

33

Fecha de presentación: diciembre, 2021

Fecha de aceptación: marzo, 2022

Fecha de publicación: mayo, 2022

CONSIDERACIONES METALMECÁNICAS PARA LA PREVENCIÓN DE FALLAS EN UNA INVERSIÓN DE LA IN- DUSTRIA DE PROCESOS QUÍMICO.

METALWORKING CONSIDERATIONS FOR FAILURE PREVENTION IN A CHE- MICAL PROCESS INDUSTRY INVESTMENT.

Alejandro Duffus Scott¹

E-mail: aduffus@uclv.edu.cu

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9959-5697>

Eusebio Vladimir Ibarra Hernández¹

E-mail: eusebioih@uclv.edu.cu

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8119-8431>

Amado Cruz Crespo¹

E-mail: acruz@uclv.edu.cu

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0227-9853>

Rafael Fernandez Fuentes¹

E-mail: rfernandez@uclv.edu.cu

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3315-2652>

¹ Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Cuba.

Cita sugerida (APA, séptima edición)

Duffus Scott, S., Ibarra Hernández, E. V., Cruz Crespo, A., & Fernández Fuentes A. (2022). Consideraciones metalmeccánicas para la prevención de fallas en una inversión de la industria de procesos químicos. *Revista Universidad y Sociedad*, 14(3), 331-340.

RESUMEN

En el presente trabajo se abordan las consideraciones metalmeccánicas para la prevención de fallas en una inversión de la industria de procesos químicos. Se parte de la función del análisis de fallas para establecer los criterios a aplicar en el diseño, fabricación, montaje y servicio. Son relacionados los principales fenómenos de degradación que actúan en las instalaciones de plantas de procesos químicos y los materiales fundamentales para el adecuado desempeño previniendo las fallas. Se propone un sistema de inspección mediante ensayos no destructivos y con aplicación de ensayos complementarios con vistas a la detección oportuna de defectos antes, durante y después del montaje. Se concluye que, desde el punto de vista metalmeccánico, para garantizar la resistencia, la fiabilidad y la durabilidad en plantas de procesos químicos, deben ser aplicados los criterios de análisis de fallas, combinados con la selección de materiales en función de los fenómenos de degradación y con la aplicación de un adecuado sistema de inspección.

Palabras claves: Análisis de fallas, Fenómenos de degradación, Sistema de inspección.

ABSTRACT

In the present work, the metal-mechanical considerations for the prevention of failures in an investment in the chemical process industry are addressed. It starts from the function of failure analysis to establish the criteria to be applied in the design, manufacture, assembly and service. The main degradation phenomena that act in chemical process plant facilities and the fundamental materials for proper performance preventing failures are related. An inspection system is proposed by means of non-destructive tests and with the application of complementary tests with a view to the timely detection of defects before, during and after assembly. It is concluded that, from the metal-mechanical point of view, to guarantee resistance, reliability and durability in chemical process plants, failure analysis criteria must be applied, combined with the selection of materials based on degradation phenomena. and with the application of an adequate inspection system.

Keywords: Failure analysis, Degradation phenomena, Inspection system

INTRODUCCIÓN

En el mundo, es tarea de alta prioridad la construcción de plantas de procesos químicos, que incluyen recipientes a presión (calderas de vapor, autoclaves, digestores, tuberías que transportan hidrocarburos), o elementos para el transporte y almacenamiento de hidrocarburos y sustancias químicas (Solari, 2004). En correspondencia con los altos niveles de multidisciplinariedad y especialización, en el caso de los países en desarrollo, como Cuba, estas tareas de inversión se acometen casi en su totalidad con participación de colaboración extranjera.

El alto grado de complejidad, el costo económico de dichas plantas, el peligro para la salud de los seres humanos y las medidas de protección ambiental, constituyen aspectos indispensables a tener en cuenta al concebir las inversiones (Ministerio de la Inversión Extranjera, 2014 y Solari, 2012). El diseño de estas plantas, con frecuencia solo tiene en cuenta los aspectos de optimización, fabricación, montaje y operación y, en base a ello, las plantas se diseñan para una larga vida de explotación, de 30 a 40 años (Sroka, 2017 y Viswanathan, 1993). Sin embargo, en la práctica no se alcanza esta vida útil antes de reparaciones capitales, ya que, no se consideran en detalle las particularidades climatológicas y geográficas, se realizan adecuaciones durante la fabricación y montaje que no fueron previstas en el diseño original (ejemplo, cambio de materiales por homólogos del mercado), durante la explotación no se cumple a rigor los sistemas de inspección y mantenimiento y, a veces, se operan los equipos fuera de las condiciones nominales de diseño.

