Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riiit.com.mx

Diagramas de fallas de un aluminio laminado y uno fabricado por metalurgia de polvos

Failure diagram of a Rolled Aluminum and one manufactured by Powder Metallurgy

Cruz-González, C.E.[1], Banderas-Hernández, J.A.[1], Salgado-López, J.M.[1], Martínez-Franco, E.[1], Guzmán-Flores, I.[2]*

[1] Dirección de Ingeniería de Manufactura. Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI). Playa Pie de la Cuesta No. 702. Desarrollo Hab. San Pablo. Qro. Qro.
[2] Facultad de Sistemas UAdeC. Ciudad Universitaria, Fundadores Km 13, Zona Centro, 25350 Arteaga, Coah.
ecruz@cidesi.edu.mx; abanderas@cidesi.edu.mx; msalgado@cidesi.edu.mx; enrique.martinez@cidesi.edu.mx; isidroguzman@uadec.edu.mx*

Innovación tecnológica: El empleo de técnicas FFS en un análisis teórico comparativo del tipo de falla sobre materiales laminados y polvos para apoyo al cálculo de esfuerzos en materiales nuevos, y con ello dar una herramienta a los diseñadores para selección de materiales novedosos en aplicaciones y sus posibles riesgos.

Área de aplicación industrial: Petroquímica, estructuras, dispositivos médicos.

Recibido: 25 julio 2024
Aceptado: 23 diciembre 2024

Abstract

The application of fitness for service methodologies is very useful for obtaining complementary data when a new material will be substituted in a mechanical component. In this work, the FFS level 1 and 2 were performed for a theoretical pipe manufactured with conventionally produced aluminum produced by powder metallurgy plus high isostatic pressing process. They were compared at different operating pressures by means of their failure assessment diagrams and also their toughness and stresses. In addition, fractured material surfaces were observed by scanning electron microscopy as a way to explain the phenomenon. The results suggest that the materials strength and toughness have an important role in the reliability of mechanical components and that there is the need of standardized methodologies for supporting or reinforcing their design and/or manufacturing engineering calculations.

Keywords: Fitness for service, pipe, aluminum, fracture.

Resumen

La aplicación de metodologías de aptitud para servicio es de gran utilidad para la obtención de datos complementarios cuando se va a sustituir un nuevo material en un componente mecánico. En este trabajo se realizaron los FFS nivel 1 y 2 para una tubería teórica fabricada con aluminio producido de manera convencional y aluminio producido por metalurgia de polvos más proceso de prensado isostático alto. Se compararon a diferentes presiones operativas mediante sus diagramas de evaluación de fallas y también, su tenacidad y esfuerzos. Además, se observaron las superficies de fractura del material mediante microscopía electrónica de barrido como forma de explicar el fenómeno. Los resultados sugieren que la resistencia y tenacidad de los materiales tienen un papel importante en la confiabilidad de los componentes mecánicos y que existe la necesidad de metodologías normalizadas para sustentar o reforzar sus cálculos de ingeniería de diseño y/o manufactura.

Palabras clave: Aptitud para el servicio, tubo, aluminio, fractura.

1.0 Introducción

Una máxima de la ingeniería de confiabilidad es que todo componente eventualmente fallará; esto puede ocurrir en diferentes tiempos. En ese sentido se han establecido metodologías de diseño y de confiabilidad, así como asegurar la operación segura de los equipos en cuestión. Algunas de esas metodologías son las denominadas: aptitud para el servicio (APS), aptitud para el propósito (APP), o análisis crítico de ingeniería (ACI), que involucran diversas ramas de la ingeniería (BS7910. Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures, 2019) y por ultimo la (API/ASME 579. Fitness-For-Service Evaluation, 2021).

Éstas se realizan sobre elementos con defectos presentes, tales como: grietas, inclusiones, laminaciones, fusión incompleta, picaduras por corrosión, etc. Dichas metodologías incluyen falla/daño, considerando daño como fatiga, corrosión y colapso plástico (Dowling, Hadley, & White, 2004).

Las metodologías APS aplican conceptos de mecánica de fractura y el uso del diagrama de evaluación de fallas (FAD) para dar luz en la confiabilidad de componentes con defectos. En ese sentido, (Macdonald, 2011), expone la aplicabilidad de esta metodología para estructuras y uniones soldadas de acero.

También (Milne, Ritchie, & Karihaloo, 2003), muestra la aplicabilidad de estas metodologías en daño por termofluencia. Por otro lado, (Aboalriha, 2021), realizó un FAD para uniones soldadas basadas en la metodología estipulada en (BS7910. Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures, 2019) y (DNV-RP-F108 Assessment of flaws in pipeline and riser girth welds, 2019 (2021)). Sus resultados sugieren que el esfuerzo acumulado genera valores de razón de carga (L_r) y razón de fractura (K_r) muy grandes, prediciendo fallas prematuras. Así mismo, los autores mencionan que la metodología FAD ayuda a predecir la falla final, siendo de gran ayuda para los diseñadores.

Una aplicación a materiales no metálicos, la publicaron (Cicero, Sánchez, Martínez-Mata, Arrieta, & Arroyo, 2022) realizando la evaluación de la integridad estructural de muestras con muescas de acrilonitrilo

butadieno estireno (ABS), ácido poli láctico (PLA) y PLA reforzado con grafeno fabricadas aditivamente (MA), las cuales combinan diagramas de evaluación de fallas y la teoría de distancias críticas.

Mediante el análisis de fractura (K_{mat}), y el cálculo de la relación K_r (K_I/K_{mat}), se emplearon predicciones de tenacidad a la fractura aparente (K_{Nmat}) derivados de la teoría de distancias críticas. Los resultados de esta investigación sugieren que la tenacidad a la fractura obtenida del análisis elástico-lineal da pie a resultados que puede tener diferencias muy significativas aún en su cumplimiento riguroso. (ASTM D5045. Standard Test Methods for Plane-Strain Fracture Toughness and Strain Energy Release Rate of Plastic Materials, 2014 (2022)) y del elástico-plástico (ASTM D6068. Standard Test Method for Determining J-R Curves of Plastic Materials, 2010 (2018)).

También los autores sugieren que la aplicación rigurosa de la (ASTM D6068. Standard Test Method for Determining J-R Curves of Plastic Materials, 2010 (2018)) sobreestima la resistencia a la fractura de los materiales bajo análisis. En contraste, el uso la (ASTM D5045. Standard Test Methods for Plane-Strain Fracture Toughness and Strain Energy Release Rate of Plastic Materials, 2014 (2022)) proporciona resultados robustos, conservadores y confiables al usar K_{mat}. Finalmente, el trabajo recomienda el uso de la metodología (ASTM D5045. Standard Test Methods for Plane-Strain Fracture Toughness and Strain Energy Release Rate of Plastic Materials, 2014 (2022)) para materiales ABS, PLA y PLA reforzado.

(Martínez, Cano, Salazar, & Rodrígiuez, 2022); publicaron un trabajo sobre la metodología del FAD en polímero de poliamida 12. Este polímero fue procesado mediante moldeo por inyección (IM) y sinterización selectiva por láser (SLS) y los primeros FAD determinados a partir de la ecuación esfuerzo-deformación de los termoplásticos ($\sigma = K\left(1 - e^{-\frac{\varepsilon}{\varepsilon_v}}\right)e^{h\varepsilon^2}\varepsilon^m$).

Para las muestras de IM, se empleó una temperatura de molde de 60 °C, 10 MPa de presión de inyección y 1500 N fuerza de sujeción. Por otro lado, las muestras de SLS fundieron partículas de 40-90µm a una temperatura de alrededor de 172 °C@125 W, generando espesores de capa de 0.2mm. Las probetas de hueso de perro y las de crecimiento de grieta (CTOD) se orientaron a 0 y 90° de la dirección de flujo. Los resultados sugieren que las muestras IM tienen una fuerte variación de K_r respecto al L_r.

En caso contrario, las muestras SLS no mostraron dependencia y se mantuvieron constantes. Finalmente, la orientación de la muestra jugó un papel importante ya que a 90° el resultado fue ligeramente superior al calculado con una orientación de 0. Lo anterior, sugiere un comportamiento más frágil debido a la débil fuerza adhesiva entre las capas.

Como puede notarse a partir de los párrafos anteriores, el FAD es una técnica muy útil para determinar la confiabilidad en estructuras soldadas de acero y se rige mediante normas muy establecidas. Adicionalmente, se puede inferir la reciente tendencia de su aplicación en materiales poliméricos para la MA o impresión tridimensional. En ese sentido, este tipo de ejercicio con estas metodologías no ha sido hecho en metales producidos por procesos de manufactura como la metalurgia de polvos, no puede ser ajenos a este tipo de evaluaciones para el desempeño. Por tal motivo, este trabajo pretende analizar la aplicación de esta metodología bajo un caso sencillo de estudio de diversos daños

generados sobre una estructura fabricada de aluminio laminado y otra de aluminio de manufactura de polvos (MP). Con ello, proporcionar al lector alternativas normalizadas para sustentar o reforzar sus cálculos de ingeniería de diseño y/o manufactura.

2.0 Materiales y métodos

2.1 Materiales

La información de los materiales empleados en este trabajo, se encuentra publicada por los autores en la siguiente referencia bibliográfica (Salgado-López, Martínez-Franco, Cruz-González, & Tello-Rico, 2023).

En ese sentido, la Tabla 1 muestra un resumen de las propiedades mecánicas obtenidas para estos materiales y que son empleadas en los cálculos de este trabajo. Para fines de simplificación, al aluminio del trabajo antes referenciado se le denominará AP, mientras que al aluminio de metalurgia de polvos se le denominará MP, más el resto de procesos, será AP+HIP por incluir el proceso de prensado isostático en caliente (HIP).

Entre las propiedades se puede apreciar la resistencia a la tensión, el esfuerzo de fluencia, la razón de fluencia ($Yr = \frac{Esfuerzo\ de\ fluencia\ al\ 0.2\%}{Resistencia\ a\ la\ tensión}$), elongación, el módulo de Young y la energía Charpy muesca en V (CVN).

Tabla 1. Resumen de las propiedades mecánicas empleadas en este estudio (Salgado-López, Martínez-Franco, Cruz-González, & Tello-Rico, 2023).

	Propiedades mecánicas					
Material	**Resistencia a la tensión (MPa)**	**Esfuerzo de fluencia al 0.2% (MPa)**	**Yr**	**Elongación (%)**	**Módulo de Young (MPa)**	**CVN (J)**
AP	80	58	0.73	64	49357	70
AP+HIP	100	61	0.61	30	55916	0.7

Como puede notarse de la Tabla 1, las propiedades de los aluminios mostrados son similares a las del aluminio 1100 según la siguiente referencia (Overview of materials for 1000 Series Aluminum, 2024). Lo anterior salvando diferencias en la CVN, sobre todo en la AP+HIP, cuya tenacidad es sensiblemente baja al compararse con la muestra AP.

2.2 Metodología para construcción de los FAD

Para la generación de los FAD para este trabajo, se empleará la metodología estipulada para los niveles uno y dos de la norma (BS7910. Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures, 2019). En primera instancia se empleará el flujograma mostrado en la Figura 1 de este documento.

Como puede apreciarse en la Figura 1, ésta incluye los puntos de la norma BS7910 aplicable para referencia del lector.

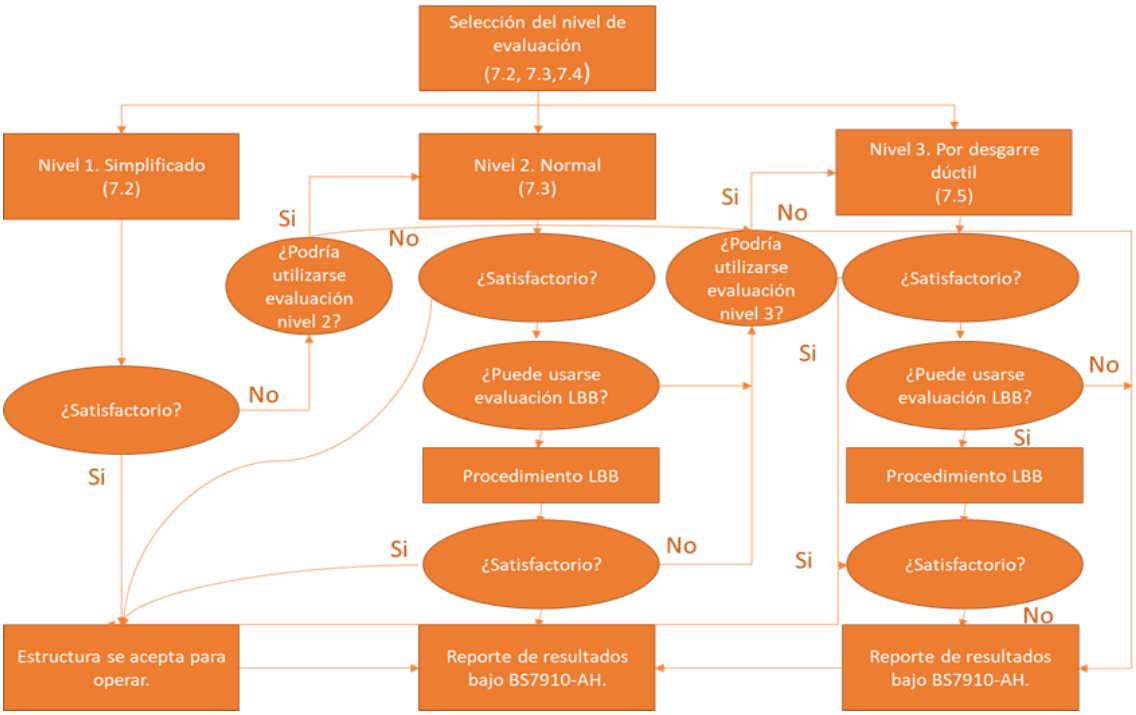


Figura 1. Flujograma de general para evaluación bajo (BS7910. Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures, 2019).

