

ESTUDIO METALÚRGICO DE CAUSAS DE FALLA DEL PUENTE PESCADERO

*Héctor Hernández - Héctor Delgado
Departamento de Ingeniería Mecánica,
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.*

Resumen

Se trata de un puente en arco de una sola luz de 120 m, el cual colapsó después de 10 años de servicio. Con base en elementos estructurales extraídos del puente de falla, se realizó un estudio fractográfico, mecánico y químico, con el fin de establecer las posibles causas de fallas del puente desde el punto de vista metalúrgico.

En nudos de unión de pendolón-arco se observan fracturas por fatiga en uniones soldadas en varios sitios, lo cual es evidenciado por una apariencia de fractura suave de crecimiento estable de grietas combinada con una zona de apariencia fibrosa de fractura súbita final de colapso del puente.

Dado que el colapso del puente es precedido por la generación de grietas en uniones soldadas, se considera importante examinar la combinación de las propiedades de resistencia y tenacidad con el fin de estudiar tanto la capacidad de soporte de carga como de la tolerancia de defectos de las uniones soldadas.

Introducción

Con base en los elementos estructurales extraídos del puente de falla, los cuales fueron suministrados por el Instituto Nacional de Vías, INV, se realizaron estudios mecánicos, químicos y fractográficos con el fin de determinar las

características mecánicas y químicas de los materiales empleados en la construcción de los elementos de falla y establecer el modo de falla, mediante el estudio fractográfico.

La caracterización mecánica se realizó mediante ensayos de tensión en probetas maquinadas a partir de secciones de materiales extraídos de platina atiesadora, platina de arco y perfiles de pendolón. Los ensayos se realizaron de acuerdo con las recomendaciones de la norma ASTM A 370. También se realizaron ensayos de dureza en la unión soldada de atiesador-platina de arco, con el fin de detectar posibles excesos de dureza en la zona afectada por el calor.

Los análisis químicos se realizaron por espectrometría, también, en muestras de platina atiesadora, platina de arco y pendolón.

De acuerdo con los resultados de los ensayos mecánicos y químicos realizados en muestras de platina de arco, platina atiesadora y perfil de pendolón, los materiales cumplen los requerimientos de resistencia y composición química correspondientes a los aceros ASTM A 572 G50 y A36, los cuales son especificados en los planos de diseño del puente.

Según los análisis químicos, estos aceros presentan una buena soldabilidad, lo cual concuerda con los perfiles de dureza establecidos en secciones transversales al cordón de soldadura de unión platina de arco-platina atiesadora.

El estudio fractográfico indica que antes del colapso del puente se había presentado:

- Una falla de fractura por fatiga a través del cordón de soldadura platina atiesadora platina inferior de arco.
- Agrietamiento por fatiga en la unión soldada de soporte de pendolón-platina inferior de arco, como también en el cordón de soldadura de unión platina-platina del cajón del arco en nudos arco-pendolón.

Por lo general, este tipo de falla se presenta por un proceso de iniciación y crecimiento progresivo de grietas hasta cuando se presenta la falla súbita final.

Las grietas de fatiga pueden ser detectadas oportunamente por inspecciones periódicas, frecuentemente empleando ensayos no destructivos.

Como medidas de prevención de recurrencia de fallas similares (colapso plástico precedido por grietas de fatiga) se recomienda:

Seleccionar aceros y procedimientos de soldadura de manera que se tenga la mayor resistencia mecánica combinada con una buena tenacidad, para que en caso de que se generen grietas por fatiga, éstas puedan crecer lo suficiente para ser detectadas antes de llegar al tamaño crítico.

Realizar inspecciones periódicas de los sitios críticos de las estructuras de puente con diseño similar, para detectar anomalías oportunamente, como son grietas, pérdida de solidez de unión entre componentes y pérdida excesiva de sección resistente por corrosión.

En sitios que se tenga un esfuerzo de tensión fluctuante, evitar el empleo de uniones soldadas de baja resistencia a la fatiga, como es una soldadura con penetración incompleta. Donde se tenga esfuerzos de fatiga es de particular importancia reducir la severidad de concentración de esfuerzo, por ejemplo aumentando el radio de acordonamiento en el pie de soldadura.

I. ENSAYOS DE TENSIÓN

Se realizaron ensayos de tensión en probetas planas de platina de arco, perfil de pendolón y platina atiesadora para establecer las propiedades mecánicas en tensión de los materiales de construcción de cada uno de estos componentes involucrados en la falla.

Los resultados de los ensayos realizados cumplen las especificaciones de los planos de construcción de cada uno de estos componentes involucrados en la falla. Los resultados de los ensayos realizados cumplen las especificaciones de los planos de construcción, donde se estipulan los aceros ASTM A36 y ASTM 572 GRADO 50.

A. Pendolón

Se determinó que está construido de acero ASTM A36; los resultados de los ensayos de tensión se comparan respecto a las especificaciones según norma en el cuadro 1.

Acero ASTM A36	Resistencia a tensión(MPa)	Resistencia a fluencia(MPa)	Alargamiento en 50 mm (%)
Según norma	400-550	250 (mínimo)	21 (mínimo)
Según ensayo P1	431,25	293	38
Según ensayo P2	426,73	293	38

Cuadro 1. Propiedades mecánicas en tensión de pendolón.

B. Arco

Se determinó que está construido de acero ASTM A572 GRADO50; los resultados de los ensayos de tensión se comparan respecto a las especificaciones en el cuadro 2.

Acero ASTM A572 grado 50	Resistencia a tensión(MPa)	Resistencia a fluencia(MPa)	Alargamiento en 50 mm (%)
Según Norma	450 (mínimo)	345 (mínimo)	21 (mínimo)
Según ensayo A1	564,95	429,77	32
Según ensayo A2	576,63	426,14	36

Cuadro 2. Propiedades mecánicas en tensión de platina de arco.

C. Atiesador

Se determinó que está construido de acero ASTM A572 grado 50; los resultados de los ensayos de tensión se comparan respecto a las especificaciones en el cuadro 3.

Acero ASTM A572 grado 50	Resistencia a tensión(MPa)	Resistencia a fluencia(MPa)	Alargamiento en 50 mm (%)
Según norma	400 (mínimo)	345 (mínimo)	21 (mínimo)
Según ensayo At.	565.15	472.15	56

Cuadro 3. Propiedades mecánicas en tensión de atiesador.

II. ANÁLISIS QUÍMICO

Se realizaron ensayos químicos en probetas de platina de arco, perfil de pendolón y platina atiesadora para establecer la composición química de los materiales de construcción de cada uno de estos componentes. Los ensayos realizados cumplen las especificaciones de las normas correspondientes de aceros ASTM A36 y ASTM A 572 grado 50. (Ver cuadro 4).

Acero ASTM A36	Carbono (%)	Fósforo (%)	Azufre (%)
Según norma	0,26 (máximo)	0,04 (máximo)	0,05 (máximo)
Según ensayo P1,P2	0,14	> 0,053	0,038

Cuadro 4. Composición química de pendolón.

El porcentaje de fósforo encontrado en el análisis químico es ligeramente superior al máximo especificado. Sin embargo se considera que esto no tiene incidencia en la falla, porque en los pendolones no se desarrollaron grietas.

Acero ASTM A572 grado 50	Carbono (%)	Fósforo (%)	Azufre (%)	Manganeso (%)
Según norma	0,23 (máximo)	0,04 (máximo)	0,05 (máximo)	1,35 (máximo)
Según ensayo A1	0,129	0,028	0,014	1,23
Según ensayo A2	0,129	0,027	0,014	1,23

Cuadro 5. Composición química de platina de arco.

Acero ASTM A572 grado 50	Carbono (%)	Fósforo (%)	Azufre (%)	Manganeso (%)
Según norma	0,23 (máximo)	0,04 (máximo)	0,05 (máximo)	1,35 (máximo)
Según ensayo At	0,14	0,017	0,019	1,28

Cuadro 6. Composición química de platina de atiesador.

La soldabilidad de un acero, en relación con la susceptibilidad al agrietamiento por soldadura, se puede estimar aproximadamente empleando el concepto de carbono equivalente, CE, el cual se puede calcular empleando varias fórmulas, entre las cuales se tiene la empleada por la ANSI/ AASHTO/ AWS D1.5-88':

ANSI/AASHTO/AWS D1. 5-88, *Bridge Welding Code*.
American Welding Society, Miami, Fla.

$$CE = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15$$

Según esta ecuación, si el carbono equivalente es menor del 0,35% se considera que el acero se puede soldar fácilmente.

De acuerdo con los análisis químicos (apéndice D) se tiene:

Para el Acero ASTM A36, $CE = 0,14 + 0,55/6 + 0,01/5 + 0,04/15 = 0,236\%$

Para el Acero ASTM A572 G50, $CE = 0,129 + 1,23/6 + 0,02/5 + 0,06/15 = 0,342\%$

Luego los aceros se pueden soldar normalmente sin problemas de agrietamiento durante el proceso.

Dato	Dureza HVN
1	192(MB)
2	187
3	214(ZAC)
4	227
5	283
6	286
7	244(MS)
8	251
9	234
10	234
11	232(ZAC)
12	236
13	232
14	193
15	188
16	177(MB)

Dato	Dureza HVN
1	182 (MB)
2	188
3	232(ZAC)
4	293
5	296(MS)
6	299
7	257
8	251(ZAC)
9	219
10	193(MB)

Dato	Dureza HVN
1	172
2	180
3	192(ZAC)
4	232
5	244
6	271
7	277(MS)
8	293
9	296
10	299
11	249 (ZAC)
12	232
13	210(MB)

MB = metal base
 ZAC = zona afectada por el calor
 MS = metal de soldadura

Cuadro 7. Perfiles de dureza en cordón de soldadura de atiesador-platina inferior de arco.

III. PERFILES DE DUREZA

En sección transversal de cordones de soldadura en platina atiesadora-platina inferior de arco (HVN 5 kgf). (Ver cuadro 7).

En general, estos perfiles de dureza se consideran normales, con una dureza promedio en la zona afectada por el calor entre las correspondientes del metal base y el metal de soldadura.

IV. DIMENSIONES DE CORDÓN DE SOLDADURA

Se toman las dimensiones del brazo de soldadura del cordón de filete:

A. Atiesador-platina inferior de arco

Según dimensiones plano: 3/16" (4,76 mm).
Según dimensiones tomadas en secciones transversales al cordón: 7.5 mm y 6.7 mm.

B. Platina -platina de arco

Según dimensiones de plano: 1/4 (6,35 mm).
Según dimensiones tomadas en sección transversal al cordón 7,0 mm.

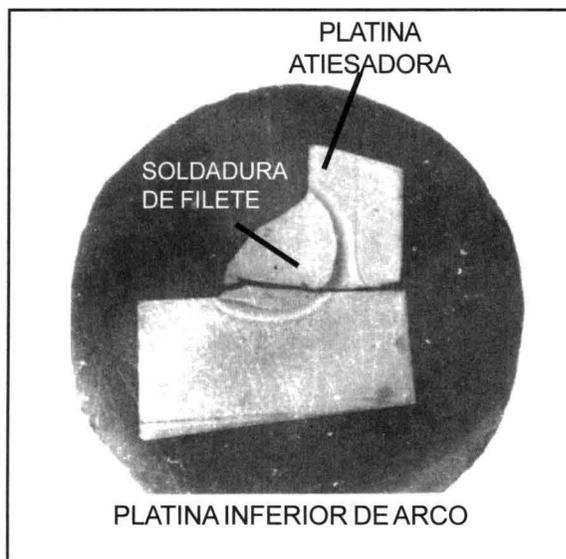


Figura 1. Fractura a través de cordón de soldadura de platina atiesadora-platina inferior de arco.

V. FRACTOGRAFÍA

Con base en observaciones de fracturas de los elementos de falla suministrados por el INV se encuentra lo siguiente:

A. Fractura en unión platina atiesadora-platina inferior de arco (figura 1).

Se observa una apariencia de fractura suave a través del cordón de soldadura característica de una fractura producida por un crecimiento progresivo de grietas por fatiga (figura 2).

B. Fractura en unión platina inferior del arco-soporte del pendolón .

Las grietas de fractura se encuentran en la planta inferior del arco en los extremos del soporte del pendolón (figura 3). La mayoría de las grietas presentan características de fatiga, es decir, una zona de apariencia suave de crecimiento progresivo de grieta, seguido de otra zona de apariencia fibrosa de rotura súbita. En algunos casos, las grietas de fatiga crecen hasta encontrar una

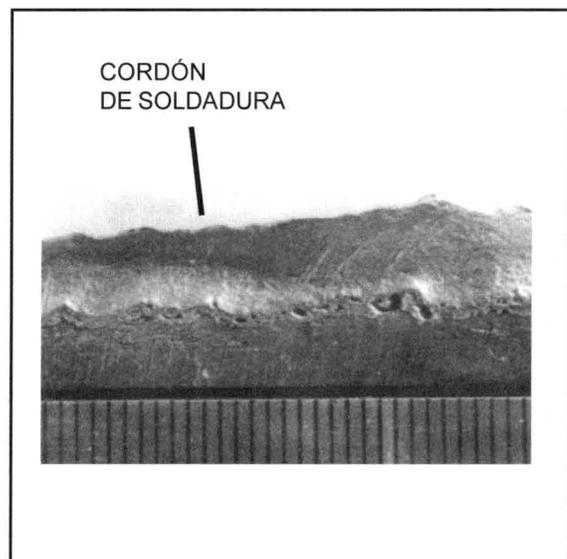


Figura 2. Fractura por fatiga a lo largo de tramo de cordón de soldadura de platina atiesadora-platina inferior de arco. Se observan marcas de playa y defectos en la raíz de la soldadura.

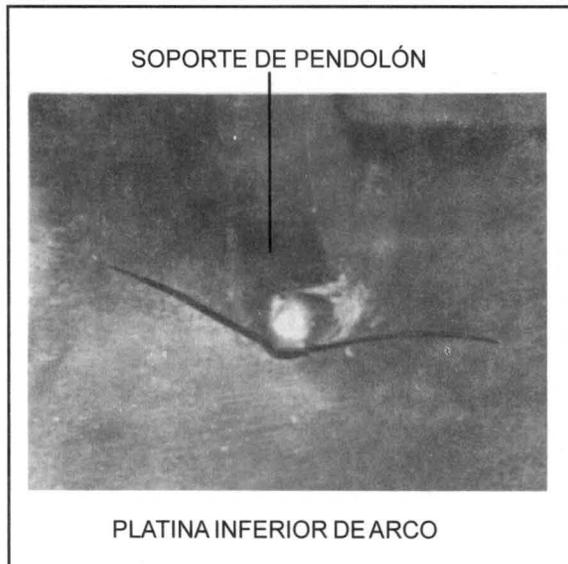


Figura 3. Grieta en pie de soldadura de soporte de pendolón-platina inferior de arco.

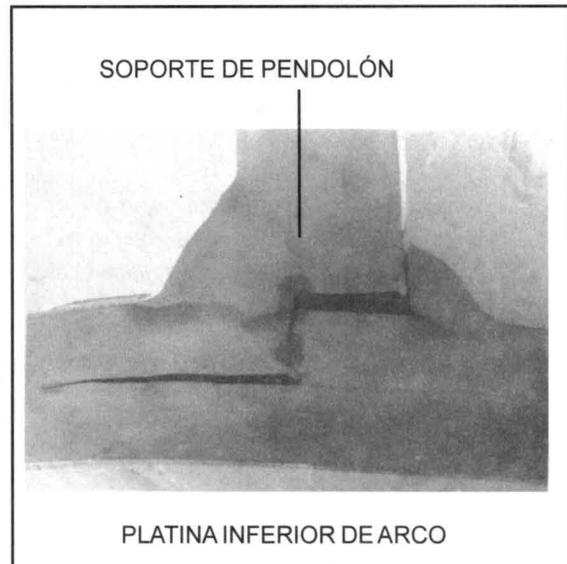


Figura 4. Fractura por iniciación de grieta en la raíz de soldadura de filete, la cual se propaga transversalmente hasta encontrar una discontinuidad metalúrgica.

discontinuidad y generan una delaminación (figura 4). Para que se propaguen estas grietas, se debe haber presentado un esfuerzo cíclico de tensión fluctuante en esos sitios².

VI. ENSAYOS DE TENACIDAD DE FRACTURA CTOD EN UNIÓN SOLDADA DE ACERO A572 G50

Debido a que se encuentran evidencias de preexistencia de grietas de fatiga en uniones soldadas de nudos arco-pendolón, las cuales se propagan en platina de arco (acero A572 G50), se considera importante realizar una evaluación de la resistencia al crecimiento inestable de una grieta en las diferentes zonas metalúrgicas que se desarrollan en la unión soldada. Esto se lleva a cabo mediante ensayos de tenacidad de fractura CTOD, de acuerdo con la norma ASTM E 1290.

La tenacidad de fractura CTDO se evalúa como la abertura en la punta de una grieta para la carga

2. POWELL, G. W. and COORD., *Metals Handbook*, 9 Ed., vol.11, *Failure Analysis and Prevention*, American Society for Metals. 1986. p.

máxima de ensayo. Para calcular la tenacidad CTOD, con base en el diagrama experimental de carga-desplazamiento de abertura de grieta (apéndice A), es necesario determinar la resistencia a fluencia del metal de soldadura, del metal base y de la zona afectada por el calor, para lo cual se realizan ensayos de tensión en probeta de tamaño reducido. En el cuadro 8 se presenta la combinación de propiedades mecánicas en la unión soldada de acero A572G50.

De los resultados presentados en el cuadro 8 se tiene que en la unión soldada del acero A572 G50 el metal de soldadura ofrece una mayor tenacidad CTOD que el metal base, y en la zona afectada por el calor se tiene una tenacidad CTOD que se encuentra entre el metal base y el metal de soldadura, es decir que no se encuentra evidencia de fragilización en la ZAC.

VII. ENSAYOS DE IMPACTO EN UNIÓN SOLDADA DE ACERO A572 G50

Para evaluar la tendencia a la fractura frágil de las uniones soldadas de falla (soldadura de acero A572 G50) se realizaron ensayos de impacto Charpy CVN, de modo que se obtienen las curvas de transición dúctil-frágil correspondientes al metal base, la zona afectada por el calor y el metal de

Propiedades mecánicas en unión soldada de acero A572 G50						
Metal base		Tenacidad de fractura CTOD, mm			Metal de soldadura	
0.316 0.369 0.400		Zona afectada por el calor			0.795 0.950 0.913	
		0.648 0.655 0.503				
Propiedades en tensión						
		Unión soldada**		Metal base***	Metal de soldadura***	
Resistencia a fluencia, kgf/mm ²				32.3 30.9	47.9 45.5	
Resistencia a tensión, kgf/mm ²		50.9*	49.7*	48.6 45.20	56.7 56.1	
Alargamiento en 50mm,%				23 20	18.8 18.8	

*Falla por en metal base; **probeta plana; ***probeta cilíndrica de ϕ 6 mm.

Cuadro 8. Combinación de propiedades de resistencia y tenacidad de unión soldada de acero A572 G50.

soldadura. En el cuadro 9 y en la figura 5 se presentan los resultados.

Se considera que para una temperatura de servicio bien por encima de la temperatura correspondiente a 40 J, el diseño se realiza por consideraciones de resistencia solamente³. En este sentido, de las curvas de transición se tiene lo que se muestra en el cuadro 10.

Luego es suficiente consideraciones de resistencia para efecto de análisis de falla³.

Por otra parte, la AASHTO, en la construcción de puentes como un requerimiento de tenacidad al impacto para el acero A572, especifica una energía mínima CVN de 20.3 J a 21 °C. De las curvas de transición de observa que se cumple cabalmente este requisito⁴.

VIII. DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Según los resultados de los ensayos mecánicos y los análisis químicos, los aceros estructurales cumplen las especificaciones de diseño.

De acuerdo con los perfiles de dureza realizados en secciones transversales de soldadura de filete asociada a la falla, no se encuentra evidencias de susceptibilidad al agrietamiento en frío en la zona afectada por el calor.

De los resultados de los ensayos de tensión y de los ensayos de tenacidad realizados en el metal de soldadura y el metal base de uniones soldadas del acero A572 G50, se encuentra un buen balance de propiedades mecánicas de resistencia y tenacidad en las soldaduras.

La tenacidad en la unión soldada asociada a la falla se estudio empleando ensayos de tenacidad de fractura CTOD y ensayos de impacto Charpy CVN. En los ensayos de tenacidad CTOD se evalúa la resistencia al crecimiento de una discontinuidad tipo grieta aplicando una carga de naturaleza estática, mientras que en los ensayos de impacto se emplea una carga dinámica con una discontinuidad tipo entalla. Debido a estas diferencias, se encuentran resultados relativos diferentes a temperatura ambiente: en los ensayos de impacto CVN la tenacidad del metal base es mayor que la del metal de soldadura, mientras que en los ensayos de tenacidad CTOD el metal de soldadura ofrece una tenacidad mayor.

3. CLAYTON, *Desing of Welded Structures To Avoid Fracture and Plastic Collapse. Welding in the World, vol 32., Pergamon Press Ltd. pp 25-32. 1993.*

4. NEWBY, J.R. and COORD. *Metals Handbook. 9 Ed, vol. 8, Mechanical Testing, American Society for Metals. 1985. pp 265.*

Temperatura	Energía absorbida en ensayo de impacto CVN, J								
	°C	Metal base			Zona afectada por el calor			Metal de soldadura	
18	180	194	236	147	196	118	174	139	228
0	276	147	261	164	75	129	183	155	181
-10	13	75	256	168	138	114	106	177	38
-20	26	21	21	148	151	108	28	20	83
-30	15	25	11	25	29	27	36	28	23
-40	9	11	7	18	15	22	11	20	23

Cuadro 9. Datos de ensayos de impacto Charpy CVN en unión soldada de acero A572 G50.

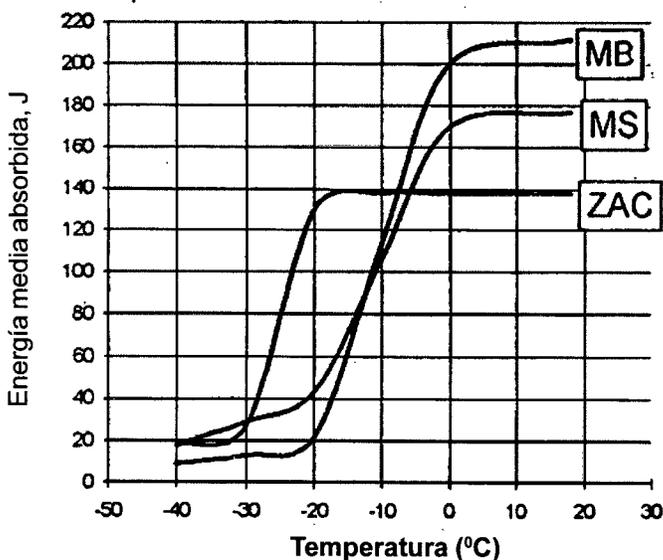


Figura 5. Curvas de transición en unión soldada de acero A572.

La falla se había iniciado desde tiempo atrás por un proceso progresivo de agrietamiento por fatiga en soldaduras asociadas a nudos de unión pendolón-arco, como son soldadura de platina atiesadora-platina inferior de arco, soldadura de unión pendolón-platina inferior de arco y soldadura de unión de platinas de arco. Este agrietamiento va reduciendo la capacidad de soporte de carga y la estabilidad del puente hasta cuando se da la condición de colapso final.

Por lo general, en las soldaduras de filete el agrietamiento se inicia en la raíz y en el pie de

soldadura. En la unión soldada de platina atiesadora-platina inferior de arco, donde la soldadura se aplica en tramos alternos intermitentes, los extremos de estos tramos son sitios propicios de iniciación de grietas de fatiga.

La falla final en los sitios con preagrietamiento se presenta por colapso plástico. En la soldadura de falla de unión pendolón-platina inferior de arco, se encuentra que una propagación transversal de grieta en la platina inferior del arco cambia súbitamente a una propagación inestable de grieta en dirección longitudinal, al encontrar al frente de grieta una discontinuidad metalúrgica, la cual según se determinó, se trata de una segregación de carbono.

Por lo general, cuando una grieta crece en la estructura de un puente se reduce la resistencia residual; es decir, se reduce la capacidad de soporte de carga de éste (figura 6), de manera que se puede presentar una falla eventual cuando una grieta ha crecido tanto que la resistencia residual disminuye hasta tal punto que la estructura no puede soportar una carga accidentalmente elevada. Si esta carga accidentalmente elevada no se presenta, una grieta continúa creciendo hasta que la resistencia residual es tan baja que ocurre falla bajo la carga normal de servicio.

Como criterios generales de falla final en una sección con un proceso de agrietamiento por fatiga, se considera que una grieta puede crecer hasta tal magnitud que se presente una fractura con una

Temperatura de 40 J CVN, °C		
MB	ZAC	MS
-15	-28	-22

Cuadro 10. Temperatura correspondiente a una energía absorbida de 40 J en ensayo de impacto CVN, en unión soldada de acero A572 G50.

deformación plástica pequeña en el frente de grieta, o una falla por colapso plástico con una deformación plástica intensa en la sección residual resistente. La primera opción se presenta cuando la tenacidad de fractura es baja, lo que se favorece por una sección gruesa, una temperatura de operación baja y una rapidez de aplicación de carga elevada.

En estudios realizados de transición dúctil-frágil con ensayos de tenacidad de fractura CTOD, frecuentemente se emplea como nivel de referencia de transición un CTOD de 0,1 o 0,2 mm⁵.

En los ensayos de tenacidad de fractura en las diferentes zonas de las soldaduras se han encontrado valores de CTOD mayores de 0,2 mm. Por otra parte, según los ensayos de impacto Charpy, la temperatura de servicio se encuentra bien por encima de la temperatura de transición de 40 J. Según estos resultados, las condiciones de funcionamiento favorecen la falla final por colapso plástico.

A mayor tenacidad de fractura es mayor el tamaño de grieta tolerable, como lo muestra las relaciones de la curva de diseño CTOD (apéndice B); luego en el metal de soldadura se pueden detectar con mayor facilidad grietas de tamaño subcrítico, debido a que en esta zona se tiene una tenacidad CTOD mayor que en el metal base y la zona afectada por el calor.

Los pendolones se han construido con perfiles estructurales de acero A36, mientras que los componentes del arco se han construido con platina de acero A572. Confrontando las propiedades mecánicas de estos dos aceros, cuadro 11, se

5. DOLBY, R.E. *Cod Charpy v Test Data Correlation: Ferritic Steel Weld Metals. The Welding Institute, 1981.*

encuentra que en tensión las propiedades del acero A572 G50 son ligeramente superiores a las propiedades del acero A36, pero en cuanto a tenacidad de fractura CTOD el acero A36 presenta un valor mucho menor que el acero A572, lo cual significa que el acero A36 tiene una menor tolerancia a la presencia de grietas.

Si se considera que el número de ciclos total de falla de un componente estructural que soporta una carga de fatiga corresponde a un número de ciclos de iniciación de una grieta más un número de ciclos de crecimiento de dicha grieta al tamaño crítico, en una soldadura con defectos severos, como socavaciones tipo grieta, reducen significativamente la vida de falla, que prácticamente se puede eliminar el número de ciclos de iniciación de grieta. Por tanto, en la fabricación se puede mejorar el desempeño a fatiga eliminando socavaciones en pie de soldadura y eliminando discontinuidades de falta de penetración de soldadura.

En cuanto a severidad de defecto, las porosidades encontradas en la raíz de las soldaduras de filete se considera que no desempeñan un papel importante en la falla, debido a que existe una discontinuidad más severa: la penetración incompleta de soldadura.

Es importante tener en cuenta que cuando en una soldadura se encuentran defectos tipo grieta, un aumento de la resistencia de los materiales puede no conducir a un aumento significativo de la vida de la estructura, porque ésta es controlada por la rapidez de crecimiento de grieta. También se debe tener en cuenta que esfuerzos secundarios excesivos, como esfuerzos residuales de soldadura y esfuerzos inducidos por desalineamiento, pueden estar contribuyendo a que se presente una falla prematura.

Ante una latente posibilidad de iniciación y propagación de grietas en estructuras de puentes con diseño similar a este caso, como una medida preventiva de colapso final se recomienda realizar inspecciones periódicas empleando métodos no destructivos para detectar grietas de tamaño subcrítico y así tomar las medidas correctivas oportunamente. Cuanto más pequeño sea el tamaño mínimo detectable, mayor puede ser el período de inspección, porque en teoría se considera que el tiempo disponible para detectar una grieta es el

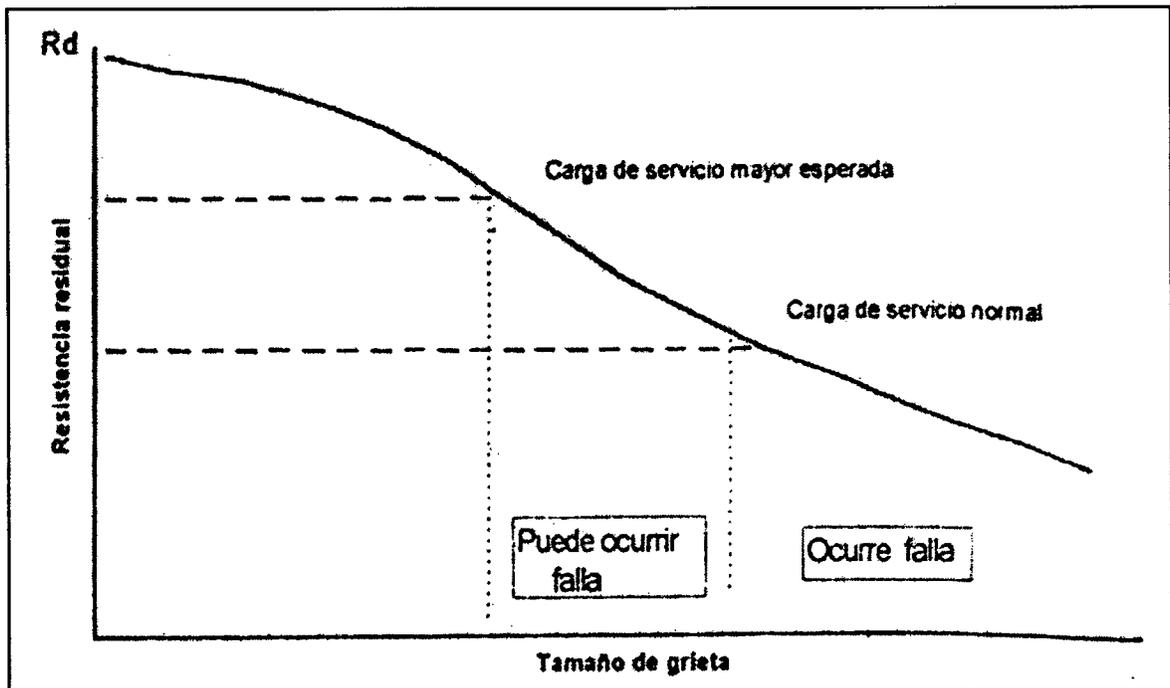


Figura 6. Representación esquemática de curva de resistencia residual. R_d = resistencia de diseño.

tiempo (número de ciclos de carga) que ha de transcurrir para que una grieta de un tamaño detectable crezca a un tamaño crítico de colapso final (figura 7).

Las grietas que se desarrollan en la soldadura de unión de platina atiesadora-platina inferior de arco son difíciles de detectar por falta de accesibilidad de inspección, ya que esta soldadura se encuentra dentro del cajón del arco en la parte inferior de éste.

Especificación	Propiedades en tensión**		Tenacidad de fractura	
	Resistencia a fluencia kgf/mm ²	Resistencia a tensión kgf/mm ²	Alargamiento en 50 mm %	CTOD [*] mm
A572 G50	44	58	22	0.3615
A36	38	52	20	0.1349

* valor promedio de tres ensayos, espesor de ensayo 10 mm.

** probeta cilíndrica de ϕ 6 mm.

Cuadro 11. Combinación de propiedades mecánicas de resistencia y tenacidad de los aceros empleados en la construcción del puente.

Apéndice A.

Ensayo de tenacidad de fractura CTOD, Norma ASTM E1290

Se emplea una configuración de ensayo de flexión en tres puntos [SE(B)] como se indica en la figura 8, con probeta de sección rectangular de espesor $B=10$ mm y ancho $W=20$ mm, con una grieta central pasante de ensayo, generada por fatiga, en el centro de la longitud entre extremos de carga de magnitud que varía entre $0,45W$ y $0,55W$. La longitud entre extremos de cargas es $L=4W$

Mediante el empleo de deformímetros eléctricos se obtiene un diagrama autográfico de fuerza aplicada P contra desplazamiento entre superficies de grieta medido en la boca de ésta V , como se indica en la figura 9. El ensayo se lleva hasta el primer punto de carga máxima.

En este trabajo se determina la tenacidad de fractura CTOD como desplazamiento entre superficies de grieta en la punta de ésta, correspondiente al primer punto de carga máxima P_m . Para esto es necesario cuantificar la componente de desplazamiento plástico en la boca de la grieta, para lo cual se traza una paralela a la trayectoria lineal elástica inicial a partir del primer punto de carga máxima hasta encontrar el eje de desplazamiento; en este punto de intercepción queda determinada dicha componente de desplazamiento plástico, V_p (ver diagrama ilustrativo de ensayos de tenacidad).

La abertura en la punta original de grieta de ensayo (CTOD) para la carga máxima de ensayo, δ_m se desglosa como:

$$\delta_m = \delta_e + \delta_p$$

δ_e es el componente elástico del CTOD y δ_p es el componente plástico del CTOD, los cuales respectivamente se calculan así:

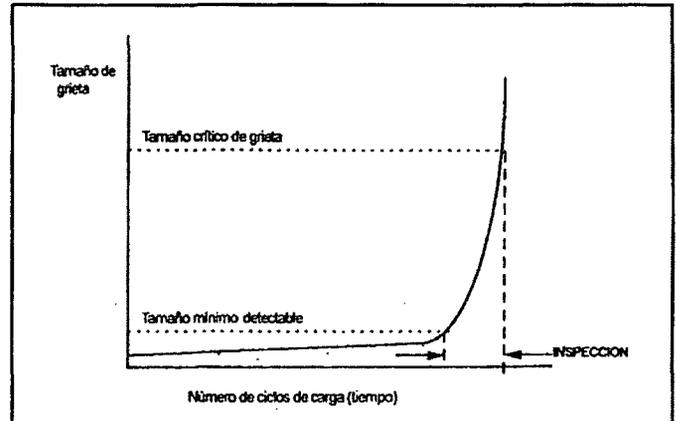


Figura 7. Representación esquemática de crecimiento de grieta por fatiga. A medida que aumenta el tamaño de grieta, aumenta la rapidez de ésta.

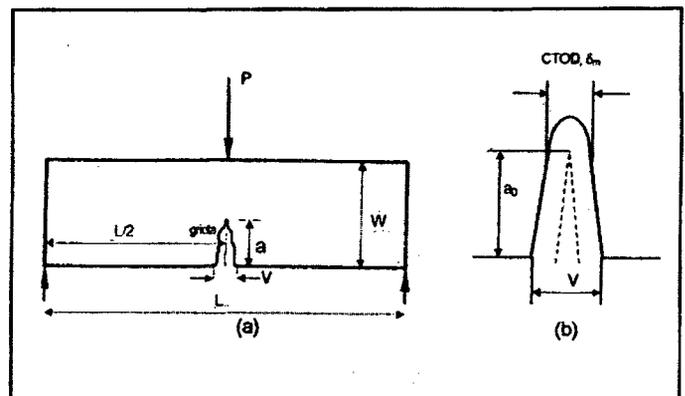


Figura 8 Configuración ensayo de tenacidad de fractura CTOD.

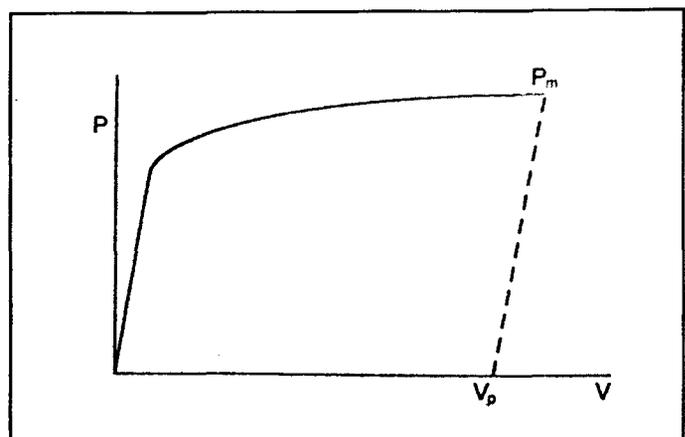


Figura 9. Diagrama de carga-desplazamiento en ensayo de tenacidad.

6. Standard Test Method for Crack - Tip Opening Displacement CTOD Fracture Toughness Measurement. E 1290, ASTM Standards. Vol 03. 01, 1989.

$$\delta e = \frac{K_m^2(1-\nu^2)}{2\sigma_y E}$$

$$\delta p = \frac{0,4(W - a_o)V_p}{0,4W + 0,6a_o + z}$$

Donde: K_m = factor de intensidad de esfuerzo correspondiente a la carga P_m ,

$$K_m = YP_m / [B W^{3/2}].$$

Y = coeficiente de intensidad de esfuerzo

$$Y = f(a_o/W).$$

ν = relación de Poisson.

σ_y = resistencia a fluencia

E = módulo de elasticidad.

a_o = tamaño original de grieta.

z = distancia del punto de medida del desplazamiento de abertura de grieta la superficie de boca de grieta en la probeta de ensayo.

Por ejemplo, si se considera la probeta PS2 de metal de soldadura de acero A572, se tiene que:

$$E = 20000 \text{ kgf/mm}^2 \quad \nu = 0,28 \quad \sigma_y = 46,7 \text{ kgf/mm}^2 \quad B = 10 \text{ mm} \quad W = 20 \text{ mm} \quad Z = 2 \text{ mm}$$

Se toman tres lecturas de tamaño de grieta, de manera que: $a_o = (9,79 + 9,99 + 9,96)/3 = 9,91 \text{ mm}$.

Del diagrama de ensayo de tenacidad de fractura PS2, $P_m = 1163 \text{ kgf}$ y $V_p = 3,61 \text{ mm}$.

Para $a_o/W = 9,91/20 = 0,496$, del cuadro 1 de la especificación ASTM E 1290, $Y = 10,48$

$$\text{Luego } K = 10,48 * 1162 / [10 * (20)^{3/2}] = 272,5 \text{ kgf/mm}^{3/2}$$

$$\delta e = \frac{272,5^2 (1-0,28^2)}{2 * 46,7 * 20.000} = 0,0366 \text{ mm} \quad \text{y} \quad \delta p = \frac{0,4 (20 - 9,91) * 3,61}{0,4 * 20 + 0,6 * 9,91 + 2} = 0,9137 \text{ mm}$$

Entonces, la tenacidad de fractura CTOD, $\delta_m = 0,0366 + 0,9137 = 0,9503 \text{ mm}$

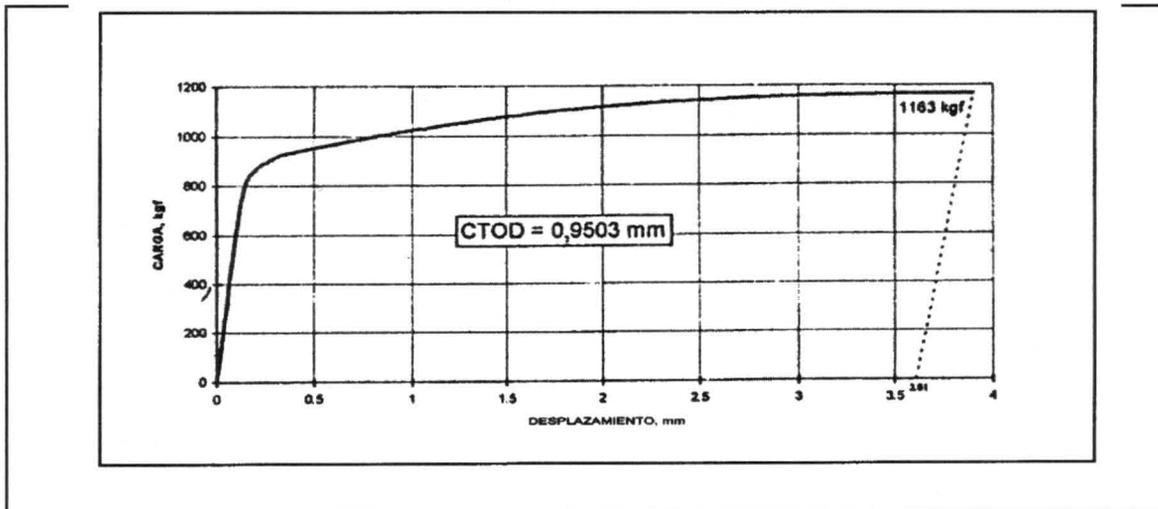


Figura 10. Diagrama de ensayo de tenacidad CTOD PS2.

Tabla de cálculo de tenacidad de fractura CTOD de unión soldada de acero
ASTM A572

	PS1 ^a	PZ1 ^b	PB1 ^c	PS2	PZ2	PB2	PS3	PZ3	PB3
P, kgf	825,4	943,8	639,1	11,63	931	608,7	930,2	869,8	577,5
V _p , mm	3,77	2,57	1,25	3,61	2,68	1,43	3,87	2	1,66
a ₀ , mm	11,45	10,31	10,4	9,91	10,3	10,53	10,65	10,37	10,57
a ₀ /W	0,573	0,516	0,52	0,496	0,515	0,526	0,533	0,518	0,528
Y	13,62	11,18	11,33	10,48	11,14	11,56	11,83	11,25	11,64
K, kgf/mm ^{3/2}	251,38	235,94	161,91	272,5	231,9	157,1	246,1	218,8	150,3
σ _{ys} , kgf/mm ²	46,7	39,15	31,6	46,7	39,15	31,6	46,7	39,15	31,6
δ _e , mm	0,0312	0,0328	0,02	0,0366	0,0316	0,018	0,0299	0,0282	0,0165
δ _p , mm	0,7643	0,6154	0,2956	0,9137	0,6235	0,3316	0,8831	0,4749	0,3832
δ _m , mm	0,7955	0,6482	0,3156	0,9503	0,6551	0,3692	0,913	0,5031	0,3997

^a Metal de soldadura

^b Zona afectada por el calor

^c Metal base

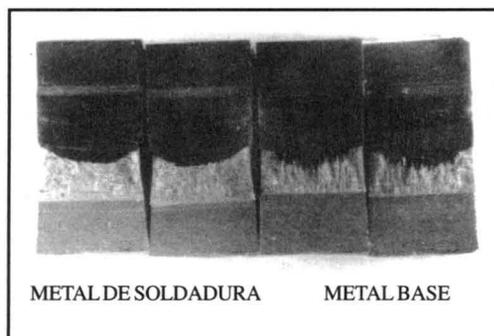


Figura 11. Fracturas de ensayos de tenacidad CTOD.

Apéndice B.

Con base en un trabajo semiempírico realizado por Dawes en el Instituto de Soldadura Británico se ha establecido que el tamaño máximo equivalente de defecto tipo grieta tolerable es dado por⁷.

$$\bar{a}_{\max} = \frac{\delta_c E}{2\pi (\sigma_1/\sigma_{ys})^2 \sigma_{ys}} \quad \text{Para } \sigma_1/\sigma_{ys} \leq 0,5$$

$$\bar{a}_{\max} = \frac{\delta_c E}{2\pi (\sigma_1/\sigma_{ys} - 0,25) \sigma_{ys}} \quad \text{Para } \sigma_1/\sigma_{ys} > 0,5$$

Donde: \bar{a}_{\max} = tamaño de grieta aceptable.

σ_1 = esfuerzo total aplicado calculado en la vecindad de grieta sin tener en cuenta la existencia de ésta.

Apéndice C.

Tenacidad de fractura y propiedades en tensión de unión soldada de acero A36.

Tenacidad de fractura CTOD^c · mm

Especificación	Metal base				Zona afectada por el calor				Metal de soldadura			
A 36 [AS] ^a	0,1184	0,1578	0,1285	0,1349*	0,1975	0,3041	0,2071	0,2362*	0,6544	0,7284	0,803	0,7286*
A 36 [AM] ^b	0,1184	0,1578	0,1285	0,1349*	0,1946	0,4001	0,235	0,2766*	0,8769	0,9782	1,296	1,05*

valor promedio

^a arco sumergido

^b arco manual

^c espesor de ensayo 10 mm

Propiedades mecánicas en tensión de unión soldada de acero A36

	Unión Soldada ^a	Metal base ^d			Metal de soldadura ^d		
		Resistencia a fluencia (kgf/mm ²)	Resistencia a tensión (kgf/mm ²)	Alargamiento en 50 mm (%)	Resistencia a fluencia (kgf/mm ²)	Resistencia a tensión (kgf/mm ²)	Alargamiento en 50 mm (%)
[AM] ^b	48	41	55	18	45	55	18
[AS] ^b	47	35	49	22	39	52	21

^a arco manual

^b arco sumergido

^c falla por el metal base

^d probeta cilíndrica de f 6 mm

^e probeta plana

7. BS PD 6493. Guidance on some methods for the derivation of acceptance levels for defects in fusion welded joints. British Standards Institution. 1980.

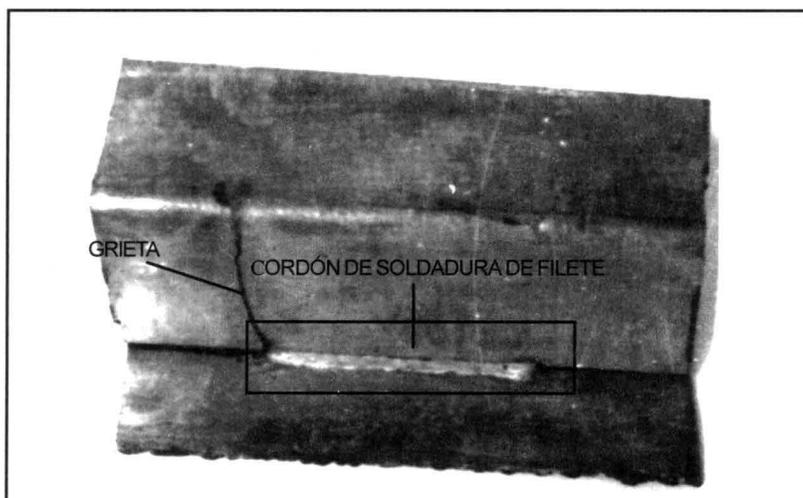
Apéndice D

Composición química en unión soldada de acero A572 G50 y de acero A36

Elemento	ASTM A572 G50		ASTM A 36
	MB (%)	MS(%)	MB (%)
C	0,15	0,08	0,141
Si	0,14	0,5	0,05
Mn	0,82	1,1	0,56
P	0,023	0,023	> 0,053
S	0,011	0,019	0,039
Cr	0,03	0,03	0,00
Ni	0,03	0,05	0,04
Co	0,0002	0,02	0,02
V	0,003	0,01	0,00
Mo	0,01	0,013	0,01
W	0	0,0016	0,00
Cu	0,011	0,053	0,01
Ti	0	0,008	0,00
Al	< 0,012	< 0,012	<0,012
Nb	0,0043	0,0043	0,002
B	0,0002	0,0002	0,0003

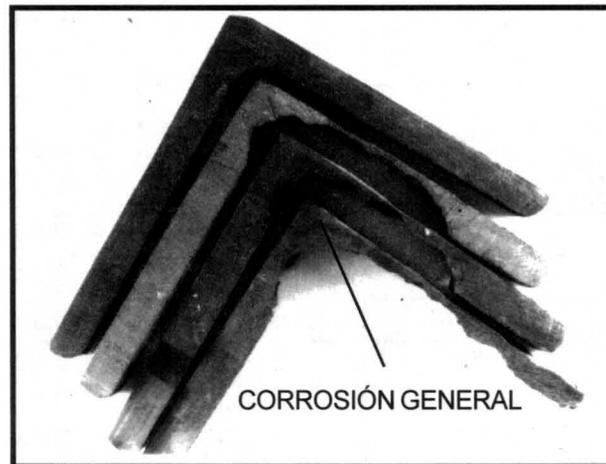
Apéndice E.

Grieta en viga de piso de puente móvil, la cual se inicia en extremo de cordón de soldadura de filete intermitente.



Apéndice F

Reducción de sección resistente por corrosión en perfil estructural del puente Purnio.



Apéndice G

Microdureza en microconstituyente de unión soldada de platina atiesadora-platina inferior de arco.

Microdureza KNOOP 50 gf			
MB	219 (F+P)	256 (F + P)	182 (F)
ZAC	355 (GG)	221 (GF)	234 (TP)
	263 (GG)	220 (GF)	204 (TP)
	263 (GG)	227 (GF)	210 (TP)
MS	319 (FA)	302 (FSA)	293 (FBG/FA)
	321 (FA)	289 (FBG)	330 (FSA)
	319 (FA)		

F = ferrita. P= perlita. GG= grano grueso. GF= grano fino. TP= transformación parcial. FA= ferrita acicular. FSA = ferrita con segunda fase alineada. FBG = ferrita en borde de grano.