Por otra parte, las exigencias, desde el punto de vista ambiental y seguridad, son cada día más rigurosas, haciendo que, aun cuando las instalaciones mantengan capacidad para su desempeño desde el punto de vista técnico, puedan ser sacadas de servicio por regulaciones ambientales o de seguridad (Solari, 2012).

La respuesta a las circunstancias planteadas, con vistas a garantizar mayores niveles de vida útil de las instalaciones, se basa en aplicar los criterios de análisis de fallas, a *priori* durante el diseño, la ejecución del montaje y la explotación (Collins, 1993). De este modo, la aparición de un fenómeno de degradación o, incluso, la presencia de la causa que lo induce es detectada, posibilitando evitar la falla.

Un análisis de las consideraciones metalmeccánicas, de los aspectos fundamentales a tener en cuenta en una inversión de planta de procesos químicos, comienza por conocer los procesos de fallas y fenómenos de degradación en los equipos e instalaciones. La ocurrencia de

fallas en estas plantas, puede tener diversos orígenes (American Society for Metals [ASM], 2002):

1. Condiciones de servicio extremadamente severas.
2. Defectos del material base.
3. Desviaciones del proyecto original en el proceso de fabricación.
4. Diseño inadecuado.
5. Mala selección y manejo de los materiales bases y de soldadura.
6. Dificultades en el montaje (montaje propiamente dicho, soldadura y tratamiento térmico).
7. Rediseño inadecuado, por no tener en cuenta la degradación estructural de los materiales de los equipos.

En base a lo planteado, el presente trabajo tiene como objetivo establecer las particularidades, desde el punto de vista metalmeccánico, a tener en cuenta en una inversión de la industria de procesos químicos, para garantizar la resistencia, fiabilidad y durabilidad de los componentes y agregados.

DESARROLLO

El alargamiento de la vida útil de una planta de procesos químicos está indisolublemente relacionado con la integridad de los componentes y equipos; por tanto, es esencial la prevención de la ocurrencia de fallas. En tal sentido, la presencia de fenómenos de degradación y, relacionado a ello, la selección de materiales y los sistemas de inspección, deben ser considerados desde el diseño y durante la vida útil de la instalación.

Función del análisis de fallas

Según Collins (1993), la función primaria del análisis de fallas, es definir, determinar y describir los factores responsables generadores de la falla (Figura 1), para poder prever posibles averías al diseñar los componentes de las plantas.

Se debe considerar la selección del material desde el enfoque de la prevención de la falla, o sea, que esté capacitado para enfrentar los fenómenos de degradación que operan en la instalación.

Durante la fabricación pueden ser inducidos defectos que conducen a la falla. En tal sentido, los regímenes de trabajo de las herramientas son esenciales a considerar. Por ejemplo, la elección de una herramienta para el maquinado, o incluso un régimen severo de corte, puede conducir a una rugosidad generadora de fallas por fatiga. En igual sentido, un proceso de conformado puede inducir corrosión bajo tensión.

En el montaje, pueden ser creadas las condiciones para fallas futuras. Por ejemplo, un anclaje inapropiado, puede conducir a vibraciones excesivas y a fallas en menores números de ciclos. También, las desalineaciones pueden llevar a la falla temprana de los componentes.

El servicio de las instalaciones y componentes los somete a temperaturas, presiones, contacto con medios agresivos, etc., que provocan mecanismos de daños, que pueden llevar a la falla. Por tanto, el control de parámetros durante la operación es esencial.

Durante todas las etapas, al aplicar el análisis de fallas, si aparecen defectos no admisibles se debe corregir de manera preventiva. En el caso particular de nuevas inversiones, todo está centrado en el diseño, fabricación y montaje. Antes de iniciar el montaje de la planta, debe ser revisada la documentación técnica y el estado de los equipos y agregados. Durante la fabricación de agregados y el montaje de equipos y componentes deben ser realizadas inspecciones, dejando constancia de registros.