La selección del nivel dependerá de los materiales involucrados, así como de los datos disponibles para el análisis; en ese sentido, el nivel uno es el más básico y se emplea cuando se tiene información limitada sobre las propiedades de los materiales.

Por otro lado, el nivel dos es considerado la ruta de evaluación normal e involucra la curva esfuerzo-deformación del material bajo análisis. Finalmente, el nivel tres es el empleado en materiales dúctiles y se basa en la resistencia al desgarre.

2.3 Evaluación nivel uno

Para la evaluación del nivel uno es necesario definir el esfuerzo aplicado sobre el componente. En ese sentido, la consideración del tipo de componente un tubo de 30m de largo cuyo diámetro interno (Di) es 600mm y 10mm de espesor de pared; éste será sometido a una presión de 15MPa y un par torsional de 2.0×10^{6} N-m. Para esta suposición se emplearán las propiedades especificadas en la Tabla 1.

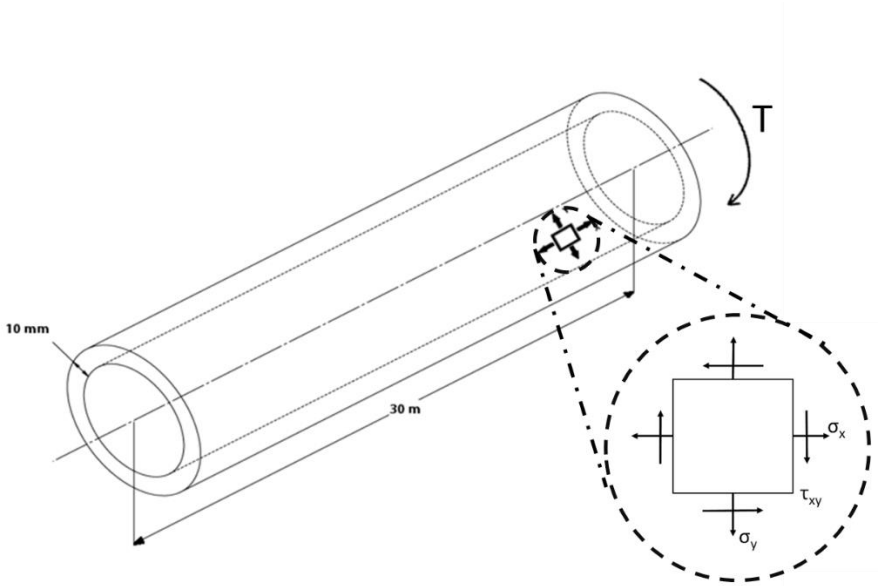


Figura 2. Esquema de tubo bajo análisis.
Fuente: CIDESI.

La Figura 2 muestra el tubo y los componentes de esfuerzo con su elemento diferencial, posteriormente se realizó el cálculo de K_{mat} derivado de los resultados de CVN siguiendo el procedimiento estipulado en el anexo J de la BS7910.

Lo anterior se muestra en la ecuación 1 de este documento; para este caso en particular, se considera una longitud de daño superficial de 2c=5mm y una profundidad de a=1.5mm (ver Figura 3).

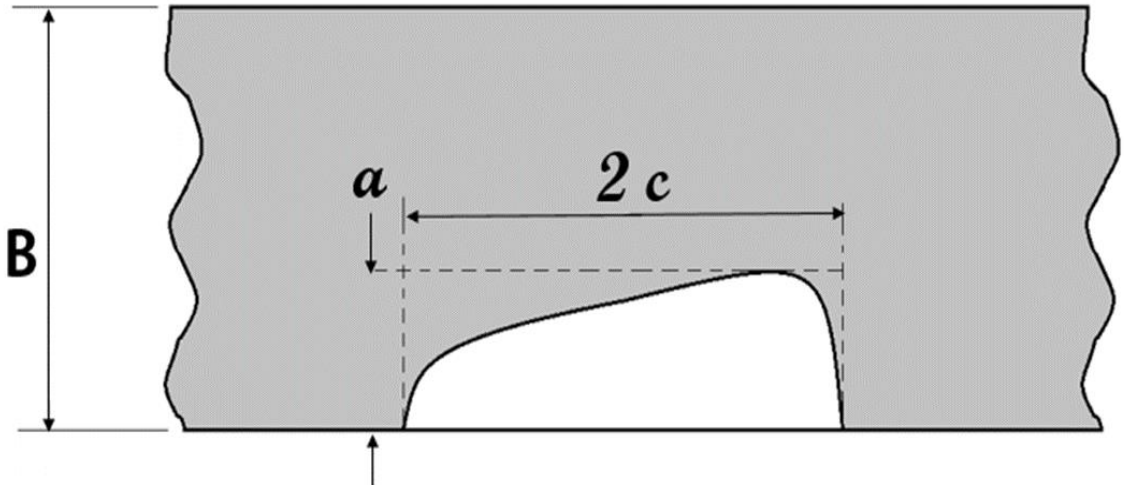


Figura 3. Esquema de daño idealizado empleado en estos cálculos.
Fuente: CIDESI.

$$K_{mat} = \frac{820\sqrt{CVN} - 1420}{B^{1/4}} + 630 \qquad \textbf{Ec. 1}$$

Donde:
Kmat= Tenacidad a la fractura, $N.mm^{-3/2}$
CVN= Valor Charpy a la temperatura de ensayo, J.
B= Ancho de la zona donde se extrajeron las probetas, mm.

Una vez definida la K_{mat} y el daño, se procede a calcular S_r y K_r con base en las formulas 2, 3 y 4 mostradas a continuación:

$$S_r = \frac{\sigma_{ref}}{\sigma_f} \quad \textbf{Ec. 2}$$

Donde:
S_r= Razón de esfuerzo.
σ_{ref}= Es el esfuerzo de referencia derivado de la solución de esfuerzo del anexo P de BS7910 en MPa.
σ_f= Es el esfuerzo de flujo que es la media aritmética entre la resistencia a la tensión y el esfuerzo de fluencia de los materiales (hasta 1.2 veces el esfuerzo de fluencia) en MPa.

$$K_I = (Y\sigma)\sqrt{(\pi a)} \quad \textbf{Ec. 3}$$

Donde:
K_I= Factor de concentración de esfuerzos en $N.mm^{-3/2}$.
a= Profundidad del daño en mm.
$Y\sigma = Mf_wM_m\ \sigma_{max}$ en $N.mm^{-3/2}$ (MPa).
M y f_w= factores de corrección por pandeo.
Mm= Factor de intensidad de esfuerzo.
σ_{max}= Esfuerzo de tensión en MPa.

$$K_r = \frac{K_I}{K_{mat}} \quad \textbf{Ec. 4}$$

Finalmente, se graficaron los resultados L_r vs K_r para cada material en el diagrama FAD simplificado y se evaluó la tolerancia al daño que los niveles de esfuerzo-propiedades de los materiales generaron.

2.4 Evaluación nivel dos

La evaluación nivel dos es similar a la del nivel uno, pero aquí Kr se calcula a partir de la curva esfuerzo-deformación de cada material específico. Además, las razones de esfuerzo para cada Lr se calculan a intervalos de 0.1~1.2; en ese sentido, la ecuación 5 se emplea en el cálculo de la línea de evaluación de $L_r \leq L_{rmax}$.

$$K_r = \left(\frac{E\varepsilon_{ref}}{L_r\sigma_y} + \frac{L_r^3\sigma_y}{2E\varepsilon_{ref}}\right)^{-0.5} \quad \textbf{Ec. 5}$$

Donde:
ε_{ref}= Deformación verdadera (puede utilizarse la de ingeniería).
E= Módulo de Young en MPa.
L_r= Razón de carga.

Finalmente, una vez calculado lo anterior, se procede a realizar los cálculos de Kr y Lr; así como la evaluación de la tolerancia de la falla. Cabe mencionar que estos cálculos son más extensos para este nivel en comparación con el nivel uno, esto debido a que se involucran los resultados de esfuerzo-deformación a diversos niveles de esfuerzo. El K_I se calculará mediante la ecuación 6-8 y posteriormente se evaluará el daño.

$$Y\sigma = (Y\sigma)_p + (Y\sigma)_s \quad \textbf{Ec. 6}$$

$$(Y\sigma)_p = Mf_w[k_{tm}M_{km}M_mP_m + k_{tb}M_{kb}M_b\{P_b + (k_m - 1)P_m\}] \quad \textbf{Ec. 7}$$

$$(Y\sigma)_s = M_mQ_m + M_bQ_b \quad \textbf{Ec. 8}$$

Donde:
$(Y\sigma)_p$= Contribución del esfuerzo primario.
$(Y\sigma)_s$= Contribución del esfuerzo secundario.

2.5 Observaciones sobre la superficie de fractura

Con la finalidad de proporcionar al lector información complementaria, se realizó el análisis de las muestras fracturadas expuestas

en la referencia (Salgado-López, Martínez-Franco, Cruz-González, & Tello-Rico, 2023) con observaciones de microscopía electrónica de barrido (SEM). Las observaciones, se realizaron mediante electrones secundarios (SEI) en un microscopio JEOL, a 15KV de potencia y rango de 100~1000x. Lo anterior, sobre la superficie de las probetas de tensión y CVN AP y AP-HIP.

3.0 Resultados

3.1. Evaluación del daño mediante FAD simplificado

El primer paso para la evaluación de la tolerancia al daño consistió en el cálculo de los esfuerzos a los que está sometido el tubo de la Figura 2; como puede notarse en ésta, existen componentes de esfuerzo normal en σ_x, σ_y, cortante τ_{xy} (generado por el par torsional). Los cálculos de esfuerzo se realizaron como expone (Dowling N. E., 2013) en su obra, y posteriormente definidos bajo el estándar BS7910. Para este ejercicio, no debe perderse de vista que es un ejemplo ilustrativo, por lo que las ecuaciones empleadas son conservadoras. Existen cálculos estipulados en códigos como "ASME B31.3" que proporcionan ecuaciones más rigurosas (cilindros de pared gruesa). A continuación se exponen los cálculos de ingeniería:

$$\sigma_x = \frac{Pr_i}{2t} = \frac{15 \times 30}{2 \times 10} = 22.5MPa$$

$$\sigma_y = \frac{Pr_i}{t} = \frac{15 \times 30}{10} = 45MPa$$

$$r_{average} = \frac{r_1 + r_2}{2} = \frac{30 + 40}{2} = 35mm$$

$$I = t\pi r_{average}^3 = 10 \times \pi \times 35^3 = 1346961mm^4$$

$$J = 2I = 2693922mm^4$$

$$\tau_{xy} = \frac{T_{average}}{J} = \frac{2000000}{2693922} = 0.74MPa$$

Por lo tanto, los esfuerzos principales para este ejemplo didáctico se calcularon como sigue:

$$\sigma_1, \sigma_2 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} = \frac{23 + 45}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{23 - 45}{2}\right)^2 + 0.74^2} = 34 \pm 11$$

σ_1=45MPa, σ_2=22.5MPa.

$$\tau_{max} = máx\left\{\frac{|\sigma_2 - \sigma_3|}{2}, \frac{|\sigma_1 - \sigma_3|}{2}, \frac{|\sigma_1 - \sigma_2|}{2}\right\} = \left\{\frac{|23 - 0|}{2}, \frac{|45 - 0|}{2}, \frac{|45 - 23|}{2}\right\}$$

τ_{max}=22.5MPa.

Una vez calculados los esfuerzos se procede a la caracterización de la grieta, ésta como se mencionó en la sección 2, se clasifica bajo el concepto de grieta superficial; por lo tanto, la extensión o longitud será clasificada como 2c y la profundidad como a (ver Figura 8 BS7910). De la ecuación 2 se calculó S_r, donde el σ_{ref} se obtuvo del anexo P de la BS7910, el cual se clasificó como defecto externo orientado axialmente (Figura M.20 de BS7910). Por lo tanto, la ecuación 6 muestra el resultado de dicho cálculo y el posterior S_r; la ecuación 8 muestra el cálculo de a" derivado de $W \geq 2(c+B) = 600mm \geq 2(2.5mm + 10mm)$.

$$\sigma_{ref} = 1.2M_s P_m + \frac{3P_b}{3\left(1 - a''\right)^2} = 1.2 \times 1.0 \times 45 + \frac{3 \times 23}{3(1 - 0.015)^2} = 78MPa \qquad \textbf{Ec. 9}$$

$$M_s = \frac{1 - \left\{\left(\frac{a}{BM_T}\right)\right\}}{1 - \left(\frac{a}{B}\right)} = \frac{1 - 0.074}{1 - 0.075} \approx 1.0 \qquad \textbf{Ec. 10}$$

$$a'' = \frac{\frac{a}{B}}{\left\{1+\left(\frac{B}{c}\right)\right\}} = \frac{\left(\frac{0.75}{10}\right)}{\left\{1+\left(\frac{10}{2.5}\right)\right\}} = 0.015 \quad \textbf{Ec. 11}$$

$$M_T = \sqrt{1 + 1.6\left(\frac{c^2}{r_i B}\right)} = \sqrt{1 + 1.6(0.021)} = 1.02 \quad \textbf{Ec. 12}$$

$$S_{rAP} = \frac{78}{\frac{80+58}{2}} = 1.13$$

$$S_{rAP+HIP} = \frac{78}{\frac{100+61}{2}} = 0.96$$

Para el cálculo de Kr se procedió a calcular K_{mat} derivado de la ecuación 1 donde K_{mat}, para el AP, fue de 3713N.mm$^{-3/2}$; mientras que para el aluminio AP+HIP resulto 240N.mm$^{-3/2}$. Por otro lado, K_I se calculó empleando la ecuación 3 y los factores estipulados en el anexo M de la BS7910; los valores de f_w=M=1.0 y el valor de M_m=1.106 considerando valores a/c=0.2 y B/Ri=0.25. Por lo tanto K_{IAP}=136MPa, mientras que $K_{IAP+HIP}$=170MPa, lo que genera valores de 0.04 para el AP y 0.6 para AP+HIP. En ese sentido, se procedió a evaluar los daños sobre el componente encontrando que el AP está dentro de la zona segura (ver punto gris) aunque limítrofe. La muestra AP+HIP, fallaría por colapso plástico y tenacidad al incrementar la presión al mismo nivel de daño, es notorio que incrementa la probabilidad de falla por colapso plástico (AP) y colapso plástico-tenacidad para AP-HIP. La Figura 4, muestra el FAD nivel uno para este ejercicio a diversos niveles de presión (10,15, 20 y 25 MPa).

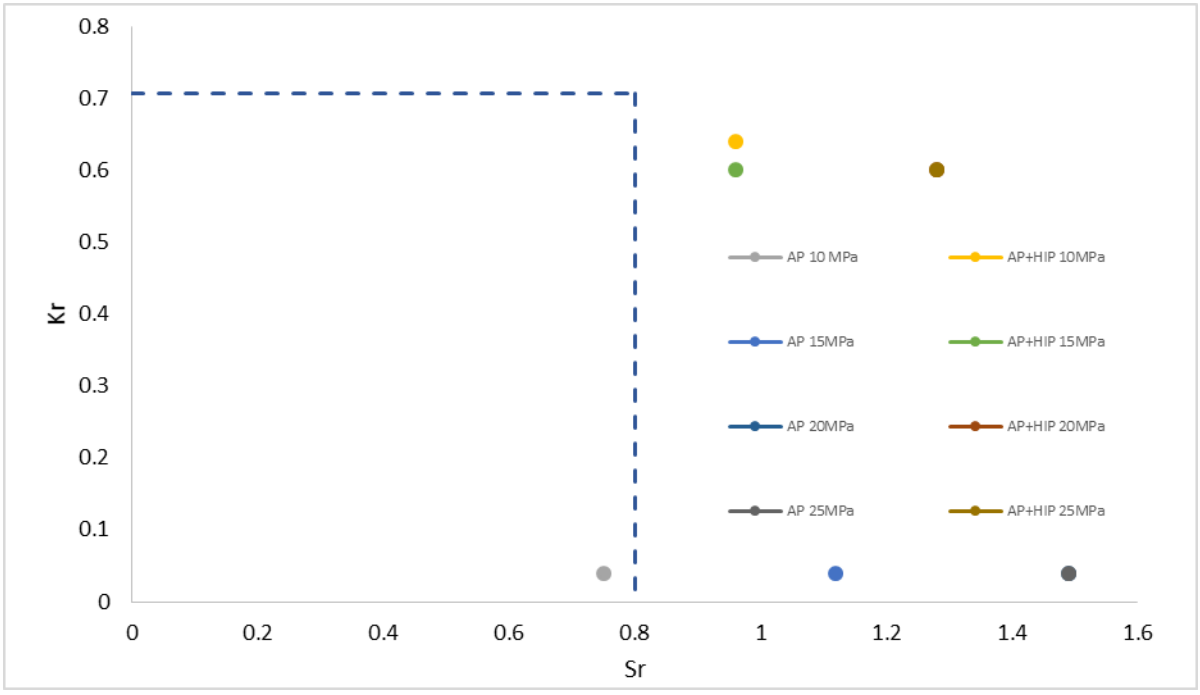


Figura 4. *FAD para nivel uno de las muestras AP y AP+HIP a diversos niveles de presión.*

3.2. Evaluación del daño mediante FAD nivel dos

Dado que el resultado del nivel uno es limítrofe, para AP es menester realizar un análisis nivel dos (ver Figura 1) con la finalidad de evaluar bajo las propiedades mecánicas específicas de estos materiales. Así, mediante la aplicación de la ecuación 5

sobre las curvas esfuerzo-deformación de cada material (AP y AP+HIP), se construyó los diagramas FAD mostrado en la Figura 4. Para el cálculo de L_r se sustituyó el promedio entre los esfuerzos de fluencia/resistencia a la tensión y el esfuerzo de referencia ahora para el nivel dos como se muestra a continuación:

$$L_{rAP} = \frac{78}{58} = 1.34$$
$$L_{rAP+HIP} = \frac{78}{61} = 1.30$$

El valor L_{rmax} se calculará con base en la ecuación $L_{rmax} = \frac{\sigma_y + \sigma_u}{2\sigma_y}$ donde de la Tabla 1 se obtienen los valores de resistencia a la tensión (σ_u) y esfuerzo de fluencia (σ_y). Por lo tanto, el cálculo arroja los máximos siguientes: L_{rmaxAP}=1.19 y $L_{rmaxAP+HIP}$=1.32. El siguiente paso es el cálculo de K_I como se especifica en el punto 2.4.

M=f_w=1
Mm=1.122
Mb=1.122

Para este caso hipotético no se considera que las fallas estén cerca de una zona de concentración de esfuerzo, por lo tanto: M_{km}=M_{kb}=1. Similarmente, dado que esta falla se supuso en el cuerpo y no hay presencia de soldadura, se puede suponer que k_{tm}, k_{tb} y k_m son iguales a 1; por lo tanto, de la ecuación 7 y 8 se tiene:

$$(Y\sigma)_p = 48\ MPa$$
$$(Y\sigma)_{sAP} = \sigma_Y^{'} + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} = 58 + \frac{45 - 23}{2} = 69MPa$$
$$(Y\sigma)_{sAP+HIP} = \sigma_Y^{'} + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} = 61 + \frac{45 - 23}{2} = 72MPa$$
$$Y\sigma_{AP} = 48 + 69 = 117MPa$$
$$Y\sigma_{AP+HIP} = 48 + 72 = 120MPa$$

Lo anterior considerando esfuerzos residuales uniformes en un tubo sin soldadura y con una falla superficial, por lo tanto, lo valores de K_I para cada material se calculan con base en la ecuación 3 dando como resultado K_{IAP}=179 N.mm$^{-3/2}$ y $K_{IAP+HIP}$=183 N.mm-$^{3/2}$. En ese mismo sentido, los valores de K_{rAP} y $K_{rAP+HIP}$ fueron de 0.05 y 0.76, respectivamente. Es notorio, que $K_{rAP+HIP}$ 15 veces mayor en comparación con K_{rAP}. La Figura 5, muestra el resultado de la evaluación nivel dos con FAD y es notorio que bajo la consideración de las propiedades mecánicas, concentradores de esfuerzos y la falla, ambos materiales salen fuera del intervalo seguro. Sin embargo, el AP+HIP evidenció una probabilidad de falla debido a fractura frágil, mientras que la AP podría fallar por colapso plástico.

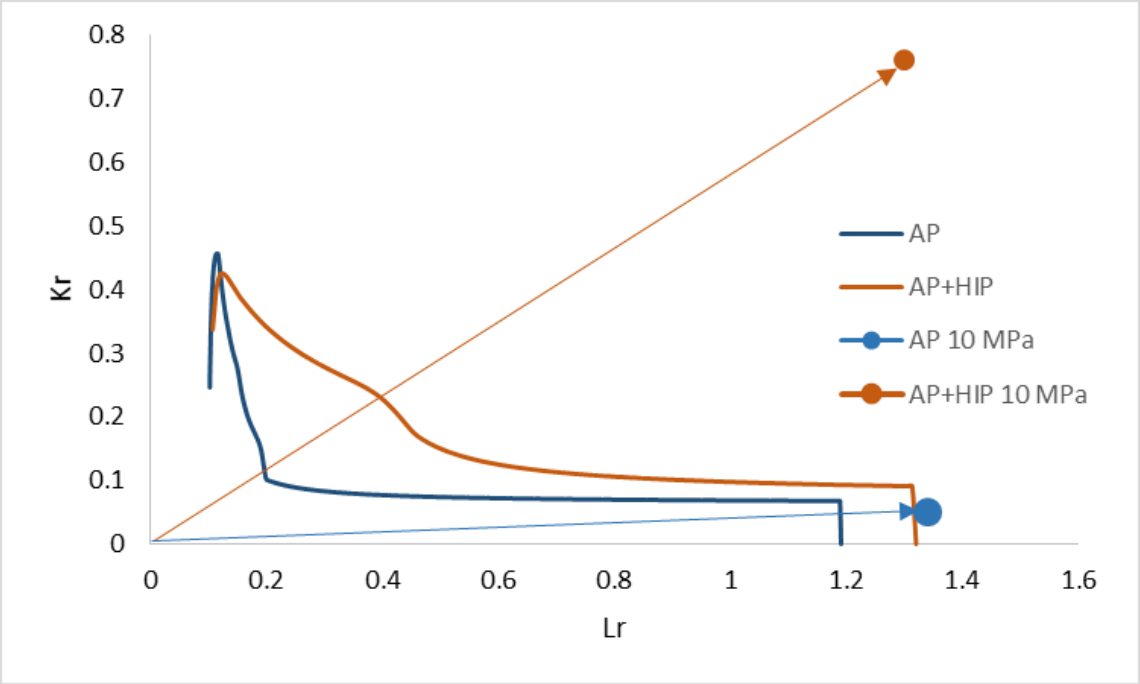


Figura 5. FAD para nivel dos de las muestras AP y AP+HIP a 10MPa.

3.5 Fractografía

Los resultados de las fractografías obtenidas mediante uso del SEM se muestran en las Figuras 6a-d. La Figura 6a muestra un ejemplo de las superficies de fractura de las probetas de tensión uniaxial, en el caso de la figura 6a se observa el patrón de fractura de la probeta AP donde se aprecian micro-hoyuelos que son típicos de la fractura dúctil. La Figura 6b muestra la superficie de fractura de la muestra CVN de AP donde se aprecian clivaje en dirección del impacto. En este caso se puede observar que los hoyuelos de fractura tienen origen en inclusiones no metálicas, pero no hay evidencia de otro tipo de defectos de manufactura.

En contraste, la Figura 6c muestra la superficie de fractura de tensión uniaxial la muestra AP+HIP, donde se aprecian patrones de fractura de clivaje e intergranular, los cuales son característicos de la fractura frágil. Además se observan defectos de manufactura tales como óxidos atrapados y huecos (voids) donde ni hubo coalescencia de las partículas después del tratamiento HIP. Finalmente, la Figura 6d muestra la superficie de fractura de la muestra CVN AP+HIP, donde se aprecia el desgarre debido al impacto y un patrón de clivaje similares a los mostrados en la Figura 6b. De igual manera defectos de manufactura tales como óxidos atrapados y huecos donde ni hubo coalescencia de las partículas después del tratamiento HIP.

En este mismo sentido, se puede observar que el módulo de Young es diferente entre ambos materiales. Esto puede ser explicado con el hecho que el proceso de manufactura del material AP es laminado y en el caso de la probeta AP+HIP se fabricó por medio de metalurgia de polvos y existen defectos internos en la probeta tales como huecos entre los granos de aluminio. Estos defectos juegan un papel importante en la forma de la curva esfuerzo -deformación lo cual influye en la determinación de las propiedades mecánicas.

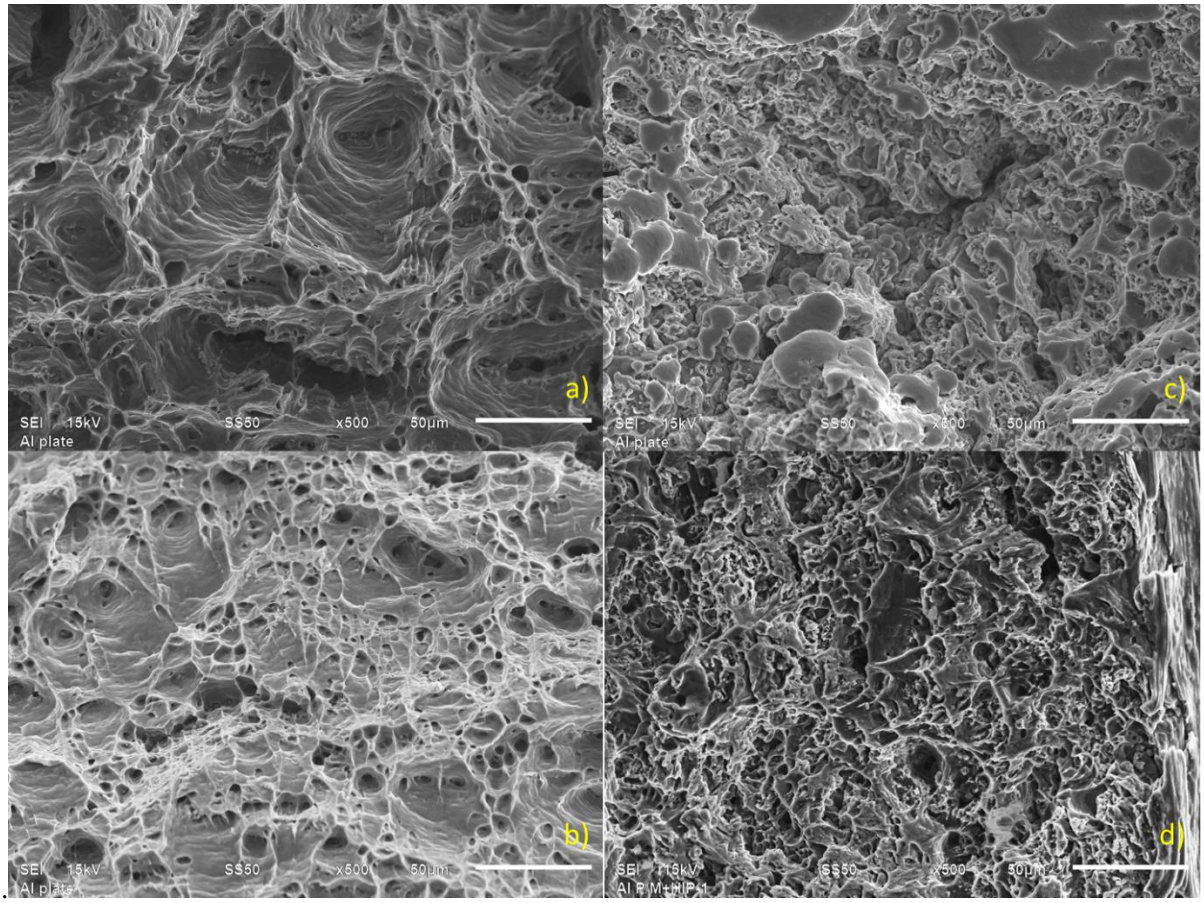


Figura 6 (a-d). Figura 6a. Patrón de fractura de la probeta AP. Se aprecian microhoyuelos de la fractura dúctil. FAD para nivel dos. **Figura 6b**. Patrón de fractura de la muestra CVN de AP. Se aprecia cuasiclivaje en dirección del impacto. **Figura 6c**. Patrón de fractura de tensión uniaxial la muestra AP+HIP. Se aprecia patrones de fractura de cuasiclivaje y hoyuelos por desgarramiento. **Figura 6c**. Patrón de fractura de la muestra CVN AP+HIP. Se aprecia el desgarre debido al impacto y un patrón de clivaje.

4.0 Discusión

Como ya fue mencionado el patrón de fractura en tensión simple de la muestra AP es dúctil y en este tipo de fractura se caracteriza por la formación de múltiples hoyuelos fractura que crecen y se unen hasta llegar a la fractura total. Por otro lado, el patrón de la fractura a la tensión simple de la muestra AP+HIP evidencia de huecos donde los granos no se unieron, así como también de huecos donde no hubo coalescencia (voids). Por el contrario, la superficie de fractura de la muestra AP muestra hoyuelos de fractura en tensión muy profundos lo que indica que hubo una gran deformación plástica antes de la fractura total.

Esto coincide con el hecho de la resistencia mecánica a la tensión probeta AP+HIP más elevada (100 MPa) que en el caso de la probeta AP (80 MPa) pero la elongación total de la primera (30%) es reducida en comparación con la probeta AP (64%). Aunque en el caso de las probetas ensayadas al impacto Charpy se observa que existe una diferencia entre ambos patrones de fractura, ya que en caso de la probeta AP se observan hoyuelos de fractura por desgarradura (shearing dimples) lo que está asociado con una fractura dúctil; mientras que en el caso de AP+HIP el patrón de fractura de fractura frágil de cuasiclivaje. Esto también coincide con los resultados del ensayo de impacto Charpy donde se observó que el material AP

tiene una resistencia al impacto mucho mayor (70 J) que el material AP+HIP (0.7 J).

Entonces, la comparación entre las superficies de fractura en tensión de las muestras AP y AP+HIP demuestra que los defectos del material juegan un importante papel en el inicio de las grietas; pero en el caso de las superficies de fractura de las probetas en impacto Charpy esta diferencia es más notoria. En este mismo sentido, la metodología FAD coincide con estos hechos y la evidencia de huecos indican que algún componente fabricado de este material AP+HIP tendrá en el interior defectos como los mostrados en las fractografías de las figuras 6 a-d, los cuales dan lugar a un crecimiento de grietas de manera frágil.

La metodología FAD presentada indicó de manera consistente que el tubo fabricado de AP tiene una mayor probabilidad de falla por colapso plástico, ya que en ambos niveles arrojó un resultado similar. Esto es, que la relación L_r y K_r resultante para ambos niveles arrojó una tendencia hacia la abscisa, generando un resultado limítrofe en el nivel 1 que al analizarse bajo los térmicos elastoplásticos confirma la probable falla por colapso plástico (nivel 2). En contraste, el tubo fabricado de AP+HIP al evaluarse bajo el nivel 1 reveló una tendencia a una probable falla por colapso plástico y fractura frágil (nivel 1), mientras que bajo evaluación elastoplástica (nivel 2) la tendencia es a fallar bajo fractura frágil (al tender hacia la ordenada).

Adicionalmente, bajo la evaluación nivel 1 es palpable verificar que al incrementar las presiones la tendencia se mantiene lo cual resulta obvio bajo al primer vistazo. Sin embargo, bajo la evaluación nivel 2 es posible ver el impacto que genera la CVN sobre el resultado al ser K_r 15 veces mayor, dejando sin duda una tendencia a la falla por fractura frágil. Considerando la evaluación nivel 1 podríamos reducir la operación a 5 MPa lo cual generaría un σ_{ref}=25 MPa, valores para AP de 0.37 y 0.04 para L_r y K_r, respectivamente. En contraste, los valores para AP+HIP serían 0.32 y 0.64 para L_r y K_r generando que ambos entren en la zona segura del nivel 1 y con probabilidad de fallo por colapso plástico en ambos casos. Similarmente, para la evaluación nivel 2, se obtuvieron valores K_r de 0.04 y 0.58 para el AP y AP+HIP, respectivamente. Por otro lado, los valores de L_r fueron de 0.43 y 0.41 para el AP y AP+HIP, respectivamente.

La Figura 7, muestra un comparativo de las evaluaciones nivel 1 y 2, donde al reducir la presión a 5 MPa ambos componentes entran dentro de la zona segura. Sin embargo, el componente AP+HIP queda limítrofe por lo que se aplica la evaluación nivel 2. En ese sentido, la evaluación nivel 2, sugiere que el AP operaría de forma segura bajo el concepto elastoplástico; mientras que la AP+HIP se reduciría sin cambiar la tendencia a fractura frágil. Esto, sugiere la necesidad de este tipo de evaluaciones para componentes de fabricaciones especiales como lo sugiere (Cicero, Sánchez, Martínez-Mata, Arrieta, & Arroyo, 2022), (Martínez, Cano, Salazar, & Rodrígiuez, 2022) y complemento a otros mecanismos de daño como lo presentan (Aboalriha, 2021) (Milne, Ritchie, & Karihaloo, 2003).

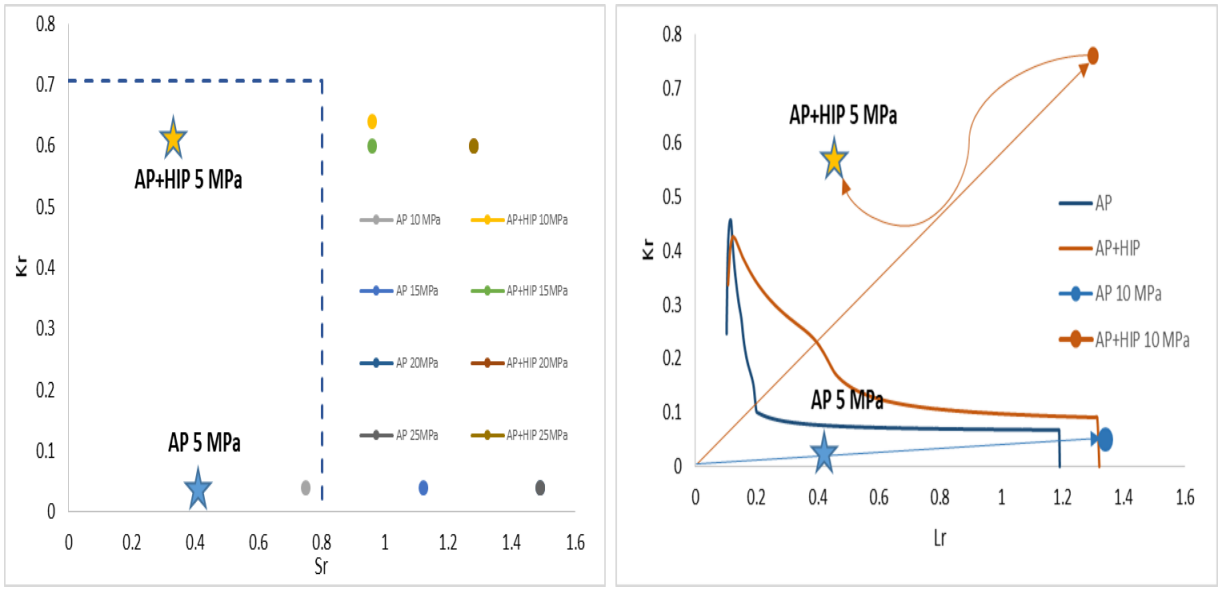


Figura 7. Comparativo evaluación niveles 1 y 2 a una presión de 5 MPa.

5.0 Conclusiones

La aplicación de metodologías APS en este caso el FAD, proporcionaron información relevante para toma de decisiones en un caso hipotético conservador de la mecánica (un tubo de aluminio). Los resultados del FAD, sugieren que el tubo AP sometida a su trabajo y con un daño con profundidad de 1.5mm puede fallar por colapso plástico a su presión de operación y diversos estados de esfuerzo. En contraste, el tubo AP+HIP fallaría en primera instancia por una combinación de colapso plástico y fractura frágil. Sin embargo, la evaluación nivel 2 reveló que el tubo AP mantendría la tendencia a la falla por colapso plástico, mientras que la AP+HIP fallaría por fractura frágil (cuestión indeseable en elementos estructurales y de maquina). También, la reducción de la presión a 5 MPa reveló que aunque la evaluación nivel 1 podría arrojar una operación segura, al ser evaluado bajo el nivel 2 arroja que solo el tubo AP operaría satisfactoriamente en ambos niveles. Finalmente, los resultados de observaciones fractográficas revelaron la influencia de la microestructura y el proceso en la confiabilidad de un material que pudiera ser en un componente.

6.0 Agradecimientos

Al CIDESI, al CONAHCYT y a la república mexicana por su invaluable apoyo a la ciencia. Al Mtro. Ariel Dorantes, por su apoyo en los dibujos de las Figuras 2 y 3; así como a la Lic. Paola González por su revisión en la redacción.

7.0 Referencias bibliográficas

Aboalriha, W. (2021). Application of failure assessment diagram (FAD) for steel welded conection based ob BS7910 and DNV-RP-108. *EJERS, 6*(6), 99-106.

API/ASME 579. Fitness-For-Service Evaluation. (2021). Pa, USA.: American Petrol Institute & American Society of Mechanical Engineers.

ASTM D5045. Standard Test Methods for Plane-Strain Fracture Toughness and Strain Energy Release Rate of Plastic Materials. (2014 (2022)). Coshoken, USA.: American Society of Testing Materials.

ASTM D6068. Standard Test Method for Determining J-R Curves of Plastic Materials. (2010 (2018)). Coshoken, USA.: American Society of Testing Materials.

BS7910. Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures. (2019). Manchester, UK: British standards.

Cicero, S., Sánchez, M., Martínez-Mata, V., Arrieta, S., & Arroyo, B. (2022). Structural integrity assessment of additively manufactured ABS, PLA and graphene reinforced PLA notched specimens combining Failure Assessment Diagrams and the Theory of Critical Distances. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 121*(103535), 1-15.

DNV-RP-F108 Assessment of flaws in pipeline and riser girth welds. (2019 (2021)). Oslo, Nor: Der Norske Veritas.

Dowling, A., Hadley, I., & White, J. B. (11 de 2004). *The future of fracture assessment*. (TWI) Recuperado el 10 de 04 de 2024, de https://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/the-future-of-fracture-assessment

Dowling, N. E. (2013). *Mechanical behavior of materials. Engineering methods for deformation, fracture and fatigue. Fourth edition.* Harlow, England: Pearson.

Macdonald, K. A. (2011). *Fracture and Fatigue of Welded Joints and Structures.* Woodhead Publishing Series.

Martínez, M., Cano, A. J., Salazar, A., & Rodrígiuez, J. (2022). On the failure assessment diagram methodology in polyamide 12. *Engineering Fracture Mechanics, 269*(108558), 1-11.

Milne, I., Ritchie, R. O., & Karihaloo, B. (2003). *Comprehensive Structural Integrity.* Elsevier Science.

Overview of materials for 1000 Series Aluminum. (11 de 04 de 2024). Obtenido de MAT Web: https://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?MatGUID=38e1c167c7ea4dfebf80778b29ae71cf

Salgado-López, J. M., Martínez-Franco, E., Cruz-González, C. E., & Tello-Rico, M. (2023). Comparison of microstructure and mechanical properties of industrial pure aluminum produced by powder metallurgy and conventional rolling. *Journal of Mechanical Engineering, 7*(19), 23-31.