ante un ambiente de yodo igual o en exceso a la concentración de saturación. Estas variables (t_{F_0} , ∇_{FECU}), las cuales son típicas del proceso de fabricación del circaloy, pueden ser obtenidas en pruebas de laboratorio, de corta duración.

Las expresiones que se determinaron para representar el comportamiento del tiempo de falla son las correspondientes a las ecuaciones 4-87 y 4-89 según se trate de circaloy-2 o circaloy-4, respectivamente. La forma general del modelo corresponde a expresiones del siguiente tipo:

$$t_f = \begin{cases} \frac{A}{\nabla^b C_I \text{Exp}(aT)} \left(1 - m C_I \text{Exp}(cT) \text{Log} \frac{F}{F_0} \right)^n & ; F_0 < F \\ \frac{B}{\nabla^d C_I \text{Exp}(eT)} & ; F \leq F_0 \end{cases}$$

en donde A, B, a, b, c, d, e, m, n, son constantes específicas del tipo de circaloy y se presentan en la tabla 19.

TABLA 19

CONSTANTE	CIRCALOY-2	CIRCALOY-4
A	2.11×10^6	7.73×10^{10}
B	8.07×10^{36}	1.53×10^{37}
a	5.44×10^{-3}	1.22×10^{-2}
b	2.234	2.41
c	7.35×10^{-4}	7.11×10^{-3}
d	10.32	9.27
e	2.25×10^{-2}	2.69×10^{-2}
m	6.24	5.41
n	1.6814	1.454

Como se podrá observar en la expresión anterior, el tiempo de falla se representa mediante dos ecuaciones, una para fluencias de neutrones mayores a la fluencia umbral F_0 , a partir de la cual el esfuerzo de falla ∇_{FECU} empieza a disminuir proporcionalmente a la fluencia y una segunda ecuación para fluencias menores a la fluencia umbral F_0 . En la primera, el tiempo de falla depende de dos factores, siendo en uno de ellos inversamente proporcional al esfuerzo aplicado, elevado a la potencia 2.4, inversamente proporcional a la exponencial de la temperatura e inversamente proporcional a la concentración de yodo. En el otro factor, queda comprendida la contribución en forma logarítmica de la fluencia neutrónica

a la cual se ve sometido el circaloy y se puede apreciar que tal contribución está influenciada por la concentración de yodo y la exponencial de la temperatura, siendo éste segundo factor una fracción del primer factor. En la segunda ecuación, para fluencias inferiores o iguales a la fluencia umbral F_0 , la expresión se reduce a un sólo factor en el que el tiempo de falla es inversamente proporcional al esfuerzo aplicado elevado a la potencia 10, a la concentración de yodo y a la exponencial de la temperatura.

Con objeto de determinar la acción del yodo en el fenómeno de falla por esfuerzo bajo corrosión se trabajó una expresión la cual se obtuvo a partir de la diferencia entre el esfuerzo de falla en ausencia de yodo σ_{θ}^{ir} y el esfuerzo de falla en presencia de yodo σ_{PEC}^{ir} . Estos dos esfuerzos se consideran en condiciones similares de irradiación y temperatura, para un mismo tiempo de falla, quedando esta expresión en forma simplificada como:

$$\text{ACCION DEL YODO} = \Delta \sigma_{PEC}^{ir} = \sigma_{\theta}^{ir} - \sigma_{PEC}^{ir}$$

En la aplicación de esta expresión se distinguen tres zonas de fluencias, una en donde la fluencia es mayor a la fluencia F_u , siendo ésta la fluencia a la cual el esfuerzo de falla, en ausencia de yodo, se incrementa y menor a $5 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$, una segunda zona en donde la fluencia es mayor a la fluencia F_0 descrita anteriormente y para valores menores a la fluencia F_u , la tercera zona comprende aquellas fluencias menores a F_0 . En forma particular esta expresión queda de la siguiente manera:

$$\Delta V_{FEC}^{ir} = \left\{ \begin{array}{l} \frac{A (1 + B t_f^b \text{Log} \frac{F}{F_u})}{\text{Exp}(aT) t_f^b} - \frac{D(1 - G C_I \text{Exp}(jT) \text{Log} \frac{F}{F_o})^n}{\text{Exp}(cT) t_f^d C_I^e} \\ \quad ; \quad F_u < F \leq 5 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 \\ \frac{A}{\text{Exp}(aT) t_f^b} - \frac{D(1 - G C_I \text{Exp}(jT) \text{Log} \frac{F}{F_o})^n}{\text{Exp}(cT) t_f^d C_I^e} \\ \quad ; \quad F_o < F \leq F_u \\ \frac{A}{\text{Exp}(aT) t_f^b} - \frac{H}{\text{Exp}(kT) C_I^h t_f^h} \\ \quad ; \quad F \leq F_o \end{array} \right.$$

así mismo hay que mencionar que esta expresión es válida para los siguientes intervalos de temperatura, concentración de yodo y tiempo de falla:

$$593 \leq T \leq 672 \text{ K}$$

$$C_{IU} \leq C_I \leq C_{IS}$$

$$t_\theta < t_f \leq t_{Fo}$$

Además debe tenerse en cuenta que para tiempos de falla mayores a t_f ó t_{Fo} , el segundo término de cada una de las ecuaciones que componen la expresión anterior, permanece constante e igual al valor que le corresponde cuando el tiempo de falla es igual a t_f ó t_{Fo} . Las constantes A, B, D, G, H, a, b, c, d, e, h, k, j, n, son específicas para un tipo de circoloy y se presentan en la tabla 20 .

TABLA 20

CONSTANTE	CIRCALOY-2	CIRCALOY-4
A	1482	1577
B	0.4588	0.4642
D	666.8	32950
G	832	0.109
H	3770	10270
a	0.0008	0.0008
b	0.01667	0.047
c	0.00244	0.00564
d	0.04476	0.0415
e	0.4512	0.4153
h	0.0969	0.108
j	0.000735	0.007107
k	0.001885	0.0029
n	0.7562	0.6033

Al comparar los tiempos de falla obtenidos al aplicar el modelo y compararlos con los resultados experimentales reportados en el capítulo 2, se obtuvo que los valores difieren en un 3 %, lo cual se considera dentro de un margen aceptable. Esta comparación se muestra en el capítulo 5 y por tanto se piensa que el modelo predice satisfactoriamente el tiempo al cual una vaina va a sufrir una falla por esfuerzos bajo corrosión.

Finalmente, la ventaja que representa este modelo se manifiesta en el hecho de poder predecir los tiempos de falla en base al tiempo mínimo de falla t_{F0} y del esfuerzo de umbral σ_{FEGU} determinados a la concentración de saturación y en condición de no irradiación. Estos dos parámetros se pueden obtener para las vainas de circaloy en pruebas de laboratorio de corta duración y que pueden ser realizadas por los fabricantes del producto.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- J.H. Davies, H.S. Rosenbaum, J.S. Armijo, R.A. Proebstle, T.C. Rowland, J.R. Thompson, E.L. Esch, G. Romeo y D.R. Rutkin: "IRRADIATION TESTS TO CHARACTERIZE THE PCI FAILURE MECHANISM". G.E.- BWR Syst Department- California (1966).
- 2.- H.S. Rosenbaum, J.H. Davis y J.Q. Pon. G.E. REPORT GSAP-5100-5 (1966).
- 3.- A. Garlick y P.D. Wolfenden. "FRACTURE OF ZIRCONIUM ALLOYS IN IODINE VAPOUR". UKAEA Journal of Nuclear Materials 41 (1971) - 274-292.
- 4.- J.C. Wood. "FACTORS AFFECTING STRESS CORROSION CRACKING OF ZIRCALOY IN IODINE VAPOUR". Journal of Nuclear Materials 45 (1972/73). 105-122.
- 5.- J.C. Wood "INTERACTIONS BETWEEN STRESSED ZIRCONIUM ALLOYS AND IODINE AT 593 K.- Nuclear Technology vol 27, jul. 1974.
- 6.- D. Cubicciotti, R.L. Jones, B.C. Syrett y Co. EPRI-NP-1329 Project 455-16 (Mzo 1980).
- 7.- D. Cubicciotti y L. Jones.- EPRI-NP-717 (1978).
- 8.- R.P. Tucker, P.H. Kreyns y J.J. Kearns. "THE EFFECTS OF INTERNAL FLAWS, IODINE CONCENTRATION AND TEMPERATURE ON THE STRESS CORROSION CRACKING BEHAVIOR OF ZIRCALOY-4 TUBING" (LWBR Development Programan) Feb 1976.- BETTIS ATOMIC POWER LABORATORY, PENNSILVANIA.
- 9.- F.L. Yagger, R.F. Mattas y L.A. Neimark, "CHARACTERIZATION OF IRRADIATED ZIRCALOYS SUSCEPTIBILITY TO STRESS CORROSION CRACKING EPRI-NP-1557-OCTUBRE 1980
- 10.-A.K. Miller, K.D. Challenger y A. Taseoji, SCCIO "A PHO-
NOMENOLOGICAL MODEL FOR IODINE STRESS CORROSION CRACKING OF ZIRCALOY. VOL. 1 EPRI-NP-1798 (abril 1981)
- 11.-IAEA- CN-36/279 (1980)

BIBLIOGRAFIA.

- 12.- J.C. WOOD, " PCI-OGRAMS, APLICATION OF CANDU FUEL-OGRAMS METODOLOGY TO PCI DATA FROM LIGHT WATER REACTORS". AECL, CHALK RIVER, CANADA (1979).
- 13.- A. GARLICK Y J.G. GRAVENOR, "A CRITERION AND MECHANISM FOR POWER RAMP DEFECTS". UKAEA, ND -R-90(W), Mayo 1977.
- 14.- L.M. LOWRY, A.J. MARKWORTH, J.S. PERRY, M.P. LONDOW, "EVALUATING STRENGTH AND DUCTILITY OF IRRADIATED ZIRCALOY - TASK-5 ". NUREG/CR-1729 VOL-1, 1981
- 15.- P.H. KREYNS, G.L. SPAHR, J.E. McCAULEY, " AN ANALYSIS OF IODINE STRESS CORROSION CRACKING OF ZIRCALOY-4 TUBING. (WBAPL) Penn. USA (1975).
- 16.- C.C. BUSBY, R.P. TUCKER, J.E.McCAULEY. WAPD-TM-1149 (Jul-1974).
- 17.- E. SMITH, "STRESS CORROSION FRACTURE OF ZIRCALOY CLADDING IN FUEL RODS SUBJETED TO POWER INCRESSES. A MODEL FOR CRACK PROPAGATION AND THE FAILURE THRESHOLD STRESS", Journal of Nuclear Materials 80 (1979) 29-302.
- 18.- S. SHANN, D.R. OLANDER. "CORRELATION OF FAILURE TIMES FOR IODINE STRESS CORROSION CRACKING OF ZIRCALOY". Nuclear - Tech.VOL-53 (1979).
- 19.- R.P.JONES, E. SMITH, A.K. MILLER. " OBSERVATIONS ON DAMAGE ACUMULATION DURING IODINE SCC OF ZIRCALOY CLADDING" Nuclear Tech. 42-233 (1979)