

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE 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 Ing. Gabriel Alejandro Bertolani

Director

Esp. Ing. Rodrigo Emmanuel Taboada

Dr. Rubén Omar Gonzalez

(*) Tesis para optar al título de Magister en Ciencia y Tecnología de Materiales

República Argentina

2024

Resumen

Este trabajo de tesis se centra en una evaluación exhaustiva de proyectos en la industria nuclear, con un enfoque particular en aspectos clave como la inspección y calificación de soldadura, la aptitud y selección de materiales, como así también el desarrollo de especificaciones técnicas. Dividida en dos capítulos, se exploran en profundidad los trabajos llevados a cabo para el Proyecto CAREM25 y para las centrales nucleares de potencia operadas por Nucleoeléctrica Argentina (NASA).

El primer capítulo, se enfoca en la inspección y calificación de soldadura, junto con la fabricación de componentes destinados al Proyecto CAREM25. Mediante inspecciones en el lugar, se asegura la conformidad con las especificaciones técnicas y se supervisa la soldadura e instalación de los diferentes componentes correspondientes al proyecto. Los hallazgos identifican problemáticas tales como la corrosión y la insuficiente penetración en las soldaduras. Las conclusiones resaltan la importancia de tratar la corrosión, problemas de soldadura, contaminación ferrítica, así como el cumplimiento normativo y la revisión documental. Se realizaron ajustes en los procedimientos de soldadura para garantizar la ausencia de corrosión intergranular. Estos ajustes incluyeron la implementación de métodos y procedimientos para la detección de la corrosión intergranular. Además, se trató el inconveniente relacionado con el desnivel del Liner en el Módulo 1, aplicando soluciones apropiadas para su resolución.

El segundo capítulo se enfoca en las asesorías, en el campo de los materiales, proporcionadas a Nucleoeléctrica Argentina (NASA). Se trata la aptitud de materiales, identificando incumplimientos en el contenido de ferrita delta que podrían provocar fisuración en caliente o sensibilización. Además, se consolidó una especificación técnica detallada para el embalaje, transporte y almacenaje de componentes metálicos internos del reactor (Clase C1), asegurando la seguridad en todas las etapas. También se redacta una especificación actualizada para los materiales base níquel, como los Inconel 718 y X-750, empleados en los reactores Atucha I y II, destacando la importancia de los tratamientos termomecánicos para garantizar las propiedades mecánicas preestablecidas para materiales de componentes que serán internos del reactor. Además, se discute el desafío del reemplazo de un tanque corroído por ácido sulfúrico, presentando soluciones, entre ellas la implementación de aceros inoxidable austeníticos como el AISI 316 o la Aleación 20, resaltando la importancia de la elección precisa de materiales para asegurar la resistencia del material al ácido sulfúrico en todas sus concentraciones y en condiciones

dinámicas, lo que a su vez garantizará la integridad y el funcionamiento óptimo del nuevo tanque.

En conjunto, esta tesis contribuye al conocimiento en la industria nuclear, enfatizando la selección meticulosa de materiales y la resolución eficaz de problemas para garantizar la seguridad y la eficiencia en el ámbito nuclear.

Palabras Clave: Inspección de Soldadura, Corrosión Intergranular, Aptitud de Materiales, Fisuración en Caliente, Sensibilización, Especificaciones Técnicas, Selección de Materiales, Transporte Materiales Clase C1, Inconel 718, Inconel X-750, Tratamientos Térmicos, Corrosión.

Abstract

This thesis work focuses on a comprehensive evaluation of projects in the nuclear industry, with a particular emphasis on key aspects such as welding inspection and qualification, material suitability and selection, as well as the development of technical specifications. Divided into two chapters, the in-depth exploration is conducted on the work carried out for the CAREM25 Project and for the nuclear power plants operated by Nucleoeléctrica Argentina (NASA).

The first chapter focuses on the inspection and qualification of welding, along with the manufacturing of components for Project CAREM25. Through on-site inspections, conformity with technical specifications is ensured, and the welding and installation of various project-related components are supervised. Findings identify issues such as corrosion and insufficient weld penetration. The conclusions highlight the importance of treating corrosion, welding problems, ferritic contamination, as well as regulatory compliance and document review. Adjustments were made to welding procedures to guarantee the absence of intergranular corrosion. These adjustments included the implementation of methods and procedures for detecting intergranular corrosion. Additionally, the issue related to the unevenness of the Liner in Module 1 was addressed by applying appropriate solutions for its resolution.

The second chapter focuses on the consultations in the field of materials provided to Nucleoeléctrica Argentina (NASA). It addresses the suitability of materials, identifying non-compliance with delta ferrite content that could lead to hot cracking or sensitization. Furthermore, a detailed technical specification is consolidated for the packaging, transport, and storage of internal metallic reactor components (Class C1), ensuring safety at all stages. An updated specification is also drafted for nickel-based materials, such as Inconel 718 and X-750, used in Atucha I and II reactors, highlighting the importance of thermo-mechanical treatments to guarantee the predetermined mechanical properties for materials of components that will be internal to the reactor. Additionally, the challenge of replacing a corroded tank with sulfuric acid is discussed, presenting solutions, including the implementation of austenitic stainless steels like AISI 316 or Alloy 20, emphasizing the importance of the precise selection of materials to ensure material resistance to sulfuric acid in all concentrations and dynamic conditions, which, in turn, will ensure the integrity and optimal performance of the new tank.

Overall, this thesis contributes to knowledge in the nuclear industry, underscoring the meticulous material selection, and effective problem resolution to ensure safety and efficiency in the nuclear domain.

Keywords: Welding Inspection, Intergranular Corrosion, Material Suitability, Hot Cracking, Sensitization, Technical Specifications, Material Selection, Class C1 Material Transport, Inconel 718, Inconel X-750, Heat Treatments, Corrosion.

Índice

| | |
|--|----|
| 1. Introducción | 8 |
| 1.1 Actividad en el Grupo de Inspección e Ingeniería de Materiales y Componentes..... | 11 |
| 1.1.1 Inspección | 12 |
| 1.1.2 Asesoramiento | 16 |
| 1.2 Actividades desarrolladas en la tesis | 17 |
| 2. Inspección de Fabricación y Asesoramiento Técnico al Proyecto CAREM25 | 20 |
| 2.1 Métodos..... | 20 |
| 2.1.1 Revisión de registros y convalidación de tubos del generador de vapor (CAREM)..... | 20 |
| 2.1.2 Respuesta técnica para la calificación de procedimiento de soldadura Asesoramiento 1 | 21 |
| 2.1.3 Inspecciones al CAREM..... | 36 |
| 2.1.4 Evaluación y determinación de métodos para reparación de superficie Asesoramiento 2 | 39 |
| 2.2 Resultados y Discusión | 54 |
| 2.2.1 Revisión de registros y convalidación de tubos del generador de vapor (CAREM)..... | 54 |
| 2.2.2 Respuesta técnica para la calificación de procedimiento de soldadura Asesoramiento 1 | 55 |
| 2.2.3 Inspecciones al CAREM..... | 59 |
| 2.2.4 Evaluación y determinación de métodos para reparación de superficie Asesoramiento 2 | 70 |
| 2.3 Conclusiones parciales | 72 |
| 2.3.1 Revisión de registros y convalidación de tubos del generador de vapor (CAREM)..... | 72 |
| 2.3.2 Respuesta técnica para la calificación de procedimiento de soldadura Asesoramiento 1 | 72 |
| 2.3.3 Inspecciones al CAREM..... | 75 |
| 2.3.4 Evaluación y determinación de métodos para reparación de superficie Asesoramiento 2 | 77 |
| 3. Asesoramiento Técnico a Nucleoeléctrica Argentina S.A. (NASA) | 79 |
| 3.1 Métodos..... | 79 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 3.1.1 | Evaluación de aptitud del material de insertos y discos para uso en el reactor nuclear Atucha II | 79 |
| 3.1.2 | Análisis comparativo de métodos para la elaboración de un nuevo procedimiento de transporte de materiales Clase C1 | 95 |
| 3.1.3 | Redacción de especificación técnica de aleaciones base níquel para componentes internos del reactor | 96 |
| 3.1.4 | Evaluación de material de reemplazo para un tanque sedimentador.. | 117 |
| 3.2 | Resultados y Discusión | 124 |
| 3.2.1 | Evaluación de aptitud del material de insertos y discos para uso en el reactor nuclear Atucha II | 124 |
| 3.2.2 | Análisis comparativo de métodos para la elaboración de un nuevo procedimiento de transporte de materiales Clase C1 | 126 |
| 3.2.3 | Redacción de especificación técnica de aleaciones base níquel para componentes internos del reactor | 128 |
| 3.2.4 | Evaluación de material de reemplazo para un tanque sedimentador.. | 139 |
| 3.3 | Conclusiones parciales | 140 |
| 3.3.1 | Evaluación de aptitud del material de insertos y discos para uso en el reactor nuclear Atucha II | 140 |
| 3.3.2 | Análisis comparativo de métodos para la elaboración de un nuevo procedimiento de transporte de materiales Clase C1 | 142 |
| 3.3.3 | Redacción de especificación técnica de aleaciones base níquel para componentes internos del reactor | 142 |
| 3.3.4 | Evaluación de material de reemplazo para un tanque sedimentador.. | 143 |
| 4. | Conclusiones finales | 145 |
| 4.1 | Conclusiones de la Inspección de Fabricación y Asesoramiento Técnico al Proyecto CAREM25..... | 145 |
| 4.2 | Conclusiones del Asesoramiento Técnico a Nucleoeléctrica Argentina S.A. (NASA)..... | 146 |
| 5. | Anexo | 149 |
| 5.1 | Códigos, normas y especificaciones técnicas citadas | 149 |
| 5.2 | Ensayos para la determinación de corrosión intergranular..... | 152 |
| 5.3 | Diagrama de Schaeffler con regiones susceptibles a distintos daños en función de la composición..... | 153 |
| 5.4 | Glosario | 155 |
| 6. | Referencias | 158 |

1. Introducción

La tesis se realizó en la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), específicamente en el Grupo de Inspección e Ingeniería de Materiales y Componentes (GIIMC), que pertenece a la Gerencia de Área Energía Nuclear (GAEN) del Centro Atómico Constituyentes.

En Argentina, la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) es el organismo estatal responsable de la investigación y desarrollo en el campo de la energía nuclear. Además de la CNEA, existen otros actores importantes en este ámbito, como la empresa Combustibles Nucleares Argentinos S.A. (CONUAR), creada como una iniciativa de la CNEA, cuyo objetivo principal es la producción de combustibles nucleares, así como soluciones de manufactura y servicios especiales.

Por último, la empresa Nucleoeléctrica Argentina S.A. (NASA) se encarga de la operación de las tres centrales nucleares en funcionamiento en el país: La central de Embalse, ubicada en la provincia de Córdoba, y las centrales Atucha I (CNA I) y Atucha II (CNA II) (Figura 1), ubicadas junto al proyecto CAREM25 en la localidad de Lima, partido de Zárate, en la provincia de Buenos Aires (Figura 2).



Figura 1: Centrales nucleares Atucha I (derecha) y Atucha II (izquierda).

Fuente: Gerencia de Área CAREM.



Figura 2: Vista aérea del predio en Lima, Zárate. A la derecha, se observan las instalaciones de Atucha I y Atucha II, mientras que a la izquierda, en la zona resaltada en rojo, se encuentra el sitio donde se está construyendo el reactor nuclear CAREM25. Fuente: Gerencia de Área CAREM.

Uno de los proyectos principales de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) es la construcción del reactor nuclear CAREM25, siglas de Central Argentina de Elementos Modulares. Este reactor tiene la capacidad de generar 25 MW eléctricos y suministrar electricidad a la red, siendo suficiente para cubrir las necesidades de una población de aproximadamente 120.000 habitantes. Es el primer reactor nuclear de potencia diseñado y en proceso de construcción, llevado a cabo completamente en Argentina. El objetivo de este reactor modular, conocido como SMR (Small Modular Reactor), es desarrollar tecnología que permita la instalación futura de más reactores de baja a media potencia para satisfacer las necesidades de pequeñas ciudades o áreas remotas, así como para abastecer polos industriales con un alto consumo eléctrico o para la desalinización de agua de mar. Se puede apreciar en la Figura 3 una vista aérea de la etapa de construcción de la obra civil en noviembre de 2022.



Figura 3: Proyecto CAREM25, vista aérea de la obra civil en proceso de construcción. Noviembre de 2022. Fuente: Gerencia de Área CAREM.

El reactor modular CAREM está diseñado para operar utilizando combustible de óxido de uranio enriquecido (uranio 235), con un porcentaje entre el 3% y el 5%, y agua liviana como refrigerante. A diferencia de un reactor de agua presurizada (PWR) convencional, el CAREM tiene el núcleo, los 12 módulos de generadores de vapor, el sistema de presurización, y los mecanismos de control ubicados en un solo recipiente a presión, con un circuito primario integrado que utiliza circulación por convección natural (Figura 4).

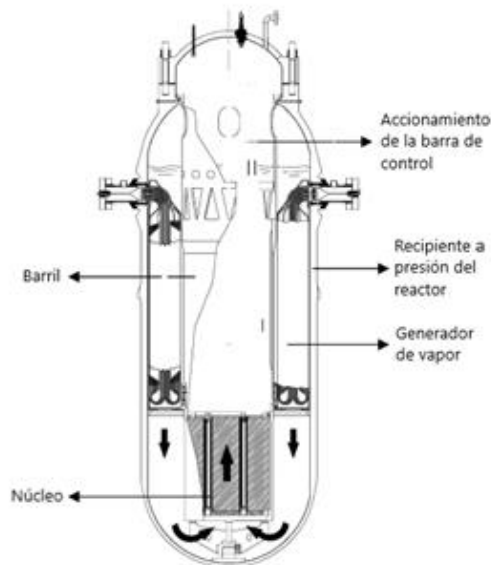


Figura 4: Esquema del sistema primario del reactor CAREM. Fuente: Gerencia de Área CAREM.

El proyecto del CAREM se inició en la década de 1980 y la construcción comenzó en 2014, con una previsión inicial de finalización en 4 años. Actualmente, el avance de la obra civil alcanza el 77%, y se espera que la construcción de la obra civil se complete para diciembre de 2024 [1], aunque se estima que la primera puesta a crítico se dará a partir de 2027 [2].

1.1 Actividad en el Grupo de Inspección e Ingeniería de Materiales y Componentes

En el Grupo de Inspección e Ingeniería de Materiales y Componentes (GIIMC) se llevan a cabo inspecciones de fabricación y soldadura, así como la selección de materiales y el asesoramiento técnico a los proyectos CAREM25 y NASA (CNA I y CNA II).

Específicamente en el grupo se trabaja en diversos aspectos relacionados con los proyectos mencionados, como la selección o reemplazo de materiales, la caracterización de materiales, la redacción de especificaciones de compra de materiales, aspectos específicos de la fabricación de componentes, la revisión de especificaciones y documentación de piezas y componentes, así como la revisión de documentos relativos a la ingeniería de fabricación.

Además, se llevan a cabo tareas de inspección de soldadura y fabricación de componentes claves del reactor CAREM25 en sus instalaciones. Esto incluye revisión de documentación y registros generados por el fabricante para garantizar la liberación final de los componentes, verificando que todo estuviera correctamente realizado y cumpliera con los requisitos de la especificación técnica y los estándares de calidad. Una vez cumplidos todos los requisitos, se otorga la aprobación al cliente, en este caso la Gerencia CAREM, para la liberación y continuación de las tareas de fabricación.

1.1.1 Inspección

Las inspecciones de componentes o de soldadura se inician a petición del cliente, quien establece los requisitos específicos. En la Figura 5 se presenta un diagrama de flujo que muestra, de manera general, los pasos a realizar para las actividades de inspección que realiza el grupo. A partir de los requisitos establecidos por el cliente, se analizan los datos y se trabaja con documentación normativa, o con especificaciones técnicas. Durante estas inspecciones, se lleva a cabo una revisión de los componentes del producto y/o equipo, que va acompañada de un análisis detallado de la documentación relacionada.

En el caso de que en un componente se realicen procesos de soldadura, se procede a revisar la documentación de soldadura correspondiente, para identificar cualquier discrepancia, asegurando su disponibilidad y verificando si la soldadura se realizó conforme a los estándares. Las decisiones sobre la calidad de la soldadura son cruciales para establecer los resultados de la inspección. Tomando principalmente como análisis la metodología de la inspección de soldadura, también se inspecciona visualmente para identificar defectos aparentes, como grietas, contaminantes (escoria o impurezas), desalineaciones, porosidad, exceso de material de soldadura y la falta de penetración. También se tomaron medidas, como el espesor, para asegurar que cumplan con las especificaciones requeridas. Del mismo modo, si se encuentra una falta de documentación de soldadura o si no es posible llevar a cabo su revisión, estas circunstancias también se consideran hallazgos.

Todos estos hallazgos, ya sean relacionados con la soldadura, la documentación o los defectos de soldadura, dan lugar a la emisión de un informe. Este informe puede contener no conformidades detectadas, recomendaciones para reparaciones o solicitudes de asesoramiento técnico. Una vez generado el informe, se envía al cliente para su revisión y evaluación, siendo requisito la verificación de la conformidad de los desvíos encontrados.

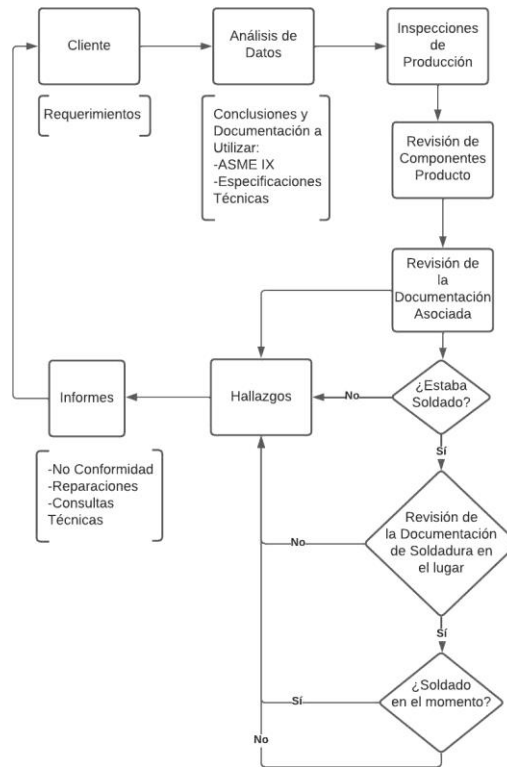


Figura 5: Flujograma de las Inspecciones.

A continuación, se detallan los procedimientos para la inspección de fabricación y soldadura, la revisión de documentos y el registro de soldaduras.

Procedimiento de inspección y revisión de registros de fabricación

El procedimiento de inspección es un documento elaborado y aprobado por el GIIMC. Este documento se utiliza para llevar a cabo inspecciones de fabricación de componentes, materiales y/o productos nucleares o no nucleares a solicitud del cliente.

En base a los lineamientos establecidos por el cliente, se deben tener en cuenta los códigos, normas y procedimientos que ellos indiquen. Durante el proceso de inspección, se pueden evidenciar algunos posibles hallazgos, entre ellos:

- Falta y/o inadecuada señalización de zona de trabajo/acopio.
- Documentación de fabricación no es copia controlada.
- Documentación de fabricación aprobada no incorpora los comentarios del cliente.
- Inadecuada identificación/trazabilidad de materiales.

- Soldadura de material sin identificación sobre el componente.
- Documentación de Soldadura (WR: Welding Record, WPQ: Welder Performance Qualification, WPS: Welding Procedure Specification, HD: History Docket, etc.) no se realiza o actualiza conforme al instructivo apropiado.
- Inadecuada identificación/ejecución de soldaduras temporarias sobre el componente.

Estos hallazgos representan desviaciones con respecto a las normas, estándares y procedimientos establecidos, y requieren acciones correctivas para asegurar el cumplimiento adecuado.

En el proceso de inspección, los hallazgos detectados durante la revisión de los registros se informan mediante la generación de un informe utilizando el formulario correspondiente para asegurar que queden registrados adecuadamente y que se tomen las acciones necesarias para resolver las situaciones identificadas.

Durante las etapas de fabricación de cualquier componente, es necesario llevar a cabo registros que estén asociados a cada proceso. Estos registros también son sujetos a revisión por parte del GIIMC. Entre las actividades que se pueden encontrar se incluyen:

- Registros con casilleros incompletos o información faltante.
- Registros sin firma del personal interviniente.
- Registros sin fecha de firma.
- Registros con información inconsistente o errónea (Identificación de juntas y/o registros, cuños, etc.).
- 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 la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) y no corregidos por el proveedor.
- No se cumple con instructivos o documentación aplicable.
- Registros realizados por personal no calificado.

Revisión de documentos y registro de soldadura

Para la revisión de documentos y registros de soldadura se siguen las pautas establecidas en el código ASME Sección IX [3].

Durante la revisión, se analizan diversos tipos de registros y documentos, como los WM (Welding Maps), WPO (Welding Procedure Qualifications), WPS (Welding Procedure Specifications) y PQR (Procedure Qualification Records). El código ASME Sección IX [3] establece los requisitos para estos documentos en las Secciones QW (Qualification Welding):

- Artículo 1 (QW 100): Requerimientos generales de soldadura.
- Artículo 2 (QW 200): Requerimientos para los WPS.
- Artículo 3 (QW 300): Requerimientos para los WPO.
- Artículo 4 (QW 400): Requerimientos de variables de soldadura (información de soldadura).

Los documentos mencionados tienen los siguientes propósitos:

- Welding Map (WM): Este documento proporciona un registro numérico de las soldaduras o uniones que se deben realizar en los materiales. Incluye información sobre los tipos de materiales base, consumibles, espesores y procedimientos. Es importante verificar que estas variables coincidan con el rango indicado en los WPS asociados.
- Welding Procedure Specification (WPS): En este registro se describen los procedimientos de soldadura que el soldador debe seguir para cumplir con los requisitos del código. Debe incluir todas las variables esenciales y no esenciales, así como las variables complementarias cuando sea necesario.

Las variables esenciales son aquellas que afectan las propiedades mecánicas de la junta, como el espesor, el material de aporte y el material base.

Las variables no esenciales son aquellas que, al variar, no afectan la resistencia mecánica de la junta.

Las variables esenciales complementarias son aquellas que, al modificarse, afectan la tenacidad de la junta soldada y la Zona Afectada por el Calor (ZAC).

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

- Procedure Qualification Records (PQR): Este documento registra las variables esenciales y complementarias (cuando sea necesario) durante la realización de la unión soldada. Además, se realizan ensayos mecánicos para probar que la soldadura descrita en el WPS es capaz de proporcionar las propiedades requeridas para la

aplicación prevista, y que cumple con las propiedades mecánicas (resistencia, ductilidad, tenacidad, etc.).

- **Welder Performance Qualification (WPQ):** Este registro contiene la calificación del soldador e incluye los datos de los ensayos realizados en las muestras de soldadura para determinar la capacidad del soldador para producir uniones soldadas correctamente. En la sección relacionada con la calificación de procedimientos de soldadura, llamada QW (calificación de soldadura), del ASME IX QW-416 se establecen las variables esenciales que deben incluirse en este documento (WPQ).

1.1.2 Asesoramiento

El proceso para llevar a cabo las asesorías, resumido brevemente en el diagrama de flujos (Figura 6), se desarrolla de la siguiente manera:

- A) Inicialmente, se recibe una consulta por parte del cliente, que puede ser CAREM o NASA.
- B) Esta consulta implica la definición de requisitos normativos relacionados con la instalación, fabricación o reparación de componentes destinados a las centrales nucleares. Además, se establecen plazos para la elaboración de estos requisitos.
- C) Para fundamentar el informe que se presentará al cliente, se han revisado investigaciones relacionadas y la literatura existente sobre el tema en cuestión. Esto incluye la revisión de normas técnicas, especificaciones existentes, manuales, libros y trabajos de investigación relevantes. Estos recursos se utilizan como base para la creación del informe, proporcionando una fundamentación siempre que se encuentren antecedentes relevantes.
- D) En la siguiente etapa, se procede a una revisión conjunta con el cliente, en la que se analiza detalladamente el contenido del informe. Durante este proceso de intercambio, se busca asegurar la precisión y adecuación de la información proporcionada. Si el informe cumple con los estándares requeridos, se aprueba y se encuentra listo para su aplicación.
- E) En caso de que se identifiquen áreas de mejora o correcciones necesarias en el informe, se trabajará en función de los comentarios del cliente. Esto puede implicar la incorporación de requisitos adicionales o ajustes en función de las sugerencias proporcionadas. Esta interacción con el cliente asegura que el informe final esté completo y preciso.
- F) Una vez que todas las partes involucradas estén satisfechas con el contenido del informe y se hayan realizado las revisiones necesarias, se

procede a su aprobación final. A partir de este punto, el informe está listo para su implementación. Este proceso de retroalimentación y revisión continua garantiza que los requisitos normativos sean cumplidos de manera efectiva y que el informe final esté completamente preparado antes de su liberación.

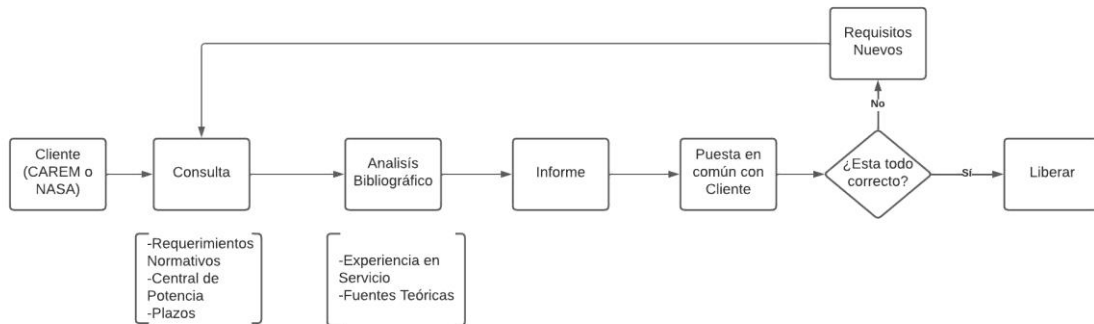


Figura 6: Flujograma de las Asesorías Técnicas.

1.2 Actividades desarrolladas en la tesis

La presente tesis se presenta como una recopilación de trabajos e investigaciones parciales teóricas, divididas en dos capítulos. El Capítulo 2 se centra en cuatro trabajos realizados para el proyecto CAREM25 de inspección y asesoramiento técnico, mientras que el Capítulo 3 comprende cuatro trabajos de asesorías técnicas realizados para las centrales nucleares Atucha I y Atucha II, operadas por Nucleoeléctrica Argentina S.A.

Exponiendo brevemente los trabajos realizados para el CAREM25, se realizaron inspecciones de soldadura y fabricación de componentes para el reactor nuclear, donde se verificó el cumplimiento de las especificaciones técnicas, tanto en las instalaciones del proyecto como en documentos en línea. Se supervisaron las tareas de soldadura e instalación según normativas autorizadas, registrando el estado de los componentes desde su recepción hasta la etapa final. Se generaron informes que resaltaron hallazgos y recomendaciones para mejorar aspectos identificados en cada inspección. Además, se llevó a cabo una revisión minuciosa de la documentación sobre fabricación y trazabilidad, incluyendo el seguimiento y los resultados de ensayos de cada componente.

Se trató también la calificación de procedimientos de soldadura en dos tipos de uniones de materiales disímiles en el proyecto CAREM25, frente al riesgo de sensibilización del material, debido a problemas en los ensayos para detectar corrosión intergranular. Dicha calificación de procesos de

soldadura involucra al acero inoxidable AISI 316Ti contra aceros al carbono IRAM F26 y ASTM A36. Estos materiales forman parte de los componentes que vinculan la obra civil con los soportes de las piletas de contención. Estas piletas son estructuras destinadas al enfriamiento y almacenamiento seguro del combustible nuclear gastado, así como de componentes internos del reactor. Además, pueden actuar como fuente de suministro adicional de agua de enfriamiento cuando sea necesario.

En el proyecto CAREM25 se trató la solución a los defectos surgidos en la obra civil del Módulo 1, específicamente en el Liner de contención del reactor, que actúa de encofrado interior con revestimiento hermético de acero inoxidable diseñado para contener productos radiactivos, en caso de accidente, y servir como sistema de enfriamiento de emergencia en un reactor nuclear. Las ondulaciones detectadas en el Módulo 1, atribuidas a distorsiones en la fabricación del Liner de acuerdo a estándares, han causado un retraso en la instalación del Módulo 4.

De los trabajos realizados para NASA, en el primero el cliente solicitó una evaluación de los componentes fabricados por KSB SE & Co, proveedor de materiales para la industria nuclear, que incluyen insertos y discos de acero inoxidable, destinados a las válvulas de reemplazo Atucha II. Se encontró que los mismos no cumplen con los requisitos mínimos de contenido de ferrita delta establecidos en los documentos de construcción, ya que presentan un rango de 1-3% en lugar del 2-10% recomendado, con el objetivo de 4-8% para los materiales a soldar, como es el caso en cuestión.

En otra oportunidad NASA solicitó una especificación técnica para el embalaje, transporte y almacenamiento de componentes metálicos Clase C1 esenciales en la central nuclear Atucha II. Estos componentes son cruciales para el sistema primario de refrigeración del núcleo y necesitan garantías de seguridad durante su transporte y almacenaje, estos componentes incluyen elementos que serán expuestos a altas temperaturas y que forman parte de la barrera de presión del reactor.

Otro de los trabajos que NASA encargó fue la elaboración de una especificación técnica actualizada para los componentes internos del reactor en las centrales nucleares Atucha I y Atucha II (CNA I y CNA II). Se requería una especificación detallada para adquirir materiales base níquel, como Inconel X-750 y 718, destinados a la producción de bulones y resortes. La especificación se redactó considerando las directrices de las centrales nucleares Atucha I y II, así como manuales como el Electric Power Research Institute (EPRI) y normas como ASTM, ASME o KTA. Esta especificación establece requisitos técnicos exhaustivos que los fabricantes deben cumplir,

abarcando aspectos como ingeniería de fabricación, procesos, exámenes y pruebas de los componentes y sus partes correspondientes.

El último trabajo solicitado por NASA buscaba reemplazar el material de un tanque sedimentador de acero al carbono que contenía ácido sulfúrico al 98% en el sistema de desmineralización de aguas de la planta nuclear Atucha II. El tanque sufría daños recurrentes por corrosión debido a salpicaduras de ácido durante purgas del sistema y procesos de limpieza, debilitando áreas donde la capa de pintura estaba dañada. Aunque el acero resistía la concentración completa del ácido, la dilución causaba deterioro. La corrosión severa dejó el tanque inutilizable, lo que obligó a enfrentar el desafío de gestionar grandes volúmenes de ácido sulfúrico al 98%. La necesidad de reemplazarlo era crucial para evitar bloqueos en el sistema aguas abajo. Se evaluaron soluciones, incluyendo materiales de reemplazo y recomendaciones de diseño para prevenir daños futuros.

2. Inspección de Fabricación y Asesoramiento Técnico al Proyecto CAREM25

2.1 Métodos

A continuación se detallan los métodos empleados para la inspección y el asesoramiento técnico al proyecto CAREM25.

2.1.1 Revisión de registros y convalidación de tubos del generador de vapor (CAREM)

El generador de vapor desempeña un papel fundamental en el proyecto CAREM25. Se llevó a cabo una revisión exhaustiva de los registros de los tubos de Inconel proporcionados por el fabricante CONUAR. El objetivo fue verificar el cumplimiento de todos los requisitos establecidos en la especificación técnica ET-CAREM25M-13-r1 B0300 [4], elaborada por el grupo de materiales de la Gerencia CAREM. Para llevar a cabo esta tarea, se focalizó en las directrices proporcionadas por el EPRI en su documento "Guidelines for PWR Steam Generator Tubing Specifications and Repair".

Durante la revisión de la documentación de los registros se examinaron documentos. Esto incluyó el Plan de Fabricación y Control, que proporciona información detallada sobre los procesos involucrados en la fabricación de los tubos, como laminación, granallado, tratamientos térmicos, lavado, pulido, enderezado, entre otros. También se revisaron las Instrucciones de Fabricación y Control, que describen los procedimientos específicos a seguir en cada etapa del proceso de fabricación.

Además, se realizaron revisiones de los documentos proporcionados por CONUAR en relación a los ensayos no destructivos realizados en los tubos de vapor. Estos ensayos incluyen corrientes inducidas, ultrasonido y análisis de señales de ruido. Estas tareas son necesarias para la liberación de la producción de estos componentes críticos.

2.1.2 Respuesta técnica para la calificación de procedimiento de soldadura - Asesoramiento 1

En la fabricación de componentes para el proyecto CAREM25 se trata la calificación de soldadura en dos tipos de uniones. Se pretende calificar estas uniones mediante el proceso de soldadura SMAW (Soldadura de arco con electrodo revestido) y el electrodo E309L.

El primer tipo de unión implica conectar placas de acero inoxidable AISI 316Ti de canales de fuga con perfiles de acero al carbono grado IRAM F26, tal como se puede apreciar en el esquema extraído de los welding map elaborados por CONUAR de la Figura 7.

El segundo tipo de unión involucra la soldadura entre barras de acero inoxidable AISI 316Ti con la placa de anclaje de acero al carbono ASTM A36 F4a y F5a, Figuras 8 y 9 respectivamente.

Las figuras 7, 8 y 9 corresponden a los Welding Map del componente perteneciente a las 6 piletas inferiores. Estos componentes cumplen un papel crucial al servir como soportes para las piletas de contención. Estas estructuras fueron diseñadas para el enfriamiento y almacenamiento seguro del combustible nuclear gastado, así como de los componentes internos del reactor. Además, pueden funcionar como una fuente adicional de suministro de agua de enfriamiento cuando sea necesario.

En consecuencia, el acero inoxidable AISI 316Ti estará expuesto al agua refrigerante del sistema secundario. Por otro lado, las partes del componente fabricadas en acero al carbono IRAM F26 y ASTM A36 vinculan la estructura con la sección civil, la cual también está compuesta de acero al carbono y no estará en contacto con el agua refrigerante.

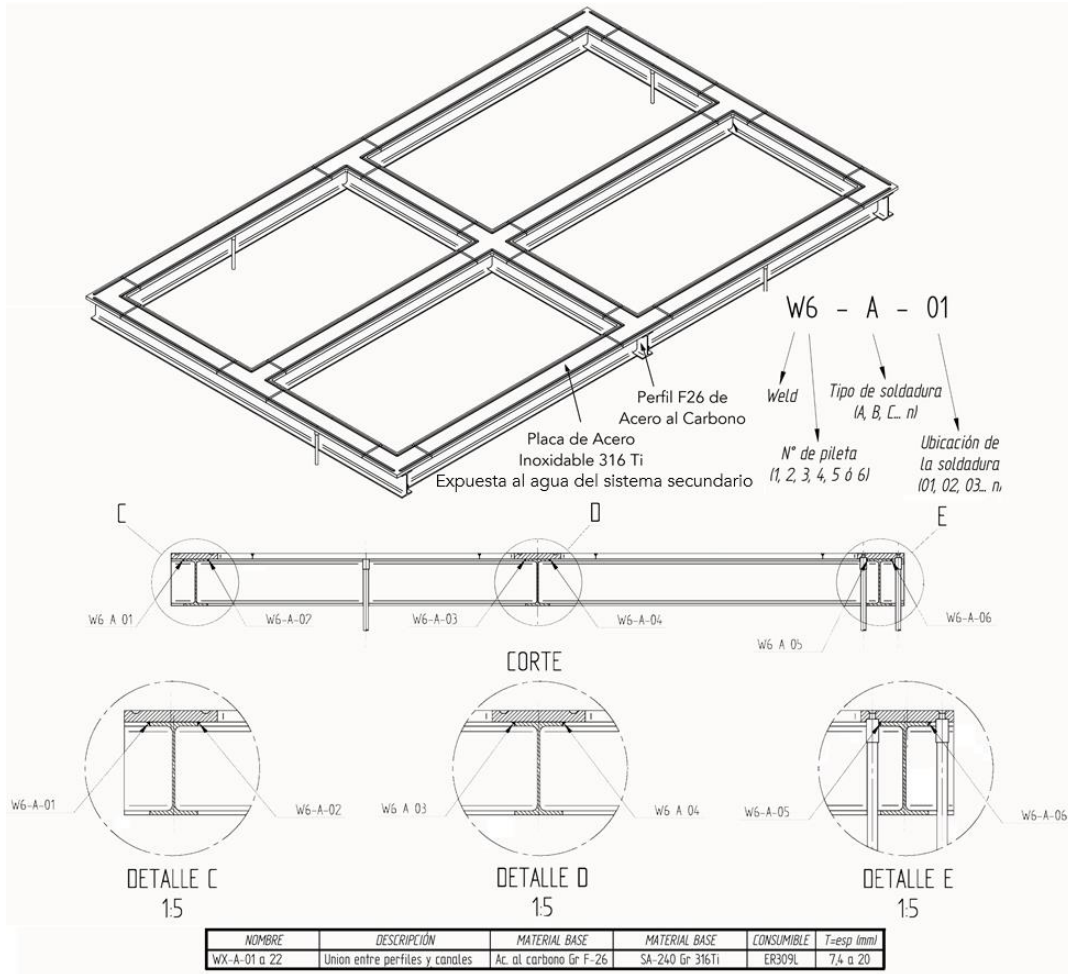


Figura 7: Se detallan las soldaduras entre las placas de Acero Inoxidable AISI 316Ti y los perfiles de Acero al Carbono grado IRAM F26.

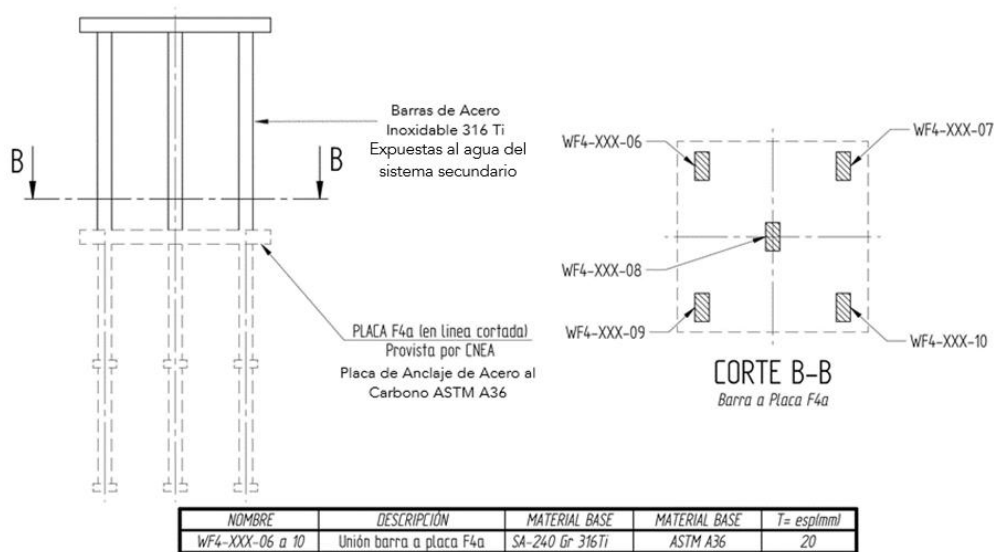


Figura 8: Se detallan las soldaduras entre las barras de unión de Acero Inoxidable AISI 316Ti y la placa de anclaje de Acero al Carbono ASTM A36.

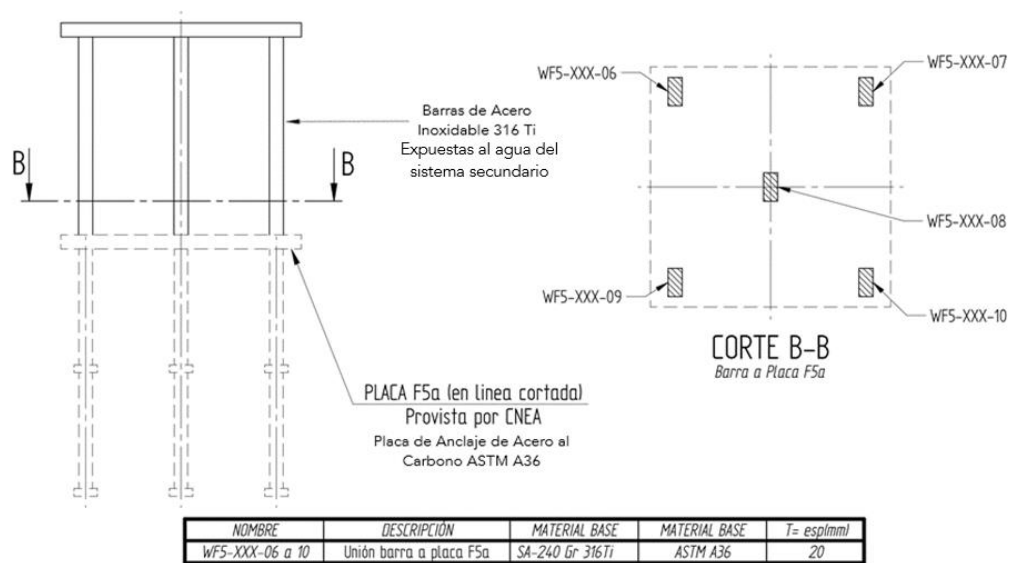


Figura 9: Se detallan las soldaduras entre las barras de unión de Acero Inoxidable AISI 316Ti y la placa de anclaje de Acero al Carbono ASTM A36.

Inicialmente, el GIIMC solicitó el ensayo ASTM A262 Práctica E [5] (ver Anexo 5.2) para detectar la corrosión intergranular en la región adyacente a la soldadura en el acero inoxidable. Esto era para descartar la presencia de carburos de cromo que podrían sensibilizar el material. Sin embargo, surgió un problema durante el ensayo A262 Práctica E, cuando al cupón de ensayo, de un lado acero inoxidable austenítico soldado contra el acero al carbono, se lo exponía a la solución cobre-sulfato de cobre-ácido sulfúrico al 16%. El ácido disolvía completamente al acero al carbono, lo que impedía realizar el posterior ensayo de plegado requerido por la misma norma.

2.1.2.1 Fenómeno de Sensibilización

Durante la soldadura de aceros inoxidables austