

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE GENERAL SAN MARTÍN
COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA
INSTITUTO DE TECNOLOGÍA
“Prof. Jorge A. Sabato”**

**Inspección de fabricación y soldadura,
selección de materiales y asesoramiento
técnico para los proyectos CAREM 25 y
centrales nucleares (NA-SA)(*)**

por Adriana Micaela Alvarez

Director del trabajo

Esp. Ing. Rodrigo Emmanuel Taboada

(*) Trabajo de Seminario para optar al título de Ingeniero en Materiales

República Argentina

2021

Resumen

El presente trabajo final de la carrera de Ingeniería en Materiales comprende un trabajo integral, el cual se divide en asesoría técnica a las centrales nucleares e inspección de soldadura y fabricación de componentes para Atucha I y II.

Dentro de las tareas realizadas en la primera parte se incluye el análisis realizado sobre componentes de válvulas que fueron soldados sin cumplir con las especificaciones técnicas de fabricación de las centrales, corriendo riesgo de sufrir fisuración en caliente. Además se realizó una especificación técnica para el transporte y embalaje de componentes tipo C1. Por otro lado, se llevó a cabo un estudio bibliográfico de aleaciones base níquel, Inconel 718, X-750 y UNS N07752, para su uso en las centrales nucleares de potencia. En dicho estudio se establecen los principales mecanismos de degradación, además se realizó una especificación técnica con los requerimientos mínimos que tiene que cumplir estos materiales.

Finalmente, la segunda parte del trabajo, contempla lo realizado en inspecciones de campo, revisión de registros de fabricación del Liner de contención del reactor CAREM 25 y componentes de las centrales de potencia Embalse, Atucha I y II, teniendo en cuenta el uso de códigos de construcción.

Palabras claves: Inconel 718, Inconel X-750, Fisuración en caliente, Inspecciones de fabricación y soldadura.

Abstract

The present final work of the Materials Engineering degree comprises a comprehensive work, which is divided into technical advice to nuclear power plants and inspection of welding and component manufacturing for Atucha I and II.

Among the tasks carried out in the first part, the analysis carried out on valve components is included that were welded without complying with the technical specifications for the manufacturing of the plants, running the risk of hot cracking. In addition, a technical specification was made for the transport and packaging of C1 type components. On the other hand, a bibliographic study of nickel-based alloys, Inconel 718, X-750 and UNSN07752, for use in nuclear power plants was carried out. In this study the main degradation mechanisms are established, in addition a technical specification was made with the minimum requirements that these materials must meet.

Finally, the second part of the work includes what was done in field inspections, review of manufacturing records of the containment liner of the CAREM 25 reactor and components of the Embalse, Atucha I and II power plants, taking into account the use of building codes.

Key words: Inconel 718, Inconel X-750, Hot cracking, Fabrication and welding inspections.

Índice

1. Introducción	4
2. Asesoramiento técnico para los proyectos CAREM 25 y Centrales Nucleares NA-SA	6
2.1. Aceptación o rechazo de válvulas para Atucha II	7
2.1.1. Introducción	7
2.1.2. Revisión bibliográfica	8
2.1.3. Conclusiones	10
2.2. Especificación técnica para el transporte y embalaje de componentes clase C1 .	11
2.2.1. Introducción	11
2.2.2. Especificación técnica	11
2.2.3. Conclusiones	13
2.3. Revisión de especificación técnica de componentes fabricados con aleaciones de base níquel para internos del reactor	14
2.3.1. Introducción	14
2.3.2. Revisión bibliográfica de aleaciones de níquel	14
2.3.3. Especificación técnica	38
2.3.4. Conclusiones	43
2.4. Conclusiones del trabajo realizado	44
3. Inspecciones de fabricación, soldadura, revisión de documentación y registros	45
3.1. Introducción	45
3.2. Procedimiento de inspección	47
3.3. Inspecciones para NA-SA	48
3.4. Inspecciones para el proyecto CAREM	49
3.5. Conclusiones del trabajo realizado	52

1. Introducción

La Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) lleva adelante varios proyectos dentro de los cuales se encuentra la asesoría a centrales nucleares de potencia y la construcción del prototipo del CAREM 25, entre otros. El Grupo de Inspección e Ingeniería de Materiales y Componentes (GIIMC) de la Gerencia Materiales (GMAT), se encarga de brindar asesoramiento técnico a las diversas consultas de NA-SA (Atucha I, Atucha II y Embalse) (Figura 1a) y el proyecto CAREM (Figura 1b), tanto en la selección de materiales así como en el seguimiento durante las etapas de fabricación de los componentes metálicos.

El asesoramiento técnico requiere de la evaluación de diferentes áreas de la ingeniería en materiales, incluyendo una amplia investigación de los contextos de funcionamiento de las centrales de potencia, teniendo en cuenta sus requisitos particulares debido a los años en servicio, como así sus respectivos fabricantes.

Por otra parte, la inspección de fabricación de componentes soldados o no implica una tarea integral de varias áreas de la ingeniería. Antes del inicio de la fabricación es necesaria la revisión y aprobación de una gran cantidad de documentos de ingeniería (procedimientos de soldadura, calificación de procedimientos, planes de inspección, planes de tratamientos térmicos, certificados de materiales, etc). A su vez, posteriormente a la revisión y aprobación de esta documentación, se deben realizar inspecciones periódicas durante la fabricación, para asegurar el cumplimiento de todos los requerimientos establecidos en las especificaciones técnicas e instructivos de trabajo y control, entre otros documentos pertinentes a las tareas de fabricación.



(a) Centrales nucleares Atucha I y II

(b) CAREM-25

Figura 1: Centrales nucleares

Como parte del trabajo final de la carrera de Ingeniería en Materiales, se resolvieron consultas técnicas y se realizaron inspecciones de fabricación de componentes soldados (Liner de contención), como también de la fabricación de componentes del primario de las centrales de potencia (Tubo Guía Atucha I). Durante este trabajo se aplicaron los conocimientos adquiridos durante la carrera, a su vez se generó el primer contacto con la industria nuclear.

Debido a las tareas realizadas a lo largo del trabajo de tesis, se detallan a continuación los temas abarcados en dos capítulos:

■ **Asesoramiento técnico:**

- Análisis de aceptación o rechazo de lotes de componentes de acero inoxidable austenítico, pertenecientes a válvulas de presión, que incumplían los requerimientos microestructurales.
- Especificación técnica para el transporte y embalaje de componentes de materiales metálicos de uso nuclear, clase C1.
- Estudio bibliográfico de aleaciones base níquel, empleadas para la fabricación de componentes de uso nuclear. Se lleva a cabo una investigación amplia sobre los usos, tratamientos térmicos, fenómenos de degradación, entre otros requerimientos de las aleaciones Inconel 718, X-750 y UNS N07752. Dicho estudio fue solicitado para actualizar los requerimientos de una especificación técnica para Atucha I y II, sobre estas aleaciones y su uso como internos del reactor.

■ **Inspección de fabricación y soldadura:**

- Se informa las principales experiencias, desarrollando los contextos, los requerimientos tenidos en cuenta, los desvíos de la fabricación y los registros correspondientes, de las inspecciones realizadas.
- Se detalla el procedimiento de inspección empleado durante las inspecciones de fabricación de componentes soldados y no soldados.

2. Asesoramiento técnico para los proyectos CAREM 25 y Centrales Nucleares NA-SA

En este capítulo se desarrollan diferentes temas abarcados en respuesta ante diferentes consultas técnicas.

Uno de los principales trabajos realizados, fue la búsqueda bibliográfica sobre aleaciones de base níquel, Inconel 718, X-750 y su uso en el primario de reactores nucleares. Así mismo se propuso el uso de la aleación 752, presentada por la agencia EPRI [1], que presenta mejores propiedades que la aleación X-750 para usos en el refrigerante del reactor.

En principio se abarcan los principales requerimientos de estos materiales, la experiencia en servicio y también se desarrollan los principales tipos de degradación que sufren.

Por otro lado, se asesoró a la empresa NA-SA sobre la aceptación o rechazo de un lote de componentes de acero inoxidable austenítico, correspondientes a un conjunto de válvulas de presión que no cumplían con los requerimientos mínimos indicados en la especificación técnica. La consulta surge porque contenían un porcentaje menor de ferrita δ a las solicitadas en la especificación técnica del componente, siendo, además, menor a las recomendadas en las normas y buenas prácticas de fabricación. Dicho requerimiento busca evitar que las uniones soldadas sufran de fisuración en caliente.

También se realizó una especificación técnica para el embalaje y transporte de componentes clase C1, siendo componentes metálicos que trabajan a altas temperaturas en centrales nucleares. En dicho documento se desarrollan los principales requerimientos para una correcta conservación y seguridad de los componentes durante el traslado de los mismos.

A continuación, se expone cada problema con la resolución propuesta.

2.1. Aceptación o rechazo de válvulas para Atucha II

2.1.1. Introducción

Durante mi trabajo final de carrera, el GIIMC fue contactado para asesorar a NA-SA en la aceptación o rechazo de lotes de componentes de acero inoxidable DIN 1.4550 (AISI 347), comprendidas en válvulas de presión. Estos componentes se encontraban soldados, con una junta en la cual ambos materiales son de AISI 347. Estos componentes no cumplían con los requerimientos microestructurales, ya que no cumplían con los requerimientos mínimos de ferrita δ . El fabricante pretendió entregar los lotes ya que alegaba que no hubo problemas durante la deposición de la soldadura.

Las partidas de las piezas de insertos y discos, componentes de los juegos de fuelles para válvulas de reemplazo en el CNA II, se fabricaron sin cumplir con las Especificaciones de internos del reactor RE-L 5002/E [2], de ahora en más denominaremos REL. Las REL son documentos internos de NA-SA que establecen los requerimientos técnicos y de calidad que deben cumplir los diferentes componentes de cada sector de las centrales Atucha. En este caso en particular se utilizó la correspondiente a los componentes utilizados como internos del reactor. En dichos requerimientos se establece que el material semielaborado austenítico debe tener entre de 2-10 % de contenido de ferrita δ , recomendando un porcentaje entre 4 a 8 %.

Por su parte, NA-SA solicitó al proveedor que informe la cantidad de ferrita delta en los componentes soldados, cuyos resultados, realizados metalográficamente, muestran que los contenidos máximos y mínimos son de 3 y 1 % respectivamente. La Figura 2 muestra los resultados de las metalografías realizadas por el fabricante.

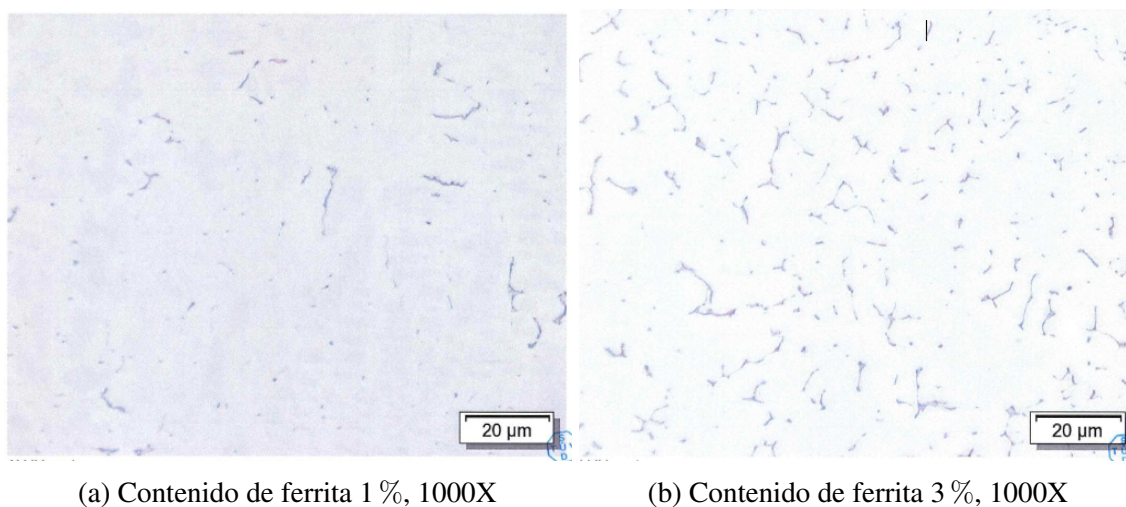


Figura 2: Micrografías para la determinación del porcentaje de ferrita δ

Por lo tanto, el presente trabajo se limita a tratar los posibles problemas que se pueden desencadenar al tener una menor fracción de ferrita δ de la indicada en la REL [2] y la recomendación de aceptación o rechazo de los lotes recibidos.

2.1.2. Revisión bibliográfica

Los aceros inoxidable austeníticos son aceros de alta aleación cuyas características destacables son las excelentes propiedades mecánicas con buena resistencia a la corrosión en diversas condiciones de servicio. Las operaciones de soldadura en estos materiales deben asegurar niveles aceptables de su resistencia a la corrosión.

Los posibles problemas que pueden ocurrir en la soldadura de aceros inoxidable austeníticos con una menor fracción de ferrita δ son la fisuración en caliente y la sensibilización. A continuación, se detalla la influencia de la presencia de ferrita δ en la aparición de estos fenómenos.

2.1.2.1. Fisuración en caliente

La fisuración en caliente, también conocida como fisuración por solidificación, consiste en la formación de fisuras en los bordes de grano durante la solidificación debido a las restricciones a la libre contracción. Durante la solidificación se producen deformaciones localizadas en el líquido las cuales tienden a producir fisuras.

Por otro lado, la presencia de impurezas como el Azufre y el Fósforo se concentran en el último líquido a solidificar, aumentando el rango de solidificación y por ende aumenta el rango crítico de fisuración. Esto sucede debido a la segregación de las impurezas en el líquido. Sin embargo, una baja fracción de ferrita δ , actúa como atrapadora de impurezas nocivas, ya que la solubilidad de las mismas es mayor en la ferrita que en la austenita. Con lo cual, una fracción de ferrita δ evita la fisuración en caliente.

La composición química define los modos de solidificación, es decir, las fases primarias que se forman durante la solidificación. Los modos en los aceros inoxidable austeníticos pueden ser de tres tipos: A, AF, FA.

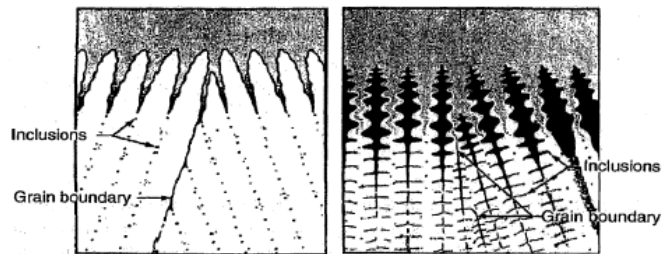
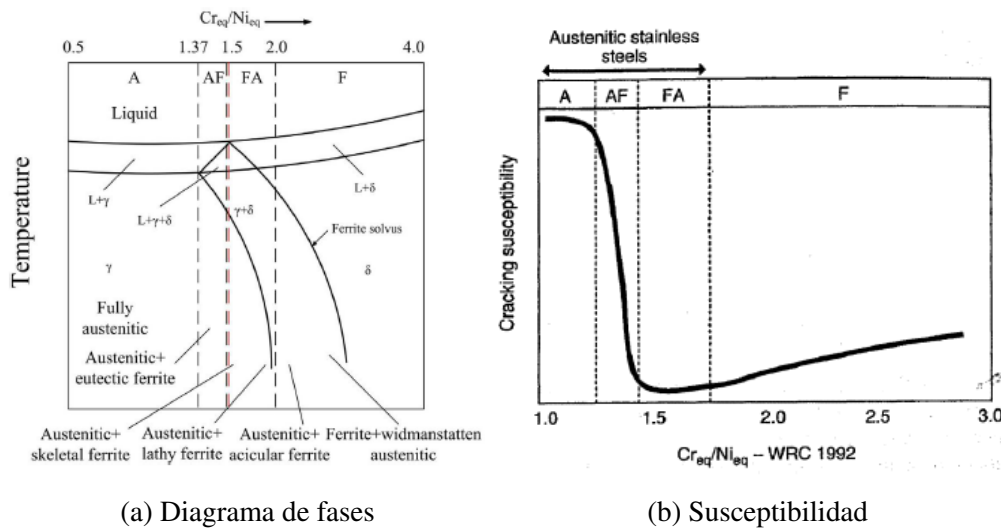
Teniendo en cuenta el diagrama de equilibrio (Figura 3a), en función de los valores de la relación $Cr_{equivalente} / Ni_{equivalente}$ se tienen los diferentes modos de solidificación:

- Modo A: Se presenta para una relación entre 0,5 y 1,37, en la cual la fase primaria de solidificación es la austenita.
- Modo AF: Se presenta para una relación entre 1,37 y 1,5, en la cual la fase primaria de solidificación es la austenita y luego hay formación de ferrita.
- Modo FA: Se presenta para una relación entre 1,5 y 2,0, en la cual la fase primaria de solidificación es la ferrita y luego hay formación de austenita.