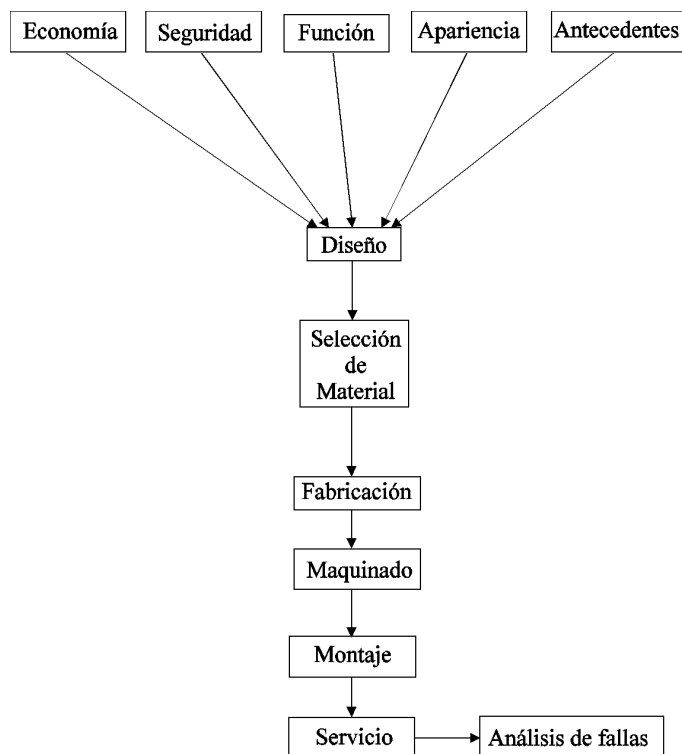


Figura 1. Relación del diseño y la fabricación de un componente con el Análisis de fallas (Collins, 1993).

Fenómenos de degradación en equipos e instalaciones de plantas de procesos químicos

En el análisis para prolongar la vida útil de equipos e instalaciones de planta de procesos químicos, manteniendo la resistencia, fiabilidad y durabilidad en el tiempo, es de

vital importancia, conocer cuáles son los fenómenos más importantes que degradan a los materiales, así como a las uniones soldadas; es decir, cuales son los fenómenos que con el tiempo hacen que los materiales y sus uniones soldadas pierdan estabilidad durante su servicio. La degradación consiste en la disminución de algunas propiedades mecánicas fundamentales, lo cual está asociado a una pérdida de la capacidad de trabajo de los equipos, disminuyendo su vida útil.

El conocimiento profundo de los fenómenos de degradación de la estructura, permite realizar el diseño más adecuado de los equipos, teniendo presente las condiciones de trabajo, tales como, la presión, la temperatura, el tipo de carga, el medio ambiente, etc. La detección de los fenómenos de degradación en una fase embrionaria, permite la realización de pequeñas reparaciones con bajo costo para evitar la falla.

Los fenómenos que fundamentalmente degradan a los materiales y uniones soldadas en equipos de plantas de procesos químicos son: Fatiga mecánica, corrosión, cavitación, erosión, fragilización, endurecimiento por precipitación, desgaste, tensiones residuales, grafitización, esferoidización, termofluencia en la etapa primaria y secundaria, grietas inducidas por la termofluencia a partir de su etapa terciaria, fatiga térmica, fatiga termomecánica y choque térmico (Castillo, 2020; Fernández, 2021 y Komai, 1998).

La pérdida de espesor y el agrietamiento, son las consecuencias más frecuentes que provocan los fenómenos de degradación en plantas de procesos químicos. Especial interés merecen la corrosión y la erosión en sus diferentes manifestaciones, así como el agrietamiento inducido por hidrógeno y corrosión bajo tensión (Komai, 1998).

Dada su alta incidencia como fenómeno de degradación en plantas químicas, la corrosión construye el mayor foco de interés. La alta versatilidad de medios que actúan y de materiales de los equipos y componentes, hacen que existan múltiples tipos de corrosión en las instalaciones (Komai, 1998; Solari, 2004 y Viswanathan, 1993):

- Corrosión bajo tensión.
- Corrosión intercrystalina.
- Corrosión –Oxidación.
- Corrosión-Fatiga.
- Corrosión por HCl.
- Corrosión por picadura.
- Corrosión orgánica.
- Corrosión Inorgánica por cloruros.

- Corrosión por CO₂.
- Corrosión cáustica.
- Corrosión por H₂/H₂S.
- Corrosión por ácido nafténico.
- Corrosión por ácido sulfúrico.
- Corrosión por ácido fluorhídrico.
- Corrosión –erosión.
- Corrosión bajo aislación.
- Corrosión atmosférica.
- Corrosión en caliente.
- Corrosión galvánica.
- Corrosión en rendijas.
- Corrosión Biológica.

Estos fenómenos de degradación estructural deterioran el estado físico de equipos y componentes. Estos se pueden reflejar en:

- » Disminución de la resistencia del material.
- » Reducción de la sección transversal o del espesor de pared.
- » Aparición de grietas y otros defectos

Las consecuencias de la acción de los fenómenos de degradación sobre los equipos e instalaciones son:

- » Reducción en la capacidad de la estructura para soportar cargas.
- » Probabilidad de fallas inesperadas y catastróficas.
- » Reducción de la vida remanente de los equipos.

Selección de materiales

Como ha sido planteado anteriormente, uno de los aspectos más importante a tener en cuenta, en las consideraciones metalmeccánicas, al realizar la inversión en una industria de procesos químicos es la selección de materiales. En todos los casos se deben revisar las especificaciones de los aceros con el contratista.

Las particularidades de mercado pueden conducir a la necesidad de empleo de aceros equivalentes. En esos casos, se requiere un análisis profundo para la toma de decisiones.

Como regla, las plantas de procesos químicos utilizan dos familias fundamentales de materiales, para altas

temperaturas y para trabajos con sustancias agresivas. Esto obedece a que los procesos se ejecutan a temperaturas y presiones determinadas y en ocasiones frente a determinados medios, con temperaturas y concentraciones diferentes.

La mayoría de los aceros para aplicaciones en planta de procesos químicos, se encuentran dentro de las siguientes categorías: aceros al carbono; aceros al carbono-molibdeno; aceros al cromo-molibdeno de aleación baja e intermedia; aceros inoxidable austeníticos; aceros inoxidable martensítico y aceros inoxidable ferríticos (American Society of Mechanical Engineers [ASME], 2015; Fernández, 2021; InduraSA, 2010; Saquid, 2018 y Viswanathan, 1993).

En la Tabla 1 se lista una gama de aceros inoxidable austeníticos frecuentemente empleados en plantas de procesos químicos, debido a su elevada resistencia a la corrosión en un amplio tipo de ambientes corrosivos, generalmente mayor que la de los aceros Martensíticos o Ferríticos, pero son vulnerables al agrietamiento por corrosión bajo tensión (SCC) en ambientes de cloruro. Estos aceros poseen excelente soldabilidad, mejor que los grados ferríticos y martensíticos; presentan también muy buenas propiedades criogénicas, buena resistencia a alta temperatura y excelente resistencia al impacto aun a temperaturas criogénicas. Algunos aceros completamente austeníticos pueden ser usados a temperaturas tan bajas como -270 °C. En Plantas, equipos químicos y equipos para procesamiento de alimentos, los aceros inoxidable austeníticos ocupan un lugar especial.

En la Tabla 2 se presentan las principales marcas de aceros inoxidable ferríticos que más se emplean en procesos químicos, estos poseen excelente resistencia al "pitting" y a la corrosión por rendija (Crevice) inducida por cloruros. Se les prefiere en general, por su resistencia a la corrosión y bajo costo, más que por sus propiedades mecánicas. Sus aplicaciones típicas son en: Tubos de intercambiadores de calor donde la corrosión bajo tensión sea un problema, por ejemplo, en plantas de procesamiento de petróleo o gas natural; estampado profundo de piezas como, recipientes para industrias químicas y alimenticias, reactores catalíticos y tanques de ácido nítrico. También son muy empleados en componentes que requieren protección contra subidas de temperatura, tales como partes de hornos, boquillas, cámaras de combustión y tanques de agua caliente.

Tabla 1. Composición química típica de aceros inoxidables austeníticos, en % masa (ASME, 2015; InduraSA, 2010).

Marca	C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	otros
201	0,15	5,5-7,5	1,00	16,0-8,0	3,5-5,5	0,06	0,03	0,25N
202	0,15	7,5-10,0	1,00	17,0-9,0	4,0-6,0	0,06	0,03	0,25N
205	0,12-0,25	14,0-5,5	1,00	16,5-8,0	1,0-1,75	0,06	0,03	0,32-0,40N
301	0,15	2,00	1,00	16,0-8,0	6,0-8,0	0,045	0,03	
302	0,15	2,00	1,00	17,0-9,0	8,0-10,0	0,045	0,03	
302B	0,15	2,00	2,0-3,0	17,0-9,0	8,0-10,0	0,045	0,03	
303	0,15	2,00	1,00	17,0-9,0	8,0-10,0	0,20	0,15min	0,6Mo
303Se	0,15	2,00	1,00	17,0-9,0	8,0-10,0	0,20	0,06	0,15min Se
304	0,08	2,00	1,00	18,0-0,0	8,0-10,5	0,045	0,03	
304H	0,04-0,10	2,00	1,00	18,0-0,0	8,0-10,5	0,045	0,03	
304L	0,03	2,00	1,00	18,0-0,0	8,0-12,0	0,045	0,03	
304LN	0,03	2,00	1,00	18,0-0,0	8,0-12,0	0,045	0,03	0,10-0,16N
302Cu	0,08	2,00	1,00	17,0-9,0	8,0-10,0	0,045	0,03	3,0-4,0 Cu
304N	0,08	2,00	1,00	18,0-0,0	8,0-10,5	0,045	0,03	0,10-0,16N
305	0,12	2,00	1,00	17,0-9,0	10,5-3,0	0,045	0,03	
308	0,08	2,00	1,00	19,0-1,0	10,0-2,0	0,045	0,03	
309	0,20	2,00	1,00	22,0-4,0	12,0-5,0	0,045	0,03	
309S	0,08	2,00	1,00	22,0-4,0	12,0-5,0	0,045	0,03	
310	0,25	2,00	1,50	24,0-6,0	19,0-2,0	0,045	0,03	
310S	0,08	2,00	1,50	24,0-6,0	19,0-2,0	0,045	0,03	
314	0,25	2,00	1,50-0,00	23,0-6,0	19,0-2,0	0,045	0,03	
316	0,08	2,00	1,00	16,0-8,0	10,0-4,0	0,045	0,03	2,0-3,0 Mo
316F	0,08	2,00	1,00	16,0-8,0	10,0-4,0	0,20	0,01min	1,75-2,75Mo
316H	0,04-0,10	2,00	1,00	16,0-8,0	10,0-4,0	0,045	0,03	2,0-3,0Mo
316L	0,03	2,00	1,00	16,0-8,0	10,0-4,0	0,045	0,03	2,0-3,0Mo
316LN	0,03	2,00	1,00	16,0-8,0	10,0-4,0	0,045	0,03	2,0-3,0Mo; 0,10-0,16N
316N	0,08	2,00	1,00	16,0-8,0	10,0-4,0	0,045	0,03	2,0-3,0Mo; 0,10-0,16N
317	0,08	2,00	1,00	16,0-8,0	11,0-5,0	0,045	0,03	3,0-4,0Mo
317L	0,03	2,00	1,00	16,0-8,0	11,0-5,0	0,045	0,03	3,0-4,0Mo
321	0,08	2,00	1,00	17,0-9,0	9,0-12,0	0,045	0,03	5x%C minTi
321H	0,04-0,10	2,00	1,00	17,0-9,0	9,0-12,0	0,045	0,03	5x%C minTi
330	0,08	2,00	0,75-0,50	17,0-9,0	34,0-7,0	0,04	0,03	
347	0,08	2,00	1,00	17,0-9,0	9,0-13,0	0,045	0,03	10x%Cmin Nb
347H	0,04-0,10	2,00	1,00	17,0-9,0	9,0-13,0	0,045	0,03	8x%Cmin-1,0Nb
348	0,08	2,00	1,00	17,0-9,0	9,0-13,0	0,045	0,03	0,2Co; 10x%C
348H	0,04-0,10	2,00	1,00	17,0-9,0	9,0-13,0	0,045	0,03	
384	0,08	2,00	1,00	15,0-7,0	15,0-9,0	0,045	0,03	

Tabla 2. Composición química típica de aceros inoxidables ferríticos, en % masa (ASME, 2015; InduraSA, 2010).

Marca	C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	Otros
405	0,08	1,00	1,00	11,5-14,5		0,04	0,3	0,10-0,3Al
409	0,08	1,00	1,00	10,5-1,75	0,50	0,045	0,045	6x%Cmin-0,75maxTi
429	0,12	1,00	1,00	14,0-1,75		0,04	0,03	
430	0,12	1,00	1,00	16,0-18,0		0,04	0,03	
430F	0,12	1,25	1,00	16,0-18,0		0,06	0,15min	0,6 Mo
430F Se	0,12	1,25	1,00	16,0-18,0		0,06	0,06	0,15 min Se
434	0,12	1,00	1,00	16,0-18,0		0,04	0,03	0,75-1,25 Mo
436	0,12	1,00	1,00	16,0-18,0		0,04	0,03	0,75-1,25Mo; 5x%Cmin-0,70mxNb
439	0,07	1,00	1,00	17,0-19,0	0,50	0,04	0,03	
442	0,20	1,00	1,00	18,0-23,0		0,04	0,03	1,75; 2,50Mo; 0,025N;
444	0,025	1,00	1,00	17,5-19,5	1,00	0,04	0,03	0,25N
446	0,20	1,50	1,00	23,0-27,0		0,04	0,03	

En la Tabla 3 se presentan algunos de los aceros inoxidable martensíticos, más utilizados en piezas que están sometidas a corrosión y que requieren cierta resistencia mecánica, tales como, aspas de turbinas (Tipo 403), revestimiento de asientos para válvulas, carcasas de bombas, cuerpos de válvulas y compresores, cuchillería, hojas de afeitar e instrumentos quirúrgicos (Tipos 420 y 431), ejes, husos y pernos.

Tabla 3. Composición química típica de aceros inoxidable martensíticos, en % masa (ASME, 2015; InduraSA, 2010).

Marca	C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	OTROS
403	0,15	1,00	0,50	11,5-13,0		0,04	0,03	
410	0,15	1,00	1,00	11,5-13,5		0,04	0,03	
414	0,15	1,00	1,00	11,5-13,5	1,25-2,50	0,04	0,03	
416	0,15	1,25	1,00	12,0-14,0		0,06	0,15min	0,6 Mo
416 Se	0,15	1,25	1,00	12,0-14,0		0,06	0,06	0,15min Se
420	0,15min	1,00	1,00	12,0-14,0		0,04	0,03	
420F	0,15min	1,25	1,00	12,0-14,0		0,06	0,15min	0,6 Mo
422	0,20-0,25	1,00	0,75	11,5-13,5	0,5-1,0	0,04	0,03	0,75-1,25Mo, 0,75-1,25W, 0,15-0,3V
431	0,20	1,00	1,00	15,0-17,0	1,25-2,50	0,04	0,03	
440A	0,60-0,75	1,00	1,00	16,0-18,0		0,04	0,03	0,75
440B	0,75-0,95	1,00	1,00	16,0-18,0		0,04	0,03	0,75
440C	0,95-1,20	1,00	1,00	16,0-18,0		0,04	0,03	0,75

La Tabla 4 contiene los aceros más utilizados en refinerías y planta petroquímica en la construcción de equipos y tuberías para el transporte de hidrocarburos y otras sustancias agresivas. A su vez, la Tabla 5 muestra aceros de amplio uso en calderas de vapor.

Tabla 4. Aceros utilizados en tuberías en refinería y planta petroquímica (Viswanathan, 2004).

MATERIAL	PIPES AND TUBES	PLATES
Carbon steel	A53, A106, A134, A135, A139, A155, A178, A179, A192, A210, A214, A226, A333, A334, A381, A524, A587	A283, A285, A299, A433, A443, A455, A515, A516, A537, A573
C-1/2Mo	A161, A209, A250, A335, A369, A426	A204, A302, A533
1Cr-1/2 Mo	A213, A335, A369, A426	A387
1 1/4 Cr-1/2Mo	A199, A200, A213, A335, A369, A426	A387, A389
2Cr-1/2Mo	A199, A200, A213, A335, A369	
2 1/4Cr-1Mo	A199, A213, A335, A369, A426	A387, A542
3Cr-1Mo	A199, A200, A213, A335, A369, A426	A387
5Cr-1/2Mo	A199, A200, A213, A335, A369, A426	A357
7Cr-1/2Mo	A199, A200, A213, A335, A369, A426	
9Cr-1Mo	A199, A200, A213, A335, A369, A426	
Ferritic and Austenitic Stainless steels	A213, A249, A268, A269, A271, A312, A358, A362, A376, A409, A430, A451, A452, A511	A167, A176, A240, A412, A457

Tabla 5. Aceros utilizados en las construcción de calderas de vapor (ASME, 2017, Fernández, 2019).

TIPO DE ACERO	Especificación	TEMPERATURA máxima 0C
Carbono	SA36, SA178, SA192, SA210, SA106, SA515, SA516	454
Carbono-0.5Mo	SA209	482
1.25Cr – 0.5Mo	SA213 T-11, SA335 P-11	552
2.25Cr – 1Mo	SA213 T-22, SA335 P22	579
18Cr – 10Ni	SA213 TP304(H), 321(H), 347(H)	815

En el proceso de montaje de la planta es obligatorio realizar, mediante ensayo no destructivos, comprobaciones de la sanidad de la soldadura y si aparece algún defecto, inmediatamente debe ser reparado; por tal motivo, es recomendable constar con una lista de electrodos de aceros inoxidable (Tabla 6), para acometer dicha reparación con éxitos.

Tabla 6. Recomendaciones de electrodos de Acero Inoxidable de acuerdo al material base. (InduraSA, 2010).

MATERIAL BASE AISI No	10 ALTERNATIVA ELECTRODO INDURA	10 ALTERNATIVA CLASIFICACIÓN AWS	20 ALTERNATIVA ELECTRODO INDURA	20 ALTERNATIVA CLASIFICACIÓN AWS
202	308	E308-16	308L	E308L-16
301	308	E308-16	308L	E308L-16
302	308	E308-16	308L	E308L-16
302B	308	E308-16	309	E309L-16
304	308	E308-16	308L	E308L-16
304L	308L	E308-16	347	E347-16
305	308	E308-16	308L	E308L-16
308	308	E308-16	308L	E308L-16
309	309	E309-16	309L	E309L-16
309S	309	E309-16	309L	E309L-16
310	25-20	E310-16		
310S	25-20	E310-16		
314	25-20	E310-16		
316	316	E316-16	316L	E316L-16
316L	316L	E316L-16		
317	317	E317-16	309Cb	E309Cb-16
321	347	E347-16	308L	E308L-16
347	347	E347-16	308L	E308L-16
348	347	E347-16		
403	410	E410-16		
410	410	E410-16	430	E430-16
410NiMo	13(SLASH)4	E410NiMo-15		
414	410	E410-16		
416	410	E410-16		
416Se				
420	410	E410-16		
431	430	E430-16		
440A				
440B				
440C				
405	410	E410-16	405Cb	E404Cb-16
430	430	E430-16	309	E309-16
430F				
430FSe				
446	309	E309-16	310	E310-16
501	502	E502-16		
502	502	E502-16		

Sistema de inspección en componentes y equipos de plantas de procesos químicos

En el campo de la inspección en componentes y equipos de plantas de procesos químicos de nueva creación, es importante para los especialistas, disponer de un sistema de inspección, que les permitan decidir, bajo criterios científico, el estado técnico de todos los equipos y componentes, teniendo en consideración las exigencias de seguridad industrial, las implicaciones económicas y el impacto ambiental.

Un sistema de inspección consta de dos etapas básicas:

- Nivel I. Recopilación de la información, relacionada con los certificados de los materiales, fundamentalmente de composiciones químicas y propiedades mecánicas, sustentados en normas y procedimientos.
- Nivel II. Inspección mediante ensayos no destructivos, antes, durante y después de terminada la inversión (Figura 2).

En el sistema se incluyen, las premisas que se pueden considerarse para establecer la necesidad de la inspección, a qué componentes inspeccionar, las zonas críticas, los daños esperados, los métodos y técnicas para identificarlos, caracterizarlos y evaluarlos, así como las decisiones posibles para determinar las acciones preventivas y/o correctivas, con ayuda de códigos reconocidos por la comunidad internacional.

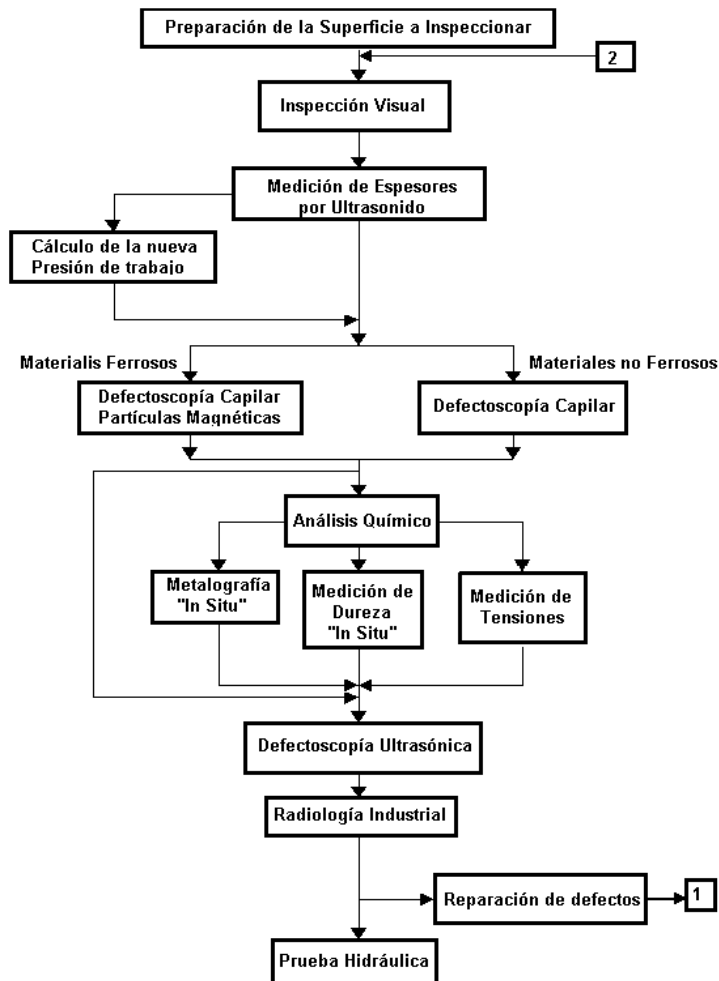


Figura 2. Esquema del sistema de inspección mediante ensayo no destructivo de componentes (Fuente propia).

En el sistema de inspección de la Figura 2, se observa que en la medida que se avanza en la inspección aumenta la complejidad de los ensayos, iniciando con la inspección visual y finalizando con pruebas hidráulicas, cuando se requiera comprobar hermeticidad. Si lo requiere la inspección, son realizados ensayos complementarios de composición química, metalografía y dureza *in situ* y medición de tensiones. En el momento que es detectado el defecto, debe ser realizada la reparación, si fuera admisible, o la reposición del componente, como se indica (ASME, 2018).

CONCLUSIONES

Desde el punto de vista metalmeccánico, en una inversión de la industria de procesos químicos, para garantizar la resistencia, fiabilidad y durabilidad de los componentes y agregados es de vital importancia aplicar los criterios de análisis de fallas durante el diseño, la fabricación y el montaje. Es esencial la consideración de los fenómenos de degradación que operan y la adecuada selección de los materiales. La aplicación de un sistema de inspección antes, durante y después del montaje, basado en la aplicación de ensayos no destructivos y análisis complementarios, garantiza la detección oportuna de defectos y la posible reparación o reposición del componente.

La selección del material adecuado, que toma en cuenta las condiciones de trabajo a que está sometido el componente, constituye un aspecto determinante para enfrentar los fenómenos de degradación y consecuentemente la aparición de fallas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Society for Metals. (2002). Failure Analysis and Prevention. ASM Metals Handbook, Editorial ASM International. <https://www.asminternational.org>
- American Society of Mechanical Engineers. (2017). BPVC Section I - Rules for Construction of Power Boiler. Boiler and Pressure Vessel Code : ASME. <https://www.asme.org>
- American Society of Mechanical Engineers. (2015). BPVC Section II part A - Ferrous Material Specifications. Boiler and Pressure Vessel Code. Editorial ASME. <https://www.asme.org>
- American Society of Mechanical Engineers. (2018). ASME Section V - Nondestructive Examination. Boiler and Pressure Vessel Code. Editorial ASME <https://www.asme.org>
- Castillo, M., Lugo, L., García, M. y Duffus, A. (16-20 de marzo de 2020). Aplicación inteligente para el diagnóstico preventivo y correctivo de calderas. Informática XVII, Convención y feria internacional, Habana, Cuba <https://dSPACE.uclv.edu.cu/handle/123456789/11598?show=full>
- Collins, J. A. (1993). *Failure of Materials in Mechanical Design :analysis, prediction and prevention*. Editorial John Wiley and Sons. <https://www.worldcat.org/title/failure-of-materials-in-mechanical-design-analysis-prediction-prevention/oclc/765537102?referer=di&ht=edition>
- Fernández-Fuentes, R., Cruz-Crespo, A., Scotti, A. y Guedes-De Alcántara, N. (2021). Evaluación del comportamiento del acero 1,25Cr0,5 Mo en condiciones de fluencia lenta. *Revista Técnica de la Universidad de Zulia*, 44(2), 83-91. <https://doi.org/10.22209/rt.v44n2a03>
- Fernández-Fuentes, R., Scotti, A., Cruz-Crespo, A., Silva, R., Ariza, R. y Guedes-De Alcántara. (2019). Stereological Evaluation of Precipitates within Ferrite Grains in Heat-Treated 1.25Cr0.5Mo Steel Previously Exposed to Service. *Journal of Metallic Material Research*, 2(02), 1-8. <https://doi.org/10.30564/jmmr.v2i2.1017>
- Komai, K. (1998). Failure analysis and prevention in SCC and corrosion fatigue cases. *International Journal of Fatigue*. 20(2), 145-154. [https://doi:10.1016/S0142-1123\(97\)00098-4](https://doi:10.1016/S0142-1123(97)00098-4)
- InduraSA. Manual de aceros inoxidables 2010. Ecuador. <https://www.indura.ec>
- Ministerio de la Inversión Extranjera. (2014). Resolución No.224. *Reglamento del Proceso Inversionista*. Cuba.
- Sadiq, T., Mohd, L. y Idris, J. (2018). Investigation of Microstructure and Mechanical Properties of A335 P11 Main Steam Pipe in Stesen Janaelektrik Jambatan Connaught Power Plant, Malaysia. *Transaction of Indian Institute of Metals*, 71(3), 2527-2540. <https://doi:10.1007/s12666-018-1383-z>
- Sroka, M., Zielinski, A., Dziuba-Kałuża, M., Kremzer, M, Macek, M. y Jasinski, A. (2017). Assessment of the Residual Life of Steam Pipeline Material beyond the Computational Working Time. *Metals*, 7(3), 82-88. <https://doi:10.3390/met7030082>
- Solari, M. (2004). *Inspección basada en riesgo. Sistema integrado de análisis de riesgo. Aptitud para el servicio y análisis de falla*. API RP-580/581 y API RP 579[ponencia]. Buenos Aires, Argentina.

Solari, M. (2012). *La gestión de integridad en las instalaciones industriales*

[ponencia]. Academia Nacional de Ciencias de Buenos Aires, Argentina.

Viswanathan, R. (2004). Coal-Fired Power Plants, Advanced Materials and Processes, August. Editorial ASM International.

Viswanathan, R. (1993). *Damage Mechanisms and Life Assessment of High-Temperature Components*, Editorial ASM International.