Por otro lado, la energía de interfase γ/δ es menor a la energía de interfase γ/γ , con lo cual el líquido puede mojar la interfase γ/γ , pero no puede mojar γ/δ . Esto permite que pueda soportar mayores deformaciones durante la contracción por solidificación. La composición química para los rangos A o AF son más susceptibles a la fisuración en caliente. Mientras que en el modo FA es se obtienen los porcentajes de ferrita δ adecuados para evitar este problema. Además, el modo FA tiene una estructura tortuosa, la cual hace de barrera a la propagación de posibles fisuras o microfisuras que puedan aparecer.

Durante la soldadura se puede regular el porcentaje de ferrita δ por medio del metal de aporte. Si se utilizan electrodos con una composición mayor de alfégenos a la del material base y a su vez se aplica un bajo calor aportado para evitar una elevada dilución, se puede generar

un modo de solidificación dentro del rango FA. Utilizando el diagrama WRC-1192 se puede predecir el comportamiento durante la solidificación y el contenido de ferrita delta [3].



(c) Morfología de los Modos A vs FA

Figura 3: Modos de solidificación

2.1.2.2. Sensibilización

Otro mecanismo de daño secundario que puede ocurrir en los aceros inoxidables austeníticos, es lo que se conoce como sensibilización. Se da a causa del empobrecimiento de Cromo en las zonas aledañas de los carburos que se forman durante ciertos ciclos térmico de la soldadura. Estos carburos nuclea preferentemente en los bordes de grano, conduciendo a la corrosión localizada en los bordes de grano. La ferrita δ tiene un efecto benéfico al aumentar la resistencia a la sensibilización. Al tener la ferrita una estructura BCC, elementos como el Carbono y Nitrógeno son menos solubles y por lo tanto los fenómenos de precipitación son más intensos en la ferrita. Ante un tratamiento térmico durante la soldadura a temperaturas entre 600° y 800°C la precipitación de carburos $M_{23}C_6$ se da preferentemente en la interfase ferrita-austenita, pero la presencia de ferrita δ redisuelve rápidamente los carburos revirtiendo la sensibilización y por ende el proceso de corrosión intergranular en el cordón de soldadura [4, 5].

Por lo tanto, para prevenir los problemas presentados anteriormente, se requiere una fracción mínima de ferrita δ , aproximadamente entre un 4 y 8 %.

2.1.3. Conclusiones

A partir de la información proporcionada por el cliente (NA-SA) y los requerimientos generales establecidos para los componentes ya nombrados, se destacan los siguientes puntos:

- El incumplimiento de los valores mínimos de ferrita δ , requeridos por la especificación técnica del constructor de las centrales, puede generar problemas de fisuración en caliente en piezas soldadas. El ensayo metalográfico realizado solamente en una de las partidas, no puede garantizar la ausencia de microfisuras que se puedan desencadenar en el corto y/o largo plazo, ya que en los resultados de los ensayos obtenidos muestran que el máximo valor de ferrita δ alcanza el 3 % en algunas zonas puntuales.
- Los componentes forman partes de válvulas con lo cual seguramente estarán expuestos a cargas cíclicas, se desconoce la aplicación y criticidad de las mismas.
- El fabricante continuó fabricando piezas a pesar del conocimiento del no cumplimiento con los requisitos mínimos de ferrita δ .

Se concluye que los componentes de insertos y discos de acero inoxidable DIN 1.4550, con un contenido máximo de ferrita δ del 3 % y un mínimo del 1 % no son aptos para la utilización y/o reemplazo en el CNA II debido a su bajo contenido de ferrita δ .

El ensayo metalográfico realizado es poco representativo, ya que no se puede garantizar que todo el material se encuentre en los rangos solicitados a pesar de tener un valor máximo aproximado al 3 %.

A su vez, el fabricante continuó con la manufactura de las válvulas, con conocimiento del no cumplimiento de los requisitos de ferrita δ mínimos establecidos en la especificación técnica, solamente confiando en que no hubo fallas durante el proceso de soldadura. Es importante destacar que, a raíz del incumplimiento de los valores mínimos de ferrita δ , se puede ocasionar fisuración en caliente, durante el proceso de recubrimiento por soldadura, que se aplica a los insertos y discos de las válvulas.

Finalmente se desconoce la criticidad de los componentes y cómo pueden afectar las tensiones aplicadas en servicio al comportamiento de las microfisuras generadas en las soldaduras. En caso de que existan microfisuras estas se pueden propagar espontáneamente por las altas concentraciones de tensiones que tienen en sus bordes. Por este motivo no se puede garantizar que el componente no vaya a fallar cuando este en servicio y se recomienda el rechazo de los componentes de las partidas.

2.2. Especificación técnica para el transporte y embalaje de componentes clase C1

2.2.1. Introducción

Se llevó a cabo una especificación técnica (ET) donde se detallan los requerimientos para el transporte y embalaje de materiales y componentes clase C1, siendo componentes metálicos que estarán sometidos a altas temperaturas en la central nuclear Atucha II (CNA II). En esta ET se establecen los requerimientos que deberá cumplir el Fabricante, aplicables a la provisión de materiales, desde preservación, diseño de empaque, condiciones de transporte, cartelería, manipulación y depósito.

A continuación, se detallan los requerimientos establecidos para la ET, donde se tuvieron en cuenta los requisitos establecidos en la REL [2].

2.2.2. Especificación técnica

2.2.2.1. Embalaje

Las instrucciones para el embalaje deben contener al menos la siguiente información:

- Tipo de embalaje.
- Tipos de agentes desecantes.
- Planos del empaquetamiento, incluyendo los elementos de refuerzos.
- Tipo de transporte.

Al seleccionar el embalaje, se tiene que tener en cuenta la ruta de transporte, el destino y a las condiciones relevantes específicas para el proyecto. Todos los componentes deben estar protegidos de daños mecánicos y suciedad, estando correctamente embalados en un paquete cerrado y resistente.

2.2.2.2. Artículos fabricados con aceros de baja aleación o no aleados

Los artículos fabricados con aceros de baja aleación o sin alear tiene que protegerse contra la contaminación (como polvo, aceite, sal) y contra la corrosión que se produce durante el transporte y el almacenamiento. Esta preservación puede tomar la forma de recubrimiento como, por ejemplo, recubrimientos decapables, conservantes a base de petróleo o envoltentes a prueba de vapor de agua con desecantes o papel VCI. En ciertos elementos como, por ejemplo, tuberías y estructuras de soporte pueden ser liberados para el envío sin haber sido conservados si solo se puede esperar corrosión superficial que no provoque una reducción del espesor del material en cualquier parte del artículo, por debajo del mínimo especificado.

2.2.2.3. Artículos fabricados de aceros austenítico al cromo níquel, aceros al cromo de alta aleación y aleaciones base níquel

Los artículos fabricados con aceros austeníticos al cromo-níquel, aceros al cromo de alta aleación y aleaciones de níquel deberán estar protegidos contra la contaminación (como polvo, aceite, contaminación ferrítica y sal) que surja durante el transporte y almacenamiento.

2.2.2.4. Materiales de embalajes

Los conservantes, materiales de embalaje y materiales de relleno que entren en contacto directo con las superficies de los componentes deben ser no corrosivos.

A continuación, se detallan los materiales antes mencionados:

Tapones y tapas: Tapones y tapones de polietileno (PE) o metal (mismo material que el metal base).

Cinta adhesiva: Cinta autoadhesiva a base de PE o fibra textil, no corrosiva.

Caucho:

- SBR (caucho de estireno-butadieno).
- EPR o EPTR (caucho de etileno-propileno, caucho de terpolímero de etileno propileno).
- NBR (Caucho de nitrilo, caucho de acrilonitrilo butadieno).

Envolturas: Polietileno, papel de embalaje químicamente neutro.

2.2.2.5. Transporte

Para el transporte de los componentes de grandes volúmenes y pesados, el fabricante tiene que preparar un estudio de transporte. El estudio de transporte debe contener al menos la siguiente información:

- Objetos, sus dimensiones exteriores y peso.
- Tipo de transporte (terrestre, aéreo o marítimo).
- Ruta, tiempo y tipo de transporte.

2.2.2.6. Recubrimientos primarios

En materiales que no tengan buena resistencia a la corrosión se pueden aplicar capas protectoras para las superficies de los artículos.

2.2.2.7. Recintos a prueba de vapor de agua

En el caso de componentes que requieran protección contra la corrosión y en los cuales no se pueda realizar recubrimientos, se debe utilizar cerramientos a pruebas de vapor de agua.

Para hacer el cerramiento generalmente se emplea polietileno u hojas multicapa de aluminio, y antes de sellar térmicamente se extrae el aire. Estos cerramientos se someten a pruebas de retención de vacío.

Además, dentro de las envolturas se pueden utilizar ciertos agentes desecantes para brindar una mayor protección. La cantidad mínima necesaria de acuerdo al componente se establece en la norma DIN 55474.

Otra forma de hacer envolturas es con la utilización de papel VCI el cual es un anti-corrosivo de volátiles.

2.2.2.8. Paquetes

Se debe diseñar de tal manera que puedan ser estables y de materiales o formas antiderrape. Cuando se utilicen cajones tienen que estar diseñados de tal manera que soporten los esfuerzos de acuerdo al componente, además de tenerse en cuenta el apilamiento de las mismas.

La utilización de madera laminada o contrachapada implica una mayor resistencia a la intemperie, además con la utilización de sellos impermeables se evitará la entrada de agua.

También hay que asegurarse de que no se deslice el contenido dentro de los cajones durante el transporte (se puede usar anclajes, pernos, etc).

Para tuberías o productos similares, hechos de aceros no aleados o de baja aleación, se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Sujetar con perfiles de acero en forma de U o L utilizando pernos roscados. No se permite empaquetar con madera.
- Utilización de capas de madera contrachapada resistente a la intemperie entre tubos.

2.2.2.9. Manipulación

La manipulación durante el ascenso y descenso de transporte, traslado y almacenamientos de los componentes debe ser tal que no se dañe la protección de los mimos. Durante el traslado hay requerimientos específicos para evitar que los componentes se deslicen o estén en contacto entre componentes.

2.2.3. Conclusiones

Se establecieron los criterios mínimos para el embalaje y transporte de componentes de clase C1. Hay componentes que tienen requerimientos especiales de acuerdo a sus características de uso, degradación, terminación superficial, ensayos, etc. Es importante destacar que a pesar de estar establecidos los requerimientos de transporte y embalaje en normas internacionales (DIN), se pueden, establecer requerimientos adicionales siempre y cuando sean superadores a los indicados en las normativas de respaldo.

2.3. Revisión de especificación técnica de componentes fabricados con aleaciones de base níquel para internos del reactor

2.3.1. Introducción

Como parte de las tareas que el GIIMC realiza, se recibió una solicitud por parte del personal de NA-SA, en la cual requerían la realización de una especificación técnica, (ET), actualizada para la fabricación de componentes del primario de las centrales Atucha I (CNAI) y Atucha II (CNAII). La ET solicitada debe cubrir los requerimientos mínimos de los materiales de aleaciones de base níquel ya establecidos para internos de los reactores CNAI y CNAII, [2].

La solicitud de NA-SA se requería para establecer los requerimientos mínimos para la compra de materiales de aleaciones X-750 y 718 para la fabricación de bulones y resortes, los cuales serían usados en internos del reactor.

A partir de la información en la REL [2] para internos de reactor, se decidió realizar una búsqueda bibliográfica y analizar si los requerimientos establecidos por el fabricante de las centrales quedaron superados por los nuevos códigos de fabricación (ASME II SB 637 [6] KTA 3204 [7]).

Por lo tanto con la información recolectada se llevó a cabo una nueva ET, actualizando los requerimientos mínimos que deben cumplir las aleaciones de base níquel Inconel X-750 e Inconel 718. Es importante destacar que estos requerimientos técnicos deben ser cumplidos por el fabricante, incluyendo la provisión de materiales, ingeniería de fabricación, fabricación, exámenes y prueba de los componentes y partes incluidas en estos componentes.

Para este trabajo de ingeniería se utilizaron códigos de construcción ASME II SB 637 [6], KTA 3204 [7], especificaciones de internos de las CNAI y CNAII (REL)[2]. Asimismo, se utilizó información de la experiencia previa en servicio de estos materiales, recolectada por Electric Power Research Institute (EPRI), así como también la información proporcionada por el fabricante Special Metals.

Este trabajo no incluye los procesos de fabricación de los componentes, ni los requerimientos para la unión por soldadura de los mismos, ya que se dan por aprobados los ya redactados para las centrales.

2.3.2. Revisión bibliográfica de aleaciones de níquel

A continuación se desarrollan los diferentes puntos del estudio bibliográfico. En esta sección se encuentran las principales propiedades mecánicas para los tratamientos térmicos, características microestructurales de las aleaciones Inconel X-750 e Inconel 718, sus formas típicas de degradación, así como las fallas presentadas en servicio en componentes internos de reactores nucleares.

Las aleaciones de base níquel (Ni) tienen una matriz austenítica debido a que el elemento principal es el Ni. Estas aleaciones son muy utilizadas en una variedad de industrias, como por ejemplo en generadoras de energía, petroquímicas, químicas y aeroespaciales.

El amplio desarrollo y uso de estas aleaciones puede atribuirse a dos características únicas del Ni. En primer lugar, el Ni puede disolver altas concentraciones de elementos de aleación en comparación con otros metales. Además, la adición de cromo (Cr) y/o aluminio (Al) al Ni

proporciona una excelente resistencia a la corrosión. Mientras que la adición de titanio (Ti) y Al promueve la precipitación de fases ordenadas, confiriendo a estos materiales buena resistencia mecánica a altas temperaturas de trabajo. Esto permite el uso de aleaciones de base níquel en una amplia variedad de aplicaciones que requieren protección debido a diversas formas de degradación, como la corrosión en medios acuosos o con sulfuros.

Las aleaciones de base níquel endurecidas por precipitación como la aleación X-750 y 718, las cuales son presentadas en este trabajo tienen aleantes agregados como Aluminio, Titanio, Niobio entre otros. En cantidades apropiadas estos aleantes proporcionan una buena resistencia mecánica y resistencia a la corrosión en diversos ambientes y en rangos de temperatura extremos. Las aleaciones de base níquel endurecibles por precipitación, son también conocidas por superaleaciones de base níquel debido a sus óptimas propiedades.

Las aleaciones de base de níquel se pueden utilizar a temperaturas criogénicas, como a temperaturas cercanas a 1200 °C, ya que la matriz se mantiene austenítica conservando buena resistencia a la corrosión desde la solidificación hasta el cero absoluto[1, 8].

2.3.2.1. Producción de aleaciones de base Níquel

Actualmente, existen numerosas instalaciones de producción de aleaciones de níquel en todo el mundo. Los métodos de fusión utilizados para las aleaciones de níquel van desde la fusión simple por inducción de aire (AIM), hasta los complejos procesos de fusión triple requeridos por algunas especificaciones de piezas giratorias de turbinas de gas. La fusión triple normalmente implica una combinación de fusión por inducción al vacío (VIM), refundición por electroescoria (ESR) y refundición por arco al vacío (VAR). El proceso de triple fusión se utiliza a menudo para producir Superaleaciones que requieren niveles de impurezas excepcionalmente bajos para propiedades de alta resistencia a la fatiga a alta temperatura.

Otros métodos de fusión utilizados son la fusión en horno de arco eléctrico, seguido por inyección de argón, oxígeno y descarburación (AOD), ESR presurizado y VIM/VAR combinados. El proceso AOD permite el control cuidadoso del carbono, mientras protege contra la pérdida de cromo debido a la presencia de argón en el gas decarburante, inyectado en el baño líquido. El proceso ESR presurizado permite la introducción de nitrógeno en la masa fundida de aceros inoxidables que contienen hierro para la producción de aleaciones resistentes a la corrosión por picado y corrosión por rendijas. Los métodos de fusión al vacío (como VIM/VAR) se emplean para eliminar gases como el oxígeno y el nitrógeno, reduciendo así los óxidos y nitruros a niveles muy bajos. La ESR es capaz de reducir el azufre y otros elementos que pueden eliminarse mediante la reacción de la escoria.

Una vez que se ha completado la fusión, el procesamiento en varias formas, como placa, hoja, barra y alambre, se logra mediante una serie de operaciones convencionales de trabajo en caliente y en frío con operaciones de recocido aplicadas según sea necesario.

La colada continua ha encontrado poco uso para la producción de aleaciones de níquel, principalmente debido a la naturaleza especial de la mayoría de las aleaciones de níquel que limita el uso de grandes masas fundidas y tiradas continuas de la misma aleación. Por tanto, se producen lingotes de fundición convencional a partir de los procesos de fusión anteriores.

La mayoría de las formas de productos terminados se producen mediante una combinación de laminado en caliente y en frío con recocido, granallado y decapado. Los tubos sin costura y

algunas formas se producen mediante extrusión en caliente y posterior trabajo en frío.

Las aleaciones simples, como el níquel comercialmente puro, a veces se pueden laminar o estirar sin un paso de recocido intermedio, contrariamente a la mayoría de las aleaciones de níquel, las cuales requieren un recocido intermedio para inducir la recrystalización y el ablandamiento para, de esta manera, permitir una mayor reducción de sección [8].

2.3.2.2. Aleación 718

La aleación 718 es una superaleación base níquel, la cual tiene una alta resistencia en un amplio rango de temperaturas de trabajo. Esta aleación se puede utilizar en un rango que va desde los -250 ° hasta los 700 °C. Tiene muy buena resistencia a la fatiga, fluencia, rotura y a la corrosión. La resistencia general a la corrosión de la aleación 718 se debe principalmente a su contenido de níquel y cromo. Además su capacidad para endurecerse por precipitación se debe principalmente a la presencia de niobio, pero también contribuyen el tantalio, el aluminio y el titanio.

Esta aleación se desarrolló originalmente para su uso en aplicaciones de alta temperatura donde se requiere buena resistencia a la corrosión gaseosa y alta resistencia, como en turbinas de gas. La misma proporciona enormes oportunidades de diseño con una excelente vida útil a la fatiga a temperaturas de servicio hasta 760 °C, cuando está diseñado correctamente.

En aplicaciones de plantas de energía nuclear, se ha incorporado su uso en reactores de agua ligera (LWR) para la fabricación de componentes como pernos, resortes y otros componentes estructurales en reactores de agua presurizada y en ebullición (PWR y BWR). Generalmente se utiliza en zonas donde se requiere una alta resistencia a la corrosión similar a la de la aleación 600, con la diferencia que posee una mayor resistencia mecánica y mayor resistencia a la fatiga. La aleación 718 se ha utilizado en varias aplicaciones en PWR, que implican contacto con el refrigerante del reactor, como los resortes de sujeción del conjunto de combustible, los tornillos de resorte de la boquilla superior, las rejillas espaciadoras del conjunto de combustible, los resortes de sujeción de los componentes del núcleo y los sellos de la vasija del reactor. A su vez, se ha utilizado en componentes de válvulas de sistemas secundarios como diafragmas, resortes, entre otros.

2.3.2.2.1 Experiencia en servicio

En general la aleación 718 ha desempeñado un buen trabajo en reactores nucleares. Sin embargo, han habido algunos informes de fallas en servicio en resortes causadas por fatiga y algunos casos de corrosión bajo tensión (SCC) de los tornillos del resorte del conjunto de combustible. Cambios de diseño parecen haber resuelto los problemas de falla por fatiga en resortes y mejoras del proceso de fabricación aumentaron la resistencia al SCC.

En 1987 se informó que con la aleación 718 se habían fabricado rejillas espaciadoras de ensambles de combustible, resortes de sujeción de ensambles de combustible y de sujeción de componentes en núcleos, recipientes de reactores, juntas tóricas del presurizador, y varios componentes de válvulas secundarias. En ese informe se reportaron fallas por fatiga de algunos de los resortes de sujeción de ensambles de combustibles y componentes[1].

Luego se reportaron fallas de corrosión bajo tensión en ambientes de agua del primario del reactor (PWSCC) en la aleación 718 en 1999 y 2003[1].

A continuación se presentan algunos casos de fallas que ocurrieron en componentes fabricados con la aleación 718:

Fallo por fatiga de los resortes de sujeción del conjunto de combustible y de componentes

En resortes de sujeción del conjunto de combustible de B&W se han presentado fallas por fatiga. Las fallas se produjeron en alambres que fueron laminados en caliente, recocidos a 1038 °C decapados, trefilados en frío, recocidos a 982 °C nuevamente decapados y trefilados en frío, enrollados y envejecidos a 718 °C. También ocurrieron fallas por fatiga en resortes de sujeción de componentes. El tratamiento termomecánico que se realizó a estos resortes fue: recocido, trefilados en frío, enrollado en resortes y envejecido a 718 °C durante 8 h más 621 °C durante 10 h.

En ambos casos las fallas en servicio se atribuyó a la fatiga generada por rozamiento con componentes. Por lo tanto, se realizaron mejoras del diseño y las fallas por esas causas no volvieron a ser reportadas [1].

Fallas por PWSCC de los tornillos de resorte de la boquilla superior del conjunto de combustible

Ocurrieron fallas en tornillos del resorte de la tobera superior del conjunto de combustibles hechos de aleación 718 en el período 1998-2003. Se fabricaron con material que se endureció por envejecimiento después de laminar las roscas. La morfología de las fisuras fue intergranular compatible con PWSCC. Las correcciones que se realizaron para mejorar la resistencia al PWSCC consistió en realizar un tratamiento por granallado junto con una secuencia de fabricación mejorada [1].

2.3.2.2.2 Composición química

La composición química de la aleación 718 o UNS N07718 de acuerdo a ASME SB 637 [6] o también llamado $\text{NiCr}_{19}\text{Fe}_{19}\text{Nb}_5\text{Mo}_3$ (DIN 2.4668) de acuerdo a la KTA 3204 [7] se presenta en la Tabla 1. Para su uso en reactores nucleares hay que limitar el contenido de cobalto, ya que es un elemento radioactivo y puede incrementar las dosis de exposición durante las reparaciones de los componentes.

Material	UNS N07718
Elemento	% en peso
Carbono	Max 0,08
Manganeso	Max 0,35
Silicio	Max 0,35
Fósforo	Max 0,015
Azúfre	Max 0,015
Cromo	17,00 - 21,00
Níquel	50,0 - 55,00
Cobalto	Max 0,1
Niobio + Tantalio	4,75 - 5,50
Titanio	0,65 - 1,15
Aluminio	0,20 - 0,80
Hierro	Bal
Cobre	Max 0,30
Boro	Max 0,006
Molibdeno	2,80 - 3,30

Tabla 1: Composición química para la fabricación de los componentes de Inconel 718[6].

2.3.2.2.3 Tratamiento termomecánicos y propiedades mecánicas

Los tratamientos termomecánicos típicos que se aplican en los diferentes semielaborados y/o productos de la aleación 718 se presentan en la Tabla 2. Mientras, las propiedades mecánicas mínimas exigidas a temperatura ambiente, en función de las diferentes especificaciones para tratamientos térmicos mencionados, se presentan en la Tabla 3.

Especificación	Tratamiento termomecánico
AMS 5596 – laminados, placas ASTM B 670 AMS 5662 AMS 5663 – barras, forjados ASME SB 637	Recocido de solubilización entre 927 °C – 1010 °C entre 1–2 h; Envejecimiento a 718°C por 8 h; Enfriamiento en horno hasta 621 °C Mantener a 621 °C hasta completar 18 h de envejecimiento; Enfriamiento al aire
AMS 5597 – laminas, placas y strip AMS 5664 – barras, forjados y rings	Recocido de solubilización entre 1038 °C–1066 °C; envejecimiento a 760°C por 10 h; enfriamiento en horno hasta 649 °C, mantener a 649 °C hasta completar 20 h de envejecimiento; enfriamiento al aire

Tabla 2: Tratamientos termomecánicos para Inconel 718 [1].

Especificación	Resistencia mecánica [MPa]	Tensión de fluencia [MPa]	Estricción %	Dureza
AMS 5596 ASTM B 670	1241	1034		36 HRC
AMS 5662 AMS 5663 ASTM B ASME SB 637	(1241, 1241, 1276) ^a	1034	(8, 12, 15) ^a	331 HB
AMS 5597	1241	1034		38 HRC
AMS 5664	1241	1034	12-15	341 HB

Tabla 3: Propiedades mecánicas para diferentes especificaciones de Inconel 718 [1].

^aEl valor más alto para la dirección longitudinal, el valor medio para la dirección transversal larga de las piezas forjadas y el valor más bajo para la dirección transversal de las barras

Si se trabaja con el material con un tamaño de grano fino (ASTM N° 5 como mínimo), se podrán obtener buena resistencia a la fatiga [1].

Las propiedades mecánicas típicas a alta temperatura de la aleación 718, con un tratamiento del tipo recocido y envejecido se presentan en la Figura 4.

Es evidente que la aleación 718 presenta excelentes propiedades mecánicas en un amplio rango de temperaturas, incluso a bajas temperaturas, permitiendo su aplicación en reactores nucleares.

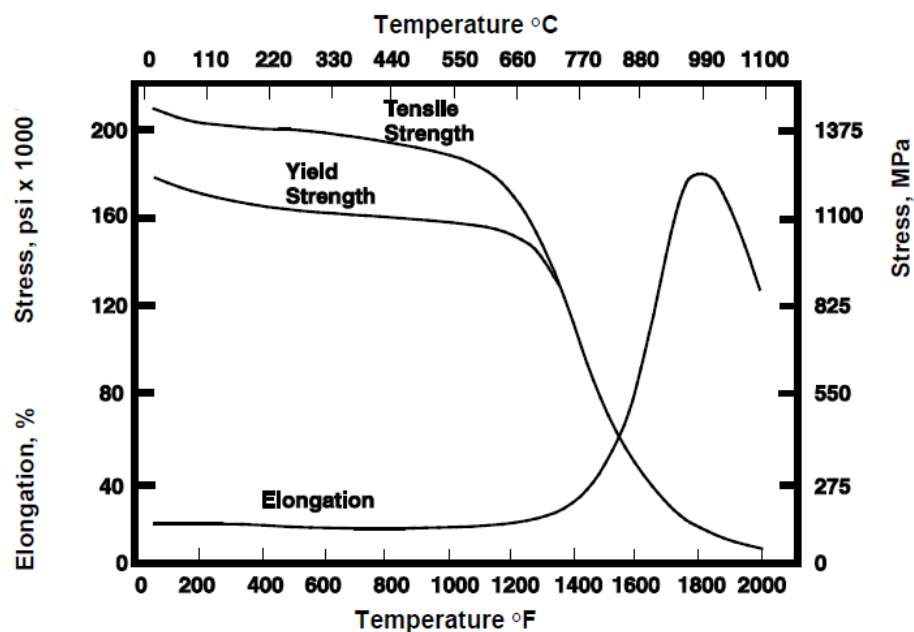


Figura 4: Propiedades de alta temperatura de una barra de 12,7 mm de diámetro, laminada en caliente, con un recocido de 982 °C durante 1 h y envejecido a 718 °C durante 8 h, enfriado en horno a 621 °C, mantenida a 621 °C con un tiempo de envejecimiento total de 18 horas[1, 9].

Alambres para resortes

El Inconel 718 tiene excelente resistencia a la relajación, lo cual lo hace muy atractivo para el uso de resortes a temperaturas mayores a 594 °C. En la Figura 5 se presentan algunos datos de relajación de resortes helicoidales [9]. A su vez, según la bibliografía consultada, el tratamiento térmico recomendado para el uso de estas aleaciones como resortes se indica en la Tabla 4.

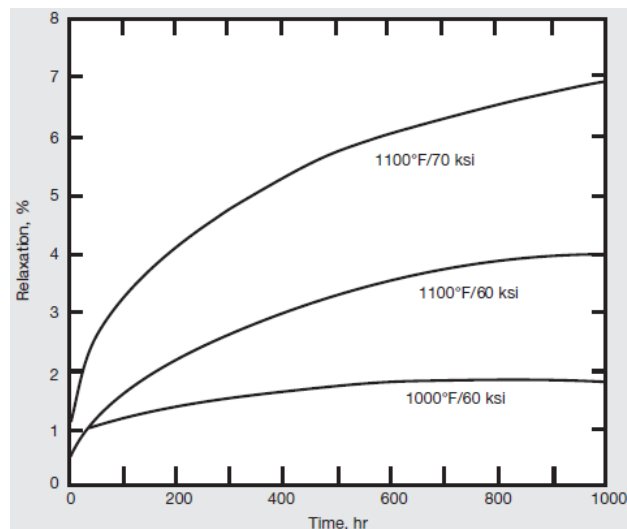


Figura 5: Relajación de resortes helicoidales de 3,76 mm de diámetro, de alambre endurecido N° 1 [10] y trefilado . (Resortes recocidos 982 °C/1 h y envejecido 718 °C/8 h, enfriado en horno hasta 621 °C y mantenido durante un tiempo total de envejecimiento de 18 h [9].

Componente	Tratamiento termomecánico	Resistencia mecánica [MPa]	Tensión de fluencia [MPa]
Resortes [1, 7]	Recocido de solubilización entre 982 °C - 1010 °C durante 1h; de 15 a 30 % de reducción de en frío; envejecimiento a 718 °C durante 8 h enfriar a 60 °C/h hasta 621 °C y mantener durante 8 h, enfriar al aire	1448	1365

Tabla 4: Tratamientos termomecánicos para resortes de Inconel 718 [1, 7].

2.3.2.2.4 Tamaño de grano

Para los resortes de Inconel 718 se recomienda que tengan un tamaño de grano ASTM N°5 o menor. En la Figura 6 se presenta el efecto en el tamaño de grano para tratamientos de recocidos a diferentes temperaturas durante 30 min para productos laminados de Inconel 718 con diferentes porcentajes de trabajado en frío [1, 9].

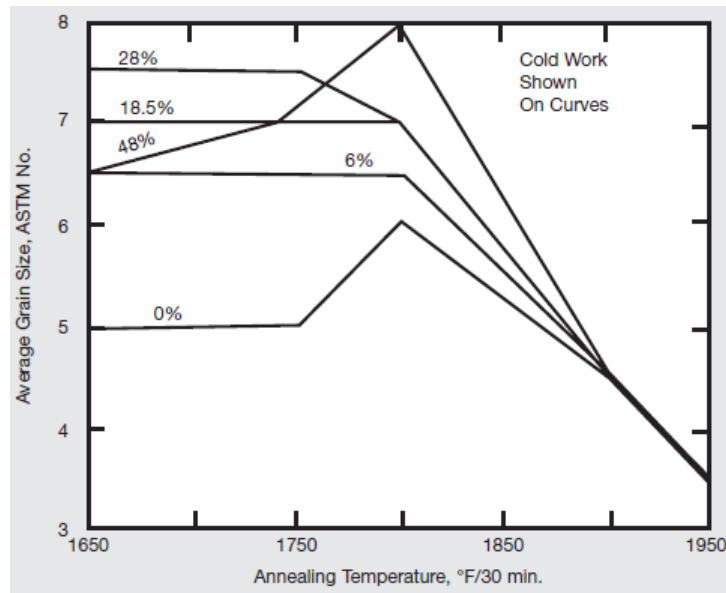


Figura 6: Efecto de la temperatura de recocido sobre el tamaño de grano para diferentes porcentajes de trabajado en frío[9].

2.3.2.2.5 Limitaciones en el empleo de la aleación 718 en la industria nuclear

Las principales limitaciones al utilizar la aleación 718 en aplicaciones de energía nuclear son:

Procesamiento termomecánico adverso

Esta aleación puede presentar susceptibilidad a la corrosión bajo tensión del tipo intergranular (IGSCC) en entornos de refrigerante de reactores. Sin embargo, se han identificado procesamiento termomecánico que aumentan la resistencia a la corrosión bajo tensión [1].

Terminación superficial

La aleación de Inconel 718 puede desarrollar corrosión bajo tensión con fractura tipo intergranular (IGSCC) si la tensión es cercana o sobre pasa la resistencia a la fluencia, especialmente en zonas dañadas de la superficie. Por esto es muy importante una buena terminación superficial de las piezas, con el objetivo de disminuir posibles concentradores de tensiones[1].

Efectos de la irradiación

Las pruebas de la aleación 718 en ubicaciones dentro de los núcleos, donde hay un mayor flujo de neutrones, muestran que tiene una mejor resistencia a la corrosión bajo tensión asistida por radiación (IASCC) que la mayoría de las otras aleaciones que se utilizan en reactores[1].

Microestructura

Las condiciones metalúrgicas producidas por el procesamiento termomecánico tiene efectos sobre las propiedades de la microestructura. La aleación de Inconel 718 tiene una microestructura más compleja que el de Inconel X-750, y está determinada por varias fases [11]:

- Matriz γ (FCC).

- Precipitados intragranulares γ' (estructura L_{12}), usualmente presente en aleaciones de níquel envejecidas, metaestables.
- Precipitados intragranulares γ'' (DO_{22} estructura ordenada). Este precipitado es uno de los que causa mayor endurecimiento debido a la coherencia con la matriz. Además, es metaestable y su formación está dada por el agregado de niobio.
- La fase δ es parecida a γ'' , con una composición ideal del tipo Ni_3Nb . Posee una estructura ortorrómbica y es estable. Puede aparecer como bloques en los bordes de granos o como placas de Widmanstätten a lo largo de la matriz en los planos de deslizamiento $\{111\}$. La precipitación es más pronunciada entre 925 y 950 °C. Asimismo, cumple un rol importante en el control del tamaño de grano, ya que frena el crecimiento de los granos.
- Fases de Laves (A_3B) se forma si la concentración de niobio es alta.
- Carburos tipo MC , pueden estar presentes en la matriz y a lo largo de los bordes de grano.
- Carburos tipo M_6C , pueden formarse alrededor de los bordes de grano durante el servicio.

La formación de precipitados alrededor de los bordes de grano puede afectar la susceptibilidad a IGSCC. Cuando la aleación es tratada a 760 °C precipita γ' dentro de los granos.

El tratamiento de envejecimiento a 870 °C produce precipitados de γ'' lenticulares, gruesos e intragranulares. Estos precipitados son ricos en niobio y titanio y pobres en aluminio, hierro, cromo y molibdeno, comparados con la matriz γ .

El envejecimiento a 760 °C resulta en un precipitado mucho más fino de fase γ'' con forma lenticular. Ocurren tanto dentro, como en los bordes de grano. La composición del precipitado varía de acuerdo al tratamiento térmico.

A pesar de que la formación de precipitados en los bordes de granos es deseable para una mayor resistencia al creep, la formación de precipitados como δ y las fases de Laves causan una disminución en la resistencia de la aleación al IGSCC.

2.3.2.2.6 Resultados de Investigaciones

Debido al hecho de que las aleaciones tanto la 718 y X-750 han sufrido diferentes fallas a lo largo de su trayectoria de uso en componentes en reactores nucleares, se han realizado diferentes investigaciones con el fin de analizar las causas y optimizar las propiedades en servicio, así como su durabilidad.

A continuación, se presentan algunos resultados importantes de diferentes estudios a tener en cuenta de las aleaciones Inconel 718.

Tratamiento térmico

El tratamiento térmico afecta fuertemente la susceptibilidad al SCC. Los tratamientos térmicos recomendados en las especificaciones técnicas de fabricación para el 718, funcionan de manera óptima en refrigerantes de turbinas de gas. Sin embargo en refrigerantes de reactores LWR, han presentado fallas por SCC.

Modificaciones en los tratamientos térmicos, logran bajas tasas de crecimiento de fisuras durante la fractura, similares a las de Inconel X-750. La sensibilidad al SCC parece estar relacionado con la distribución y morfología de las fases de endurecimiento y carburos.

Los cambios en el tratamiento térmico implican ajustar el rango de temperatura de recocido de 927-1010 °C a 982-1010 °C durante 1 hora y luego el tratamiento de endurecimiento por precipitación en dos pasos a 718 °C durante ocho horas y a 621 °C entre 8 y 10 horas. A su vez, se requiere que el tamaño de grano sea ASTM N°5 o más fino. Este tratamiento térmico, junto con prácticas de procesamiento mejoradas (disminución de tensiones superficiales, el uso de granallado, realizar el mecanizado definitivo al final de los tratamientos térmicos), dan como resultado una alta resistencia a la iniciación de SCC.

Si bien no hay informes que demuestren los efectos en la tasa de crecimiento de grietas, pero estos cambios en los tratamientos térmicos genera una disminución de las fases deletéreas, las cuales se cree que conducen a altas velocidades de crecimientos de grietas[1].

Optimización del proceso de fabricación

Se realizaron investigaciones para aumentar la resistencia a PWSCC con el fin de prevenir o reducir fallas en los sujetadores de resorte del conjunto de combustible. Esto condujo a mejoras en la secuencia de fabricación, a continuación se describen los dos procesos de fabricación mejorados:

- La primera secuencia de fabricación mejorada, provisional utilizó la secuencia original (laminado antes del endurecimiento por envejecimiento) pero incluyendo un granallado posterior, impartiendo tensiones de compresión de 690 MPa al área de la rosca superior.
- La segunda secuencia de fabricación, la final, incluyó el uso de granallado como se describe anteriormente y además involucró el laminado en caliente de roscas que ya habían sido endurecidos por envejecimiento. Se esperaba que esto proporcionara tensiones residuales más favorables y una microestructura mejorada con menos posibilidades de crecimiento inesperado del grano. Además, se realizó un bruñido en la transición de la cabeza al vástago para reducir la probabilidad de PWSCC en esa ubicación.

Las pruebas realizadas en tornillos que utilizaron la segunda secuencia provisoria de fabricación también anduvo bien, mostraron que no se generaron fallas por PWSCC en la duración del ensayo (1500 h), mientras que los tornillos que utilizaban la secuencia original fallaron a las 200 h[1].

Optimización para entornos de PWR

Según lo encontrado en bibliografía, las dos condiciones de tratamiento térmico que inhiben el SCC en condiciones de refrigerante primario PWR son las siguientes:

- Recocido de solubilización a 1093 °C durante 1 h, temple al agua, envejecer a 718 °C durante 50 h y luego a 663 °C durante 50 h, temple al aire. Este tratamiento presenta una dureza resultante de aproximadamente 42 HRC.
- Recocido de solubilización a 1093 °C durante 1 h, temple al agua, envejecer a 663 °C durante 100 h, temple al aire. La dureza final ronda los 37 HRC.

En la figura 7 se muestran los resultados de ensayos de dureza realizados en materiales con las condiciones de tratamiento térmico previamente mencionado. Se obtuvo una correlación entre

el límite elástico aproximado y la dureza. Los ensayos de dureza y de tracción se realizaron para todas las condiciones que se sometieron a ensayo de SCC.

El buen desempeño que tienen estos tratamientos térmicos se correlaciona con la ausencia de segundas fases en los bordes de grano, como (carburos y δ). Además garantizan una distribución homogénea en toda la matriz de los precipitados γ'' y γ' [1].

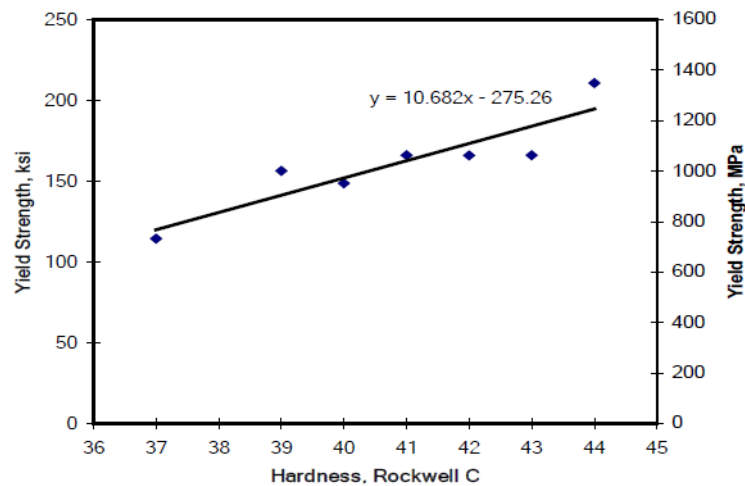


Figura 7: Dureza vs límite elástico aproximado para la aleación 718 [1].

Deformación por fluencia lenta (CREEP)

Pruebas realizadas para analizar el rendimiento de los materiales en centrales cuando se deforman en condiciones de irradiación, indican que la aleación 718 tiene una baja tasa de fluencia. Por esta razón, recomiendan como una buena opción para aplicaciones de resortes en el núcleo de reactores[1].

2.3.2.3 Aleación X-750

La aleación X-750, especificada en ASME SB-637 y ASTM B-637 como UNS N07750 [6], también conocida como Inconel X-750, es una aleación de níquel endurecible por precipitación. La aleación X-750 se ha usado en la fabricación de diferentes componentes de internos de reactores o núcleos. Por ejemplo se utilizan como resortes de sujeción, resortes del conjunto combustible, pasadores de soporte de tubos guía de la barra de control, entre otras. La variedad de aplicaciones y el amplio uso de la aleación, hace que sea una de las pocas aleaciones de alta resistencia calificadas para el uso en reactores nucleares.

Inicialmente, en la industria nuclear, la aleación X-750 fue utilizada con los mismos tratamientos térmicos que se habían desarrollado para la industria de turbinas de gas. Sin embargo, existe la evidencia que dentro de los cuatro años de vida útil surgieron fallas por corrosión bajo tensión (SCC) en componentes fabricados con la aleación X-750. Como resultado de las fallas por SCC, se realizaron mejoras en la aleación y en los procesos de fabricación de las piezas. Las mejoras introducidas condujeron a un resultado satisfactorio, siempre y cuando se realice el proceso de fabricación de manera óptima y sin sobrecargar los componentes.

Dentro de las mejoras incorporadas, los factores más importantes son los siguientes:

- Microestructura susceptible debido a tratamientos térmicos no óptimos.
- Presencia de tensiones superficiales ya sean aplicadas o residuales elevadas.
- Daños superficiales por el proceso de fabricación.

Dentro de las investigaciones llevadas a cabo para comprender mejor las causas de SCC y optimizar la resistencia a este mecanismo de degradación, se ha incorporado una especificación de material con unos leves cambios en la composición química. La aleación sugerida en el reporte NP-7032 [12] del EPRI es la UNS N07752. En dicho informe se detallan la composición química, tratamientos térmicos y los requisitos de calidad, con el fin de garantizar una resistencia satisfactoria al SCC y minimizar la liberación de cobalto en el refrigerante del reactor. Esta nueva composición química se incorpora en el código ASME SB-637 y ASTM B-637 como UNS N07752 [6].

2.3.2.3.1 Experiencia en servicio

Durante los años de servicio que tiene la aleación X-750 se han presentado fallas. Investigadores han estudiado las causas de las mismas con el fin de poder optimizar los parámetros de la aleación y alargar la vida útil de los componentes.

A continuación, se detallan algunas fallas presentadas durante la experiencia en servicio en entornos de reactores del tipo BWR y PWR.

Fallas por corrosión bajo tensión de los pasadores de soporte del tubo guía de transmisión de la barra de control

Las especificaciones para el uso de la aleación X-750 en entornos BWR fueron desarrollados por el programa BWRVIP y publicados como BWRVIP-84 [1].

En dicho informe se presentan algunas de las fallas que han experimentado componentes fabricados con la aleación X-750 para su uso en entornos de internos de reactores:

Existe evidencia de fallas por SCC de los pasadores del Tubo Guía de aleación X-750 en varias plantas nucleares. Estos problemas se debieron, al menos en parte, al uso de la aleación X-750 en una variedad de condiciones de tratamiento térmico, algunas con alta susceptibilidad a SCC en entornos de refrigerante de reactores (por ejemplo, condición AH, Tabla 6).

En un segundo conjunto de componentes en los cuales se había realizado cambios en el tratamiento térmico se reportaron fallas, incluso en la condición de recocido de solución de alta temperatura, más un envejecido en un paso (condición HTH, Tabla 6). La aleación X-750 puede experimentar SCC si los niveles de tensiones de tracción son lo suficientemente altos, sumado a daños en la superficie. Por esta razón, se realizaron mejoras adicionales, como cambios de diseño y fabricación, para reducir significativamente las tensiones máximas y eliminar el daño de la superficie.

En Francia, en la década de 1980 se emprendió un proyecto de prueba y diseño a gran escala para desarrollar un diseño mejorado de la aleación X-750. Se utilizaron un total de cinco diseños, conocidos como Generaciones 1, 2, 3, 4 y NG89.

Se descubrieron fallas en las Generaciones 1 y 2 a partir de 2004, y se detectó una falla en 2007 en la Generación 3. Por otro lado, no se han detectado desperfectos en el último diseño, Generación NG89, después de más de 15 años de servicio. Los cambios que se realizaron para mejorar la resistencia SCC del diseño NG89 incluyen [1]:

- 25 ppm de boro en el material.
- Enfriamiento del material en agua, después del tratamiento térmico de la solución.
- Realización del mecanizado definitivo, una vez finalizados todos los tratamientos térmicos. Esto sirve para eliminar las capas superficiales con bordes de grano dañados que se desarrollan durante los tratamientos térmicos.
- Realización de roscas mediante laminación en frío.
- Granallado en las zonas susceptibles de mayores tensiones.
- Cambios de diseño para reducir significativamente las tensiones máximas.

2.3.2.3.2 Composición química

La composición química de las aleaciones X-750 o UNS N07750 y 752 o UNS N07752 se presentan en la Tabla 5. La aleación 752 tiene pequeñas diferencias en composición química con respecto a la aleación X-750, estos cambios fueron partes de las mejoras incorporadas con el fin de optimizar su comportamiento frente a SCC.

Al igual que para la aleación 718, si se emplean estos materiales en reactores nucleares se debe limitar el contenido de cobalto a 0,1 % en peso, ya que es un componente radioactivo el cual puede incrementar las dosis que reciban los operadores durante las paradas de planta.

Material	UNS N07750	UNS N07752
Elemento	% en peso	% en peso
Carbono	Max 0,08	0,02 - 0,06
Manganeso	Max 1,00	Max 1,00
Silicio	Max 0,50	Max 0,50
Fósforo	-	Max 0,008
Azúfre	Max 0,010	Max 0,003
Cromo	14,00 - 17,00	14,50 - 17,00
Níquel	Min 70,00	Min 70,00
Cobalto	Max 0,1	Max 0,05
Niobio + Tantalio	0,7 - 1,20	0,7 - 1,20
Titanio	2,25 - 2,75	2,25 - 2,75
Aluminio	0,40 - 1,00	0,40 - 1,00
Hierro	5,00 - 9,00	5,00 - 9,00
Cobre	Max 0,05	Max 0,05
Boro	-	Max 0,007
Zirconio	-	Max 0,05
Vanadio	-	Max 0,1

Tabla 5: Composición química de las aleaciones X-750 y 752.

2.3.2.3.2. Tratamientos termomecánicos y propiedades mecánicas

Los tratamientos termomecánicos típicos que se aplican en las aleaciones X-750 y 752 se presentan en la Tabla 6, mientras que las propiedades mecánicas mínimas para los tratamientos térmicos mencionados se presentan en la Tabla 7.

Especificación	Tratamiento termomecánico
N07750 Type-2 B/SB-637[6]	Recocido de solubilización a 982 °C ± 14 °C durante 1/2 h; Enfriamiento al aire; envejecimiento a 732 °C ± 14 °C por 8 h; Enfriamiento en horno hasta 621 °C y mantener hasta completar un tiempo de precipitación de 18 h; Enfriamiento al aire
N07750 Type 3 B/SB-637 [1]	Recocido de solubilización a 1079 °C durante 1-2 h; Enfriamiento al aire; Envejecimiento a 704 °C de 20-22 h; Enfriamiento al aire
HTH [13]	35 % mín de reducción en la última etapa de laminado en caliente; Recocido de solubilización a 1107 °C durante 1 h; Temple en agua o aceite; Envejecimiento a 704 °C durante 20 h; Enfriamiento al aire
N07752 Type 1 B/SB-637 CIB [6]	Recocido de solubilización a 1080 °C ± 13 °C durante 1-2 h; Temple en agua o aceite; Envejecimiento a 716 °C de 20-22 h; Enfriamiento al aire
N07752 Type 2 B/SB-637 [1]	Recocido de solubilización a 1080 °C ± 14 °C durante 1-2 h; Temple en agua o aceite; Envejecimiento a 704 °C de 100 h; Enfriamiento al aire
CIOA EPRI NP-7032 [12]	Recocido de solubilización a 1080 °C ± 13 °C durante 1-2 h; Temple en agua o aceite; Envejecimiento a 760 °C durante 100 h; Enfriamiento al aire
HOA [13]	35 % mín de reducción en la última etapa de laminado en caliente; Recocido de solubilización a 1107 °C durante 1 h; Temple en agua o aceite; Envejecimiento a 760 °C de 20 h; Enfriamiento al aire
AH [1]	Terminado en caliente a 982 °C; homogeneizar 885 °C durante 24 h; envejecer a 704 °C durante 20 h; enfriamiento al aire
BH [1]	Laminado en caliente; recocido de solubilización a 982 °C durante 1 h; envejecimiento a 704 °C durante 20 h

Tabla 6: Tratamientos termomecánicos para las versiones de las aleaciones X-750 y 752[1, 6].

Especificación	Resistencia mecánica [MPa]	Tensión de fluencia [MPa]	Alargamiento porcentual a la rotura (50 mm)[%]	Estricción [%]
N07750 Type-2 B/SB-637	1103	689	20	20
N07750 Type-3 B/SB-637	1103	689	20	20
HTH	1138	724	27	31
N07752 Type-1 B/SB-637 Code Case N-60-6 CIB	1103	689	20	20
N07752 Type-2 B/SB-637	965	585	20	20
CIOA	965	585	20	20
HOA	1062	634	27	36
AH	1193	821	26	44
BH	1365	1000	22	41

Tabla 7: Propiedades mecánicas para diferentes especificaciones de las aleaciones X-750 y 752 [1, 6].

Para componentes como barras, forjados y rodamientos que requieran una condición óptima de resistencia a la tracción para temperaturas de servicio inferiores a 593 °C, el tratamiento óptimo es el de la condición N07752 Type-2, presentado en la Tabla 6, descripto para las especificaciones de AMS 5670, AMS 5671 y AMS 5747[14].

En principio, el tratamiento térmico que se utiliza actualmente en la ET de fabricación de internos de reactor se encuentra presentado en la Tabla 16 [2]. Debido a la experiencia previa en servicio que tiene el tratamiento térmico, el personal de NA-SA lo mantuvo. Igualmente, el tratamiento térmico correspondiente a UNS N07750 type 2, especificado en ASME SB 637 [6], es un tratamiento similar al que se usa para la fabricación de bulones en la ET realizada.

Por otro lado, la ET requiere que se realicen dos ensayos de tracción, el primero a temperatura ambiente y otro a 350 °C, los requerimientos que se exigen son los de las Tablas 12 y 15 respectivamente.

2.3.2.3.3 Alambres para resortes

Para obtener un buen rendimiento de los resortes de Inconel X-750, se debe seleccionar un tratamiento de térmico que desarrolle las propiedades requeridas. Los alambres y tiras empleados para la fabricación de resortes helicoidales y planos, utilizados en la industria nuclear, generalmente se producen en tres condiciones de tratamientos térmicos, los cuales se presentan en la Tabla 8. Las condiciones de tratamientos térmicos N°1 Temper y Spring Temper son las más habituales, mientras que la condición CIST es una recomendación realizada por EPRI en los informes NP 70732^[12] y NP 7338^[15]. En la Tabla 9 se presentan los valores de resistencia mecánica obtenibles para los diferentes tratamientos térmicos.

A medida que las temperaturas descienden por debajo de la temperatura ambiente, la resistencia mecánica y el módulo elástico aumentan. Con lo cual, si se requiere el uso de resortes para temperaturas criogénicas y no se dispone de datos de ensayos específicos para esas temperaturas, se pueden diseñar de manera segura de acuerdo a las propiedades que tienen a temperatura ambiente. En las figuras 8 y 9 se presenta la relación de resortes helicoidales para las condiciones de Spring Temper y N°1 Temper respectivamente. Si bien estos datos son de ensayos realizados en resortes helicoidales, son aplicables a resortes planos. En estas pruebas,

la relajación comprende la reducción de carga necesaria para mantener el resorte en un altura constante [14].

El alambre con el tratamiento N°1 Temper se endurece solo un pequeño grado por deformación en frío, pero su rigidez es suficiente para permitir un bobinado uniforme con máquinas automáticas. El alambre, tratado térmicamente con Spring-Temper, tiene un mayor trabajado en frío, permitiendo una mayor resistencia y tensiones de trabajo. Sin embargo, solamente se utiliza para temperaturas de servicio por debajo de la de relajación de tensiones[14].

En los resortes que se requiera una mayor resistencia mecánica para temperaturas de servicio, desde temperaturas bajo cero hasta 482 °C se recomienda la condición Spring-Temper. Mientas, en los resortes que requieran una mayor resistencia a la relajación, hasta temperaturas de servicio de aproximadamente 480 °C, se recomienda la condición, N°1 Temper[14]. Por lo tanto, en base al input recibido por el personal de NA-SA, la característica requerida para el uso de esta aleación, en las centrales nucleares Atucha, es una buena resistencia a la relajación, por esta razón se utiliza el tratamiento térmico de N°1 Temper. Además este tratamiento térmico está respaldado por lo establecido en la REL [2].

Especificación	Recocido	Endurecimiento por precipitación
No. 1 Temper [14]	1150 °C max. 15 min. 15 % de reducción de área por deformación en frío	730 °C Mantener por 16 horas y enfriar al aire
Spring Temper [14]	1150 °C max. 15 min. 30 % a 65 % de reducción de área por deformación en frío	732 °C Mantener por 4 horas y enfriar al aire
CIST [1]	1080 °C por 1-2 h dependiendo del espesor del producto; Enfriamiento en agua o velocidad de enfriamiento similar. 40 % de reducción de área por deformación en frío	704°C durante 16 h con enfriamiento al aire

Tabla 8: Tratamientos térmicos típicos para resortes de la aleación X-750[14, 1].

Especificación	Resistencia mecánica [MPa]	Tensión de fluencia [MPa]	Alargamiento porcentual a la rotura (50mm) %	Estricción %
No. 1 Temper [14]	1151	855	24	24
Spring Temper [14]	1407	1214	16	31
CIST [1]	1380	1240	-	-

Tabla 9: Propiedades mecánicas para diferentes especificaciones de resortes de la aleación X-750[14, 1].

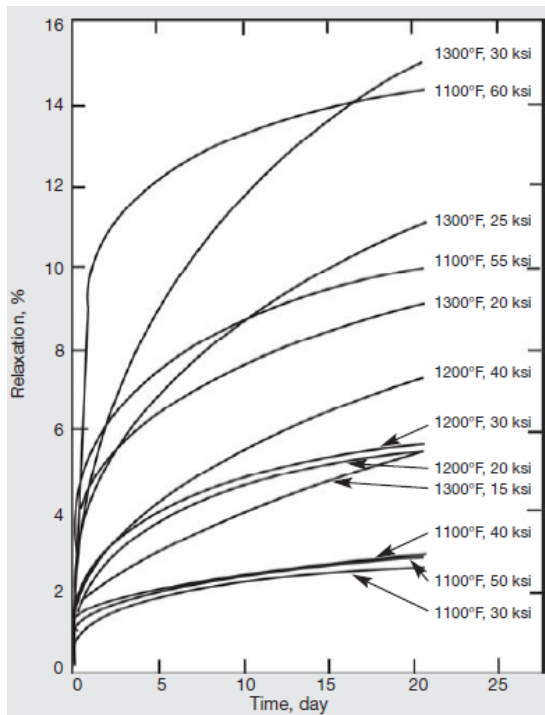


Figura 8: Relajación de resortes helicoidales con condición Spring Temper [14].

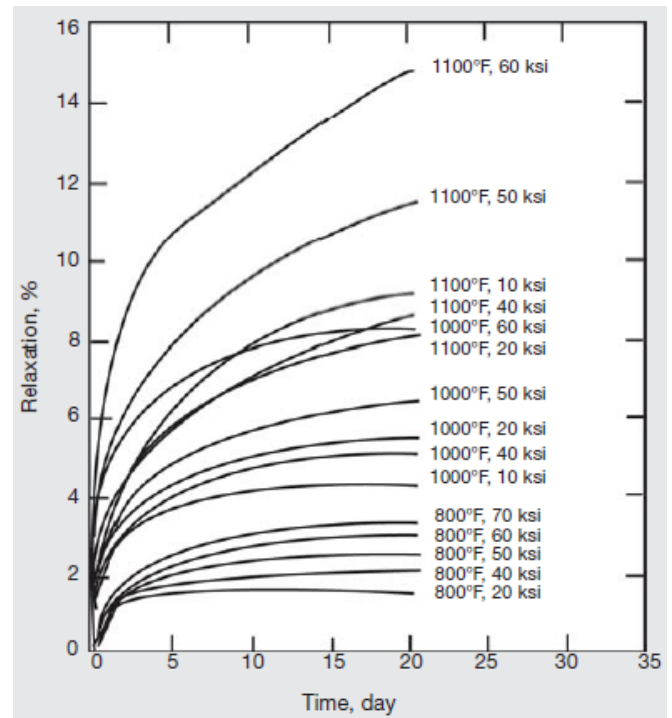


Figura 9: Relajación de resortes helicoidales con condición N°1 Temper [14].

2.3.2.3.4 Recomendaciones de uso

Existen varios documentos del EPRI, para los ambientes de PWR y BWR, donde se establecen las composiciones de materiales, las buenas prácticas de fabricación y procesamiento. A continuación se presentan algunas de las sugerencias propuestas [1]:

- Para aplicaciones internas de reactores BWR (sin incluir componentes de combustible como espaciadores y resortes), se sugiere que los componentes de la aleación Inconel X-750 que se adquieran y fabriquen de acuerdo con BWRVIP-84, excepto por los cambios relacionados con el enfriamiento y los límites de tensión.
- Para los PWR, se sugiere que los componentes de la aleación X-750 se adquieran y fabriquen con el material UNS N07752, utilizando templeado al aire.

Soldadura

La aleación X-750 se puede soldar mediante el proceso GTAW. Sin embargo, la soldadura afectará la resistencia del material y puede afectar su resistencia a la corrosión. Se puede usar Inconel 718 como metal de aporte, y debe soldarse en estado recocido o solubilizado. Luego de la soldadura se realiza un tratamiento de solubilizado nuevamente y luego el tratamiento de precipitación. Las piezas soldadas requieren calificación antes de que puedan usarse. El uso de aleación soldada X-750 para reparaciones y reemplazos de BWR está prohibido en la mayoría de los casos por BWRVIP-84 [1].

2.3.2.3.5 Limitaciones en el empleo de la aleación X-750 en la industria nuclear

Procesamiento termomecánico adverso

La aleación X-750 tiene una susceptibilidad relativamente alta al IGSCC en ambientes de refrigerante del reactor, si el material se produjo de acuerdo con ciertas secuencias de procesamiento termomecánico que eran estándar en las décadas de 1960 y 1970. Esto es cierto tanto para los entornos de refrigerante de reactores PWR como para los BWR. La condición AH de la Tabla 6 es un tratamiento térmico con una susceptibilidad relativamente alta a IGSCC.

Existen pocos requisitos que reduzcan los rangos de composición y los métodos de procesamiento más allá de los límites contenidos en las especificaciones de materiales estándar ASTM y ASME. Resultando en una falta de uniformidad en los productos terminados, pudiendo esto alterar la resistencia al SCC[1].

Terminación superficial

Si las tensiones de tracción máximas se acercan o superan la tensión de fluencia del material, incluso las versiones mejoradas de la aleación X-750 puede experimentar SCC. Esto es importante si se presentan daños en la superficie ya sea, por la terminación del mecanizado o por la oxidación del límite de grano superficial, causado durante el tratamiento térmico de precipitación. Por estas razones, es importante que se limiten las tensiones de tracción máximas, y que el mecanizado final se realice después del tratamiento térmico de precipitación, eliminando así las capas superficiales dañadas en el tratamiento térmico.

La electroerosión por hilo tiene un aporte de calor mucho menor que la electroerosión ordinaria, con lo cual no tiende a producir microfisuras. Componentes que han tenido una terminación superficial por electroerosión por hilo no han reportado fallas [1].

Efectos de la irradiación y tiempo a temperatura

Pruebas de vigilancia de la aleación X-750 realizadas en el núcleo del reactor, donde se acumularon flujos de neutrones sustanciales, mostraron que la irradiación causa fisuración por corrosión bajo tensión asistida por irradiación (IASCC).

Además, algunas experiencias en el servicio indican que los cambios en las propiedades mecánicas y microestructurales ocurren como resultado del tiempo a temperatura y que la irradiación aumenta la susceptibilidad a la fisuración, es decir, se produce fragilización térmica y puede acelerarse por la irradiación, por lo tanto, es importante tener en cuenta estos cambios, por ejemplo disminuyendo los niveles de tensiones.

A pesar de los efectos negativos de la irradiación, algunos componentes de la aleación X-750 funcionan satisfactoriamente en condiciones de alta fluencia, los espaciadores de combustible y los pernos de fijación de canales, por ejemplo, funcionan de forma rutinaria hasta el final de la vida útil de los conjuntos combustibles BWR con flujos superiores a 10^{21} n/cm^2 ($E > 1 \text{ MeV}$) sin SCC.

Lamentablemente, otra limitación importante son los datos insuficientes sobre el comportamiento de la aleación X-750 después de una vida útil prolongada, especialmente cuando se expone a altas temperaturas e irradiación durante ese tiempo [1].

Microestructura

El Inconel X-750 consiste en una matriz γ de estructura FCC endurecida por precipitados de γ' ($Ni_3(Ti, Al)$). Esta última precipita homogéneamente y es coherente con la matriz γ .

La resistencia óptima de IGSCC se obtiene con una microestructura que contiene cantidades significativas de carburos de cromo en los bordes de grano. Tanto la temperatura de solubilización como el tratamiento de envejecimiento tienen un efecto en la cantidad y el tipo de carburo que vaya a precipitar. En estas aleaciones, se forman carburos tipo MC (titanio o niobio) y $M_{23}C_6$ (cromo).

El carburo de tipo MC tiene un efecto indirecto en la resistencia a la corrosión del Inconel X-750, ya que reduce la cantidad de carbono disponible para la formación de los carburos $M_{23}C_6$. Los carburos MC se forman a altas temperaturas, mientras que los $M_{23}C_6$ a bajas. Un tratamiento de solubilizado a altas temperaturas, mayores a 1066°C , puede disolver la fracción de MC y proveer carbono en solución para la posterior precipitación de los carburos $M_{23}C_6$ durante el tratamiento de envejecimiento. Por esta razón, la temperatura del tratamiento de solubilización determina la cantidad de carbono en solución para la formación de los carburos $M_{23}C_6$ y por ende la resistencia final a la corrosión bajo tensión de la aleación.

En estudios realizados en probetas cuya temperatura de solubilizado fue lo suficientemente alta para disolver los carburos MC , con un envejecimiento en dos etapas de 843°C durante 24 horas y 704°C durante 20 horas no se observó la formación de carburos $M_{23}C_6$. Sobre el material se provocó IGSCC, mientras que en pruebas similares de una sola etapa se obtuvieron una buena resistencia al IGSCC. Investigaciones señalan que un rango de temperaturas de solubilizado entre 1066°C y 1093°C optimiza la resistencia al IGSCC sin aumentar el tamaño de grano a un grado que afecte la resistencia a la fatiga de la aleación.

La deformación en frío en la fabricación de resortes con la aleación de Inconel X-750 influye en la resistencia al IGSCC. A valores de deformación en frío menores al 30 % antes del tratamiento de envejecido, ha mostrado una resistencia muy pobre al IGSCC debido a una aceleración en la precipitación de carburos celulares de cromo en los bordes de grano [12].

2.3.2.3.6 Estudios de degradación

Aleaciones tanto como el Inconel 718 y X-750 son de alta resistencia y han sido elegidos para ciertas aplicaciones críticas en reactores nucleares. El rendimiento de estas aleaciones han sido satisfactorios y los incidentes no han afectado seriamente las operaciones de reactores. En la mayoría de los casos la degradación se atribuye a la corrosión intergranular bajo tensión (IGSCC) y en algunos casos a causa de corrosión fatiga.

La resistencia a la iniciación de fisuras en el Inconel X-750 depende en gran medida de la condición de la superficie de las capas de óxido de la superficie así como de los tratamientos térmicos. Por lo que la resistencia a la corrosión bajo tensión en servicio depende en gran medida del proceso de fabricación.

Como resultado de las fallas en servicio se han desarrollado investigaciones para estudiar las causas de SCC, analizando el comportamiento a SCC frente a diferentes tratamientos térmicos, niveles de tensión, entre otros[1, 13].

Efectos del tratamiento térmico y del procesamiento de materiales sobre la microestructura y la susceptibilidad al SCC

La condición del tratamiento térmico afecta fuertemente la susceptibilidad al SCC en ambientes PWR y BWR. La bibliografía señala que podría estar relacionado a la distribución y morfología de los precipitados de endurecimiento y los carburos.

Ensayos mostraron que un recocido a alta temperatura seguido de un envejecimiento en un solo paso da una mayor resistencia al SCC. Las versiones de estos tratamientos se muestran en la Tabla 6 y se denominan CIB, CIOA, HTH y HOA. Las condiciones de CIB y HTH dan una buena resistencia a SCC y alta resistencia mecánica, mientras que las condiciones CIOA y HOA proporcionan aún más resistencia a scc, pero con una resistencia mecánica algo menor.

Además, el cumplimiento de los límites de tensiones y el uso de procedimientos de fabricación adecuados son medidas importantes para proteger contra el SCC. El enfriamiento rápido puede inducir tensiones residuales, especialmente en materiales más gruesos, que conducen a una precipitación de carburo celular menor que los valores óptimos, lo que puede reducir la resistencia al SCC. Por este motivo, el enfriamiento rápido por aire proporciona mejores microestructuras para la resistencia al SCC. Además el enfriamiento con aceite o agua de secciones gruesas implica riesgos de fisuras internas. Por lo tanto se recomienda el temple al aire, con nitrógeno o algún gas inerte[1].

Efectos de las condiciones ambientales sobre la susceptibilidad al SCC

Temperatura

A menudo sufren IGSCC componentes que presentan tratamiento térmico de envejecimiento en dos etapas, ya que tienen una microestructura que libera carburos en los bordes de grano. Si el material contiene una abundancia de carburos de cromo en el límite de grano, se convierte en más resistente a IGSCC.

El IGSCC es inducido por la nucleación y crecimiento de una fina matriz de microhuecos en los bordes de grano frente a una fisura. La nucleación de huecos es ayudada por una alta presión de gas metano formado por la reacción del hidrógeno (generado por la corrosión en la punta de la fisura) y el carbono sobresaturado en zonas cercanas al borde de grano. La formación de carburo en los bordes de grano reducen la concentración de carbono disponible para la formación de metano, dando una estructura más resistente al IGSCC. La combinación de tensiones y la presión del metano aumenta el crecimiento de huecos formando fisuras a lo largo del borde de grano [16].

En la figura 10 se muestran los resultados de un estudio del crecimiento de fisuras de la aleación X-750 con una condición de envejecimiento en dos etapas:

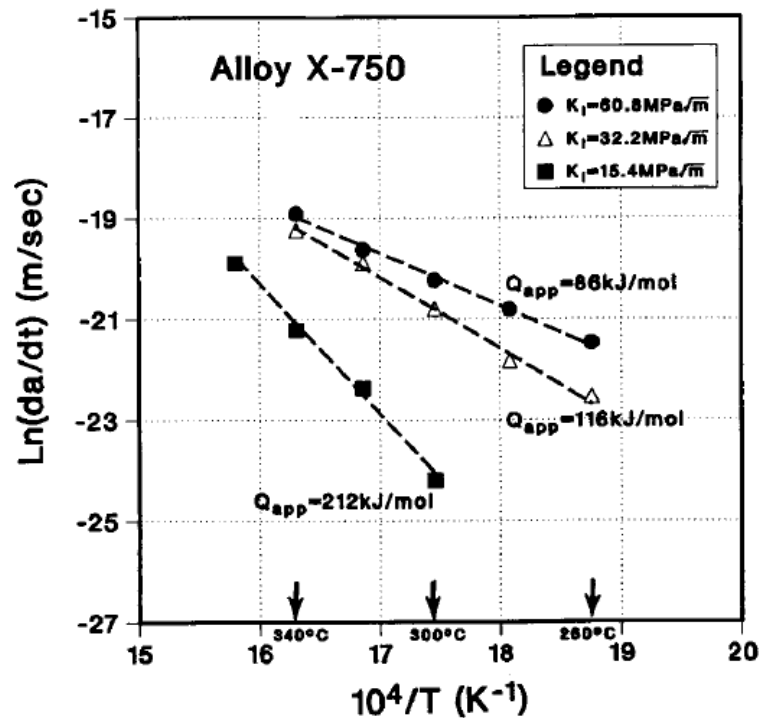


Figura 10: $\ln(da/dt)$ vs $1/T$ para valores de $K_I = 60,8; 32,2$ y $15,4 \text{ MPa } \sqrt{m}$ [16].

El estudio de crecimiento de fisuras de la aleación X-750 fue realizado en condición de envejecimiento en dos etapas AH (Tabla 6), y muestra ciertas características del IGSCC:

- A una temperatura dada, las tasas de crecimiento de fisuras son más altas para factores de intensidades de tensiones más altos.
- La energía de activación disminuye a medida que aumenta K_I .
- A mayor tensión aplicada aumenta la tasa de crecimiento de fisuras.

Potencial electroquímico, concentración de oxígeno y concentración de hidrógeno

La presencia de oxígeno disuelto en agua pura aumenta el potencial de corrosión electroquímico. Un aumento del potencial de corrosión conduce a una mayor susceptibilidad al SCC de varios materiales, incluyendo la aleación X-750. Si se compara ambientes PWR desairados a temperaturas entre 343 °C y 360 °C contra ambientes BWR oxigenados a 288 °C, los tiempos para que se de SCC son similares, a pesar de que las temperaturas sean mucho más altas del entorno PWR.

En los ambientes de BWR la velocidad de propagación de fisuras en la aleación X-750 se reducen fuertemente a potenciales más bajos y a concentraciones de oxígenos más bajas especialmente para materiales en las condiciones AH y HTH (Tabla 6). En los PWR donde la corrosión bajo tensión en ambientes del circuito de agua primario (PWSCC), la iniciación y crecimiento de grietas por PWSCC ocurre más rápidamente cuando el potencial de corrosión (depende del pH), se encuentra cerca de la transición de fase de níquel / óxido de níquel. Con lo cual las variaciones de pH pueden afectar la susceptibilidad de la aleación X-750 a SCC, en entornos de refrigerante de reactores [1].

Corrosión asistida por radiación (IASCC)

Es un mecanismo de degradación relacionado con el tiempo en que los materiales están expuestos a la radiación de neutrones. A mayor tiempo se vuelven más susceptibles a la corrosión bajo tensión con una fluencia creciente. La corrosión asistida por irradiación (IASCC) y corrosión bajo tensión en aguas del primario del reactor (PWSCC) son casos particulares de SCC. La hipótesis actual del IASCC es que es el resultado de un efecto sinérgico del daño de la radiación al material en el medio acuático con posible radiólisis junto con los estados de tensiones [1]. Las principales formas en la que la radiación afecta la estructura de un elemento de un componente interno de un PWR son las siguientes:

- Aumenta el número de dislocaciones generando un endurecimiento. En exposiciones de neutrones muy elevadas se genera la canalización de dislocaciones.
- Cambia la composición química localmente alrededor de los límites de granos.
- La irradiación produce productos de transmutación como el hidrógeno y helio.

Como efecto secundario puede provocar la precipitación de nuevas fases o la desestabilización de fases ya presentes.

La aleación de Inconel X-750 está aprobada para ser usada en ambientes de PWR a temperaturas más altas. Mientras que en BWR a temperaturas menores ha reportado los siguientes comportamientos[1]:

- Un desempeño menor, ya que el material sufre una menor deformación a rotura que el mismo material en un PWR. Pruebas mostraron que la deformación a la rotura de un material que fue envejecido y luego mecanizado en los PWR fue del 1,4 %-2 %, mientras que en los BWR fue del 0,3 % al 0,5 % para fluencias de $3 \cdot 10^{21} \text{ n/cm}^2$.
- Un mejor desempeño cuando, en entornos de PWR y BWR, el material que fue envejecido y luego mecanizado y no viceversa. Esto sucede por que el mecanizado elimina los daños superficiales que se generan durante el tratamiento térmico.

Estudios realizados sobre unos pernos de sujeción del barril de núcleo, de la aleación X-750, que fallaron en la planta nuclear Chooz-A, indican que la irradiación y tiempo a temperatura modificaron la microestructura y propiedades mecánicas, factores que posiblemente hayan desencadenado en la falla de los mismos [1].

Por otro lado, se realizaron estudios en aleaciones X-750 del reactor en las condiciones HTH y en BH a 360 °C con agua hidrogenada (Tabla 6) y los principales resultados fueron los siguientes:

- Altos niveles de radiación reducen el nivel umbral del factor de intensidad de tensiones K_I en aproximadamente 35 % y las tasas de crecimiento aumentan a medida que lo hace la fluencia.
- Los contenidos de boro superiores a 10 ppm aumentaron la susceptibilidad IASCC de la aleación X-750 en condiciones irradiadas. El boro transmuta y en los bordes de granos forma helio, lo que puede causar huecos en los bordes de granos, debilitándolos.

Efecto de aleantes e impurezas

Carbono

El rango de carbono especificado garantiza que haya una cantidad suficiente de carbono para formar una red semi-continua en los bordes de grano. Esta condición da como resultado una buena resistencia al IGSCC. En coladas cuyos valores de carbono sean muy bajas, se tiene susceptibilidad al IGSCC en los casos donde el tratamiento térmico sea solubilizado y envejecimiento en una sola etapa [12].

Azufre

Algunos estudios sobre tratamientos térmicos frente a la susceptibilidad al SCC han mostrado diferentes respuestas, considerando incluso que las pruebas realizadas podrían ser no concluyentes, mantener un bajo contenido de azufre de acuerdo al indicado en la tabla 5 puede mantener una buena resistencia al SCC [1].

Boro

En general el boro se añade para mejorar la trabajabilidad en caliente, pero muestra una segregación en los bordes de grano pudiendo afectar la resistencia al IGSCC. Por esta razón se ha limitado en las especificaciones técnicas de la aleación UNS N07752 a 0,007 % [12].

Además el boro aumenta la susceptibilidad a IASCC para concentraciones mayores a 10ppm cuando se tienen flujos de neutrones superiores a 10^{19} n/cm². Para concentraciones menores se tiene una buena resistencia al IASCC. La limitación práctica surge, en que es difícil poder medir concentraciones menores a 10 ppm, sumado al hecho que se dificulta su eliminación en los procesos de fusión. En casos de baja fluencia se recomienda trabajar en valores entre 25 y 40 ppm. Mientras que cuando se trabaje sin irradiar, se muestra un buen desempeño al trabajar con mayores concentraciones [1].

Cobalto

Se limita el máximo de cobalto permitido, debido a que es radioactivo y es importante evitar la liberación de cobalto en la planta, para disminuir la exposición del personal a la radiación durante el mantenimiento [1, 12].

Silicio

El silicio aumenta la susceptibilidad al SCC para materiales envejecidos en dos etapas. Sin embargo, no tiene ningún efecto sobre el material envejecido directamente [1].

Zirconio

La adición de zirconio aumenta la resistencia a IGSCC, aumentando el factor de concentración de tensiones K_{sc} . Los valores normales de zirconio varían entre 0,03 y 0,05 %, el cual se debe a los refractarios que se usan en los procesos de fusión. Si se agregara zirconio voluntariamente, se tiene que limitar a un máximo de 0,1 % para evitar problemas de trabajabilidad y en procesos de soldadura [12].

2.3.3. Especificación técnica

Con la información recolectada de normas, códigos de construcción y documentación de las centrales nucleares Atucha I y II, se elaborará una actualización de la ET correspondiente a las aleaciones base níquel utilizadas en internos del reactor. En la ET actualizada se indican los requerimiento mínimos de materiales que deben cumplir las aleaciones X-750 y 718. A continuación, se desarrollan los requisitos solicitados en la nueva ET:

2.3.3.1. Materiales

Bulones: Para la fabricación de bulones se utilizará el material UNS N07750 de acuerdo a ASME SB 637 [6].

Resortes: Para la fabricación de resortes se utilizarán los materiales UNS N07750 de acuerdo a ASME SB 637 [6] y $\text{NiCr}_{19}\text{Fe}_{19}\text{Nb}_5\text{Mo}_3$ (DIN 2.4668) de acuerdo a la KTA 3204 [7].

En todos los casos el contenido máximo de Cobalto debe ser de 0,1 % en peso.

Estos materiales sólo se permite utilizarlos en construcciones y formas de productos, para las cuales se ha obtenido una experiencia positiva durante las respectivas condiciones de servicio.

2.3.3.2. Condición superficial

Todas las superficies deberán estar libres defectos que puedan perjudicar la calidad de la información esperada del examen de inspección visual y en el de tintas penetrantes. Se eliminarán las muescas, escamas sueltas, salpicaduras de soldadura, ranuras de mecanizado [2].

2.3.3.3. Proceso de compresión

Se documentará la ejecución de la compresión de los resortes. El tratamiento térmico y el grado de trabajo en frío realizado se indicarán en la certificación de la prueba de aceptación [2].

2.3.3.4. Composición química

La composición química que deben cumplir los componentes fabricados de Inconel 718 y X-750 se presentan en las Tablas 10 y 11 respectivamente. Se deberá hacer un análisis de composición química durante el vertido de la colada utilizando el procedimiento de ASTM 1473 [17].

Elemento	% en peso
Carbono	Max 0,08
Manganeso	Max 0,35
Silicio	Max 0,35
Fósforo	Max 0,015
Azufre	Max 0,015
Cromo	17,00 - 21,00
Níquel	50,0 - 55,00
Cobalto	Max 0,1
Niobio + Tantalio	4,75 - 5,50
Titanio	0,65 - 1,15
Aluminio	0,20 - 0,80
Hierro	bal
Cobre	Max 0,30
Boro	Max 0,006
Molibdeno	2,80 - 3,30

Tabla 10: Composición química para la fabricación de los componentes de Inconel 718 [7].

Componente	Resortes UNS N07750 SB-637/637 M	Bulones X-750 REL
Elemento	% en peso	% en peso
Carbono	Max 0,08	Max 0,08
Manganeso	Max 1,00	Max 0,35
Silicio	Max 0,50	Max 0,35
Azufre	Max 0,010	Max 0,010
Fósforo	-	Max 0,015
Cromo	14,00 - 17,00	14,00 - 17,00
Níquel	Min 70,00	Min 70,00
Cobalto	Max 0,1	Max 0,1
Niobio + Tantalio	0,70 - 1,20	0,70 - 1,20
Titanio	2,25 - 2,75	2,25 - 2,75
Aluminio	0,40 - 1,00	0,40 - 1,00
Hierro	5,00 - 9,00	5,00 - 9,00
Cobre	Max 0,50	Max 0,50

Tabla 11: Composición química para la fabricación de resortes y bulones de Inconel X-750[6, 2].

2.3.3.5. Microestructura

Para la medición del tamaño de grano se debe emplear la norma ASTM E112 [18]. Asimismo se podrá utilizar la misma muestra del análisis metalográfico, requerida por las MTS (Materials Test Sheet) correspondientes. Además, se debe adjuntar una micrografía de magnificación 100X de un área donde el tamaño de grano haya sido establecido. Si en dicha micrografía se observa una variación de tamaño de grano, se deberá informar dicho rango según lo establecido en ASTM E1181 [19].

Para los resortes que utilicen Inconel 718, se recomienda un tamaño de grano ASTM N° 5 o menor, el cual reemplaza lo especificado en el punto W 2.2.2.7 de la KTA 3204 [7].

2.3.3.6. Ensayos

Los ensayos y exámenes que deben pasar los componentes de acuerdo a las normas ASME SB 637 [6] y KTA 3204 [7] son los siguientes:

- Composición química de acuerdo a las tablas 10 y 11 para los materiales de Inconel 718 e Inconel X-750 respectivamente.
- Ensayo de tracción a temperatura ambiente y a 350 °C
- Ensayo de tensión de rotura
- Evaluación de la microestructura y tamaño de grano
- Ultrasonido
- Tintas penetrantes
- Certificación del tratamiento térmico en la condición de entrega
- Inspección visual
- Comprobación del cumplimiento de las dimensiones requeridas en planos

2.3.3.6.1. Ensayos mecánicos

En los ensayos para evaluar las propiedades mecánicas se deberá realizar un ensayo por cada lote. Siendo un lote para los ensayos mecánicos todo el material de la misma colada, diámetro nominal o espesor, tamaño de forja y de mismo grado de endurecimiento.

2.3.3.6.1.1. Ensayo de dureza

Se deberá realizar un mínimo de tres ensayo por lote de bulones de acuerdo a la norma ASTM E 92 [20] o a la norma ASTM E 10-18 [20]. Los valores mínimos individuales que deberán cumplir son los siguientes:

En Estado recocido:

- $HB \leq 320$
- $HV \leq 335$

En estado de recocido y envejecido:

- HB: 305 - 400
- HV: 320 - 420

2.3.3.6.1.2 Ensayo de tensión de rotura

El ensayo de tensión de rotura se debe realizar de acuerdo a la norma ASTM E 139 [21].

2.3.3.6.1.3. Ensayo de tracción

Los ensayos de tracción deben ser realizados de acuerdo a la norma ASTM E8 [22]. Se realizará un ensayo a temperatura ambiente y otro a 350 °C en la condición de tratamiento térmico final de acuerdo a lo indicado en el punto W 2.2.2.5 de la KTA 3204 [7]. Los valores a ser determinados deben garantizar los que se presentan en las Tablas 15 y 12.

Parámetros	Diámetro o espesor [mm]	Recocido de solubilización - endurecimiento por precipitación
$R_{P0,2}$ [MPa]	-	min 790
R_m [MPa]	-	min 1170
A %	<60	min 18
	60 -110	min 15
Z %	<60	min 18
	60 -110	min 15

Tabla 12: Valores que deben garantizarse en el ensayo de tracción de acuerdo a la norma ASTM E 8 a temperatura ambiente [22].

$R_{P0,2}$ [MPa]	min 700
R_m [MPa]	min 1050
A %	min 16
Z %	min 16

Tabla 13: Valores que deben garantizarse en el ensayo de tracción de acuerdo a la norma ASTM E 8 a 350 °C [22].

$R_{P0,2}$ [MPa]	min 700
R_m [MPa]	min 1050
A %	min 16
Z %	min 16

Tabla 14: Valores que deben garantizarse en el ensayo de tracción de acuerdo a la norma ASTM E 8 a 350 °C [22].

requerimientos	solubilizado;15 % de deformación en frío y envejecimiento
$R_{P0,2}$ [MPa]	min 880
R_m [MPa]	min 1140 (1050°C a 350°C)

Tabla 15: Valores que deben garantizarse en el ensayo de tracción de acuerdo a la norma ASTM E 8 a 350 °C [22].

2.3.3.6.2. Examen superficial

Las superficies deben estar limpias y libres de contaminación, como incrustaciones, residuos de aceite o grasa, etc. No se aceptan defectos como grietas, juntas de solape y otras separaciones de materiales. Además, los rayones y marcas de material no son aceptables para resortes en espiral y de placa. La ausencia de defectos se determinará mediante inspección visual. Se deben cumplir las especificaciones de la REL con respecto al tratamiento de superficies. En los lugares donde se pueda dar una evaluación ambigua se deberá realizar un ensayo de líquidos penetrantes[2].

2.3.3.6.3. Ensayo de ultrasonido

Todos los productos semielaborados de diámetro o espesor de 30 mm se someterán a un examen de ultrasonido, con ejecución y evaluación según la REL [2] o según lo establecido en KTA 3204 [7].

2.3.3.6.4. Tintas penetrantes

La rugosidad media, Ra, según se define en la REL de las superficies mecanizadas, no debe superar los 100 μm [2]. Se evitarán las ranuras, muescas y otras irregularidades de la superficie que perjudiquen el contenido de información de los resultados del examen. Si un componente se somete a examen de fisuras en la superficie y un examen de ultrasonido en la misma etapa de fabricación, el examen de tintas penetrantes se debe realizar antes del examen de ultrasonido.

2.3.3.6.5. Determinación de ausencia de contaminación ferrítica

Se debe determinar la ausencia de contaminación ferrítica al 100 % de los componentes sobre la superficie de estos, de acuerdo con el punto 7.2.5.1 de la norma ASTM A 380M [23] o algún otro método presentado por el fabricante y aceptado por el cliente. En caso de detectarse contaminación ferrítica en alguna de las muestras analizadas, se acordará entre el cliente y el fabricante la disposición del lote en cuestión. Los criterios de aceptación se encuentran definidos en la norma previamente mencionada.

2.3.3.7. Tratamientos térmicos

Los requerimientos de tratamientos térmicos recomendados para bulones y resortes de Inconel X-750 de acuerdo a la REL [2], se presentan en las Tablas 16 y 17 respectivamente. El tratamiento térmico para la fabricación de resortes de Inconel 718, de acuerdo a la norma KTA 3204 [7], se presenta en la tabla 18.

Tratamiento termomecánico	
Recocido	Endurecimiento por precipitación
980 ± 15 °C Mantener durante 1 h y enfriar al aire	730 ± 10 °C Mantener por 8 h Enfriar a 60 ± 10 °C/h hasta 620 ± 10 °C Mantener 8 h y enfriar al aire

Tabla 16: Tratamiento térmico recomendado para la fabricación de bulones de Inconel X-750[2].

Tratamiento termomecánico	
Recocido	Endurecimiento por precipitación
1150 max 15 min, 15 % de reducción de área por deformación en frío Enrollado del resorte	730 ± 15 °C Mantener por 16 h y enfriar al aire

Tabla 17: Tratamiento térmico para alambres de Inconel X-750 de diámetros entre 0,4 mm y 15mm[2].

Tratamiento termomecánico	
Recocido	Endurecimiento por precipitación
Entre 982 - 1010 °C durante 1 h ± 5 min 15 % de reducción de área por deformación en frío Enrollado del resorte	718 ± 10 °C Mantener por 8 h Enfriar a 60 ± 10 °C/h hasta 621 ± 10 °C Mantener 8 h y enfriar al aire

Tabla 18: Tratamiento térmico para alambres de Inconel 718 de diámetros entre 0,4 mm y 15mm[7].

2.3.4. Conclusiones

En este trabajo, se pudo responder a la solicitud de la empresa NA-SA para realizar una especificación técnica de los componentes de Inconel 718 y X-750. En la ET se pudo establecer los principales requerimientos (tratamientos térmicos, composición química, propiedades mecánicas, entre otros) de estas aleaciones para la fabricación de bulones y resortes.

La implementación de Inconel 718 en la central Atucha es relativamente nueva, ya que no está contemplada en las primeras especificaciones de la central CNAI. El interés para la fabricación de resortes de Inconel 718 se da debido al hecho de que presenta una mayor resistencia a la relajación de tensiones que el Inconel X-750. Si bien, en la búsqueda bibliográfica no se disponía de valores de relajación de tensión en ambientes de reactores, la empresa lo solicitó por ese hecho.

Durante de la búsqueda bibliográfica, se encontró que la aleación 752 tiene un mejor desempeño frente a problemas de SCC. Por esta razón, se realizó una recomendación para la implementación de la aleación UNS N07752 establecida en el código ASME SB 637 M. Sin

embargo, debido al hecho de que la empresa no tiene una experiencia previa con esta aleación modificada del X-750 y sumado a que la aleación X-750 se ha desempeñado bien en las centrales Atucha I y II, se descartó el uso de la aleación 752.

2.4. Conclusiones del trabajo realizado

Dentro de los temas abarcados en este trabajo se pudo aplicar los conocimientos adquiridos durante la carrera y brindar respuestas ingenieriles a las diferentes consultas que se recibieron en el GIIMC.

A si mismo, se adquirió una mayor formación de los requerimientos solicitados a materiales utilizados en la industria Nuclear, ya que se estudiaron características de las aleaciones de Inconel X-750 y 718 y su aplicación en componentes de reactores nucleares.

Por otro lado, se considera valioso el haber utilizado códigos de construcción para dar respuesta ante las solicitudes ingenieriles. La utilización de estos códigos es un complemento importante en la formación académica de un ingeniero en materiales.

Finalmente, la posibilidad de embeberme en diferentes temas a lo largo del trabajo de tesis, revaloriza la formación obtenida, ya que permitió aplicar los conocimientos brindando una respuesta a consultas ingenieriles.

3. Inspecciones de fabricación, soldadura, revisión de documentación y registros

3.1. Introducción

Durante este trabajo se realizaron experiencias de inspecciones de fabricación en CONUAR, lugar donde se lleva a cabo la fabricación de componentes para la central nuclear Atucha II, de ahora en más llamada CNA II. Las inspecciones son necesarias para poder hacer un seguimiento y verificación de los cumplimientos de las especificaciones de los procesos de fabricación (planos, parámetros de procesos, etc).

Las inspecciones de fabricación consisten en realizar un relevamiento del estado de los componentes. Estos relevamientos pueden ir desde la recepción de los materiales, procesos intermedios de fabricación, así como en etapas finales de revisión del History Docket. Durante la inspección se verifica el cumplimiento de las especificaciones técnicas de fabricación previamente indicadas por NA-SA. Los hallazgos encontrados se informan para que puedan ser mejorados y/o controlados.

Además, es importante realizar un control de la documentación requerida para la fabricación y de los registros generados para los componentes correspondientes. En estos documentos se plasma el seguimiento de cada paso de fabricación y ensayos que se realizan sobre los componente. En ocasiones en las etapas de ensayos o inspecciones (toda esta información se detalla en los registros de fabricación de los componentes) se encuentran defectos que requieren reparación o rechazo del componente dependiendo la gravedad de los hallazgos encontrados.

A su vez, se pueden responder consultas de procesos de fabricación o selección de materiales para la fabricación de componentes.

Para los trabajos de inspección de soldaduras y fabricación y el desarrollo de especificaciones técnicas se utilizan códigos de construcción como criterio. Los códigos son un conjunto de normas y procedimientos estandarizados para la construcción de equipos, componentes, etc. Están basados en la experiencia y estudios de muchos profesionales y entidades, sujetos a revisión, interpretación y mejora constantes para reconocer nuevos desarrollos e investigaciones. Estas normas definen la calidad y establece los criterios de seguridad, incluyen requisitos de materiales, diseño, fabricación, examen, inspección.

En este trabajo se utilizó el Código de Calderas y Recipientes a Presión de ASME (BPVC), la cual establece normas para el diseño, la fabricación y la inspección de los componentes fabricados. Para el caso particular de soldaduras se utiliza la sección IX la cual establece los requerimientos para la calificación de soldadores y procedimientos de soldadura para ser aplicados en la fabricación, reparación y mantenimiento de equipos sometidos a presión, calderas y equipos relacionados.

Durante los trabajos de soldaduras se requieren los procedimientos de soldadura (WPS), la calificación del procedimiento (PQR) así como la calificación de la habilidad del soldador (WPQ). El contenido y requerimiento de estos documentos se establecen en códigos de construcción como ASME sección IX, AWS, etc. A continuación se describen los documentos mencionados según ASME sección IX [24]:

Especificación de procedimiento de soldadura (WPS): es un procedimiento de soldadura calificado por escrito preparado para proporcionar dirección para hacer soldaduras de producción según los requisitos del Código. El WPS y otros documentos pueden usarse para proporcionar instrucciones al soldador o al operador de soldadura para asegurar cumplimiento de los requisitos del Código.

Contenido de la WPS: El WPS completo debe describir todas las variables esenciales, no esenciales y, cuando sea necesario y complementarias para cada proceso de soldadura utilizado en el WPS.

Las variables esenciales son aquellas que al cambiarse modifican la resistencia mecánica de la junta soldada. Por ejemplo: metal base, metal de aporte, posición, tipo de junta, espesor.

Las variables esenciales suplementarias son las que al ser modificadas afectan a la tenacidad del metal de soldadura o de la zona afectada del calor.

Las variables no esenciales son aquellas que al ser modificadas no afectan a la resistencia mecánica de la junta soldada.

Las variables de procesos especiales son variables que afectan a las propiedades mecánicas y químicas en procesos especiales.

Registro de calificación de procedimiento (PQR): Es un registro de variables registradas durante la soldadura de los cupones de prueba. También contiene los resultados de las pruebas de especímenes. El objetivo es asegurar que la unión soldada, por un dado proceso de soldadura, pueda garantizar las propiedades mecánicas requeridas y no la habilidad del personal para realizar la soldadura.

Contenido del PQR: Documenta todas las variables esenciales y, cuando sea necesario, complementarias de esenciales para cada proceso de soldadura utilizado durante la soldadura del cupón de prueba. También se registran variables no esenciales u otras variables utilizadas durante la soldadura del cupón de prueba, las cuales luego se utilizan para el armado del WPS. Las variables que se registran son variables reales que fueron monitoreadas durante la soldadura incluyendo los rangos utilizados durante la soldadura del cupón de prueba.

Registro de calificación de habilidad del soldador (WPQ): Es un documento en el que se registran los ensayos de calificación que se realizaron en un cupón de soldadura, requeridos por los códigos de construcción, cuyo objetivo es determinar la habilidad de los soldadores de producir soldaduras sanas.

En el código de construcción que se use, se indican las variables a tener en cuenta para procesos manuales, semiautomáticos, automáticos o mecanizados. Cada proceso en particular tiene sus variables a tener en cuenta.

3.2. Procedimiento de inspección

Durante las inspecciones se realiza un relevamiento de las actividades que se están realizando en el lugar de fabricación a fin de detectar desvíos de los requerimientos establecidos en las especificaciones técnicas o procedimientos de fabricación. Luego de las inspecciones se informan los hallazgos encontrados y el estado de avance de la fabricación. Algunos de los hallazgos típicos que se pueden dar durante la inspección son:

- Falta y/o inadecuada señalización de zona de trabajo/acopio.
- Documentación de fabricación no es copia controlada.
- Documentación de fabricación, aprobada con comentarios del cliente, sin incluirlos.
- Inadecuada identificación/trazabilidad de materiales.
- Soldadura de material sin identificación sobre el componente.
- Documentación de Soldadura no se realizan/actualizan según instructivo apropiado.
- Inadecuada identificación/ejecución de soldaduras temporarias sobre el componente.

Posibles hallazgos que se relevan, en general, durante una revisión de registros:

- Registros con casilleros incompletos o información faltante.
- Registros sin firma del personal interviniente.
- Registros sin fecha de firma.
- Registros con información inconsistente o errónea.
- Información faltante o errónea en los registros de fabricación.
- Registros o documentación faltante.
- Soldaduras ejecutadas sobre el componente sin toda la documentación aprobada requerida o fuera de vigencia al momento de soldar.
- Registros con identificación repetida o inadecuada.
- Hallazgos realizados previamente por CNEA y no corregidos por el proveedor.
- No se cumple con instructivos o documentación aplicable.
- Registros realizados por personal no calificado.

3.3. Inspecciones para NA-SA

Se realizaron inspecciones de la fabricación de Tubos Guías para CNAII. Los Tubos Guía son importantes para la seguridad, porque controlan la trayectoria de las varillas de control dentro y fuera del núcleo. En la Figura 11 se presenta un diseño del Upper Guide con el Tubo Guía de CNAII. El Tubo Guía tiene las siguientes funciones [25]:

- Proporcionar un camino recto de baja fricción para que las barras de control entren o salgan del conjunto de combustible.
- Proporcionar suficiente protección a las barras de control cuando se retiren de los elementos de combustible para evitar daños debido al flujo de refrigerante paralelo y lateral.
- Proporcionar un lugar de almacenamiento conveniente y seguro para las líneas de transmisión de la barra de control durante el reabastecimiento de combustible.

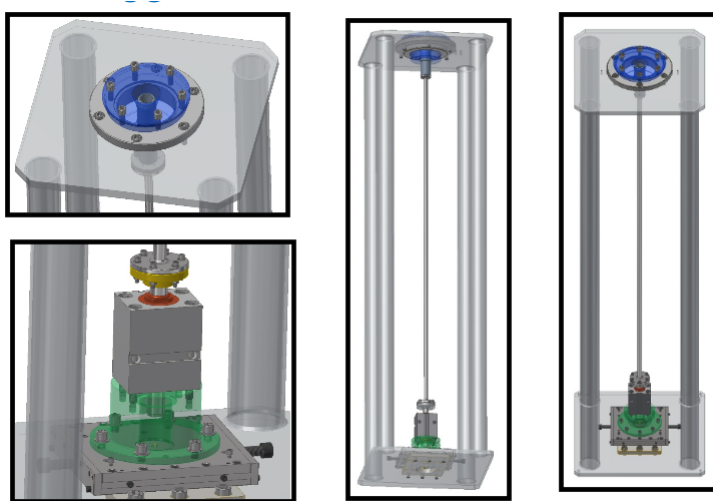
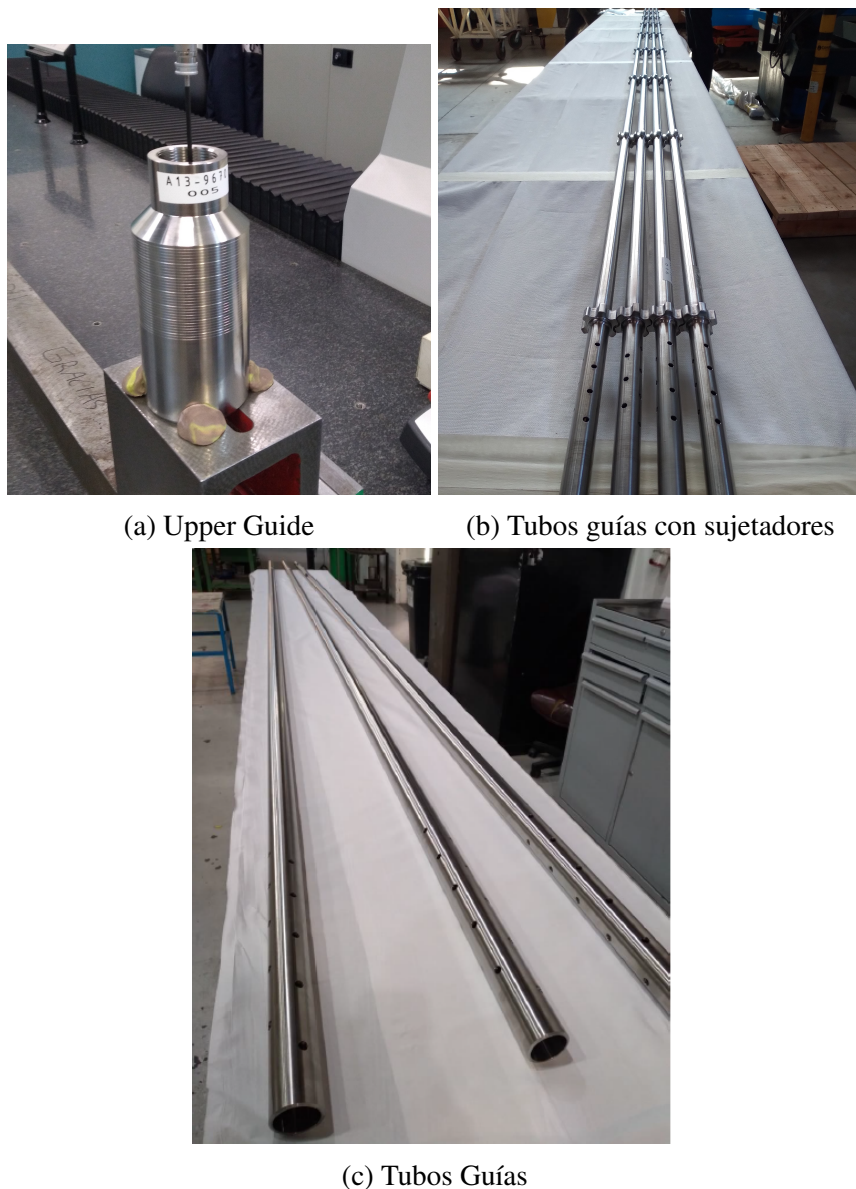


Figura 11: Diseño del Tubo Guía con el Upper Guide de CNAII

Las principales actividades que se han realizado se describen en los siguientes puntos:

- Inspección de trabajos en el laboratorio de metrología realizados en el componente Upper Guide, (Figura 12a).
- Inspección visual y hallazgos de defectos de Tubos Guías (Figura 12b y 12c).
- Revisión de los protocolos de fabricación y control de Tubo Guía.
- Revisión de las especificaciones de los procedimientos de soldaduras. Las soldaduras que se estaban realizando eran las juntas de los tubos a los sujetadores (Figura 12b).
- Se realizó el control de los parámetros eléctricos de la soldadura y se comparó con los establecidos en la WPS, a su vez se revisaron las correspondientes WPQ y PQR.



(a) Upper Guide

(b) Tubos guías con sujetadores

(c) Tubos Guías

Figura 12: Inspección de componentes

3.4. Inspecciones para el proyecto CAREM

Durante este trabajo se realizaron informes del estado de avance e inspección en soldadura del Liner de contención del reactor CAREM 25. El CAREM es un reactor de potencia con agua liviana y uranio enriquecido ubicado en Lima provincia de Buenos Aires. El Liner de contención se está construyendo en módulos, actualmente se están realizando tareas sobre el Módulo 10.

Los trabajos de fabricación en Lima se realizan en tres sectores del predio, estos son nombrados como Liner, platea y el sector de piletas. En el sector de platea se trabaja con acero al carbono, mientras que en piletas se realizan los trabajos de acero inoxidable. La división de sectores es necesaria, debido a que no tiene que haber contacto entre los aceros al carbono e inoxidables, ya que se puede generar contaminación ferrítica en estos últimos durante la soldadura.

Durante las inspecciones en el sector de plateas se estaban fabricando cuatro penetraciones troncocónicas (Figura 13b). Dentro de las tareas que se realizaron en el lugar se incluyen tra-

bajos de soldadura, amolado para limpieza de la soldaduras, ensayos de radiografía industrial y líquidos penetrantes.

En el Liner de contención se realizaban soldaduras sobre el módulo 10. Además, se monitoreó las terminaciones superficiales de unas soldaduras sobre el Módulo 10 luego de su limpieza por amolado (Figura 13a).

Durante las inspecciones de soldadura se solicita la siguiente documentación:

- WPS
- WPQ
- PQR

Además se realiza un control de los parámetros de soldadura (tensión y corriente para determinar el calor aportado, temperatura de precalentamiento) y se comparan con los establecidos en el WPS. Es necesario realizar un control de temperaturas de los electrodos, los mismos deben conservarse a una temperatura elevada, para evitar el ingreso del hidrógeno de la humedad del ambiente, según lo establece el procedimiento redactado por CONUAR.



(a) Soldaduras sobre el Módulo 10



(b) Troncocónica

Figura 13: Componentes y soldaduras inspeccionados

3.5. Conclusiones del trabajo realizado

Fue una gran oportunidad la experiencia obtenida durante del trabajo final de Ingeniería en Materiales en el GIIMC, ya que se brindó la posibilidad de realizar trabajos de inspección para el proyecto CAREM 25. Además, se pudo llevar a cabo inspecciones en CONUAR, proporcionando el primer contacto con la industria y su entorno.

Por otro lado, se obtuvo una formación introductoria en cuestiones de inspección de fabricación y soldadura de componentes, complementando a la formación adquirida durante la carrera. Dentro de los conocimientos que se adquirieron, está el manejo de la documentación que se utiliza durante los trabajos de soldadura, así como los registros de los componentes fabricados con sus ensayos correspondientes. Además, al finalizar las inspecciones y/o revisión de documentación, se realizan informes del avance de la obra, como en caso del CAREM, o de los hallazgos relevados, ya sea de fabricación como de registros. Asimismo en el GIIMC se trabaja respetando protocolos de calidad para la revisión de documentación y redacción de informes, permitiendo incorporar los temas aprendidos durante la carrera.

Referencias

- [1] EPRI. Materials Handbook for Nuclear Plant Pressure Boundary Applications,. 2010.
- [2] Siemens AG. CNA II Coolant Channel (KK), Control Rod Guide Tube (SSFR), Instrumentation Lance Guide Tube (SFR), Moderator Downcomer Line (ML), Boric Acid Piping Line (BL) and Accesories. Specification-No: RE-L 5002/E Rev. C.
- [3] Welding metallurgy and weldability of stainless steels.
- [4] Guillermo Anteri. *Apuntes de la cátedra de Materiales Metálicos - Instituto Sabato*. 2019.
- [5] Andrés Pastor. *Apuntes de la cátedra de Procesos II - módulo de Soldadura - Instituto Sabato*. 2020.
- [6] SB-637/SB-637M: ASME BPVC Section II Part B. Standard specification for precipitation-hardening nickel alloy bars, forgings, and forging stock for high-temperature service. 2017.
- [7] KTA 3204. Reactor pressure vessel internals. (2017-11).
- [8] Samuel D. Kiser John N. Dupont, John C. Lippold. *Welding metallurgy and weldability of Nickel-base alloys*. 2009.
- [9] Special Metals Corporation. Publication Number SMC-045. 2007.
- [10] American Society for Testing and Materials. ASTM A 109/A 109M-00. Standard specification for steel, strip, carbon (0.25 maximun percent), cold-rolled. 2000.
- [11] EPRI Technical Report. Determination of Susceptibility of Alloy 718 to Intergranular Stress Corrosion. 1994.
- [12] NP 7032 Material Specification for Alloy X-750 for Use in LWR Internal Components Revision 1. 1990.
- [13] NP 6908 Improve Stress Corrosion Resistance of NiCrFe Alloys. 1990.
- [14] Special Metals Corporation. Publication No. SMC-067. 2004.
- [15] NP 7338 L Desing and Manufacturing Guidelines for High Strength Components in LWRs Alloy X-750. 2009.
- [16] Y. Shen and P. G. Shewmon. IGSCC crack growth of alloy 600 and X-750 in steam. 1991.
- [17] American Society for Testing and Materials. ASTM E 1473. Standard test methods for chemical analysis of nickel, cobalt, and high- temperature alloys.
- [18] American Society for Testing and Materials. ASTM E 112. Standard test methods for determining average grain size.
- [19] American Society for Testing and Materials. ASTM E 1181. Standard test methods for characterizing duplex grain sizes. 2015.
- [20] American Society for Testing and Materials. ASTM E 92. Standard test methods for vickers hardness and knoop hardness of metallic materials. 2017.

- [21] American Society for Testing and Materials. ASTM E 139. Standard test methods for conducting creep, creep-rupture, and stress-rupture tests of metallic materials. 2010.
- [22] American Society for Testing and Materials. ASTM E 8. Standard test methods for tension testing of metallic materials.
- [23] American Society for Testing and Materials. ASTM E 380M. Standard test methods, practice for cleaning, descaling, and passivation of stainless steel parts, equipment, and systems.
- [24] ASME Code Section IX. Qualification standard for welding, brazing, and fusing procedures; welders; brazers; and welding, brazing, and fusing operators. 2012.
- [25] IAEA. Iaea nuclear energy series stress corrosion cracking in light water reactors : Good practices and lessons learned. 2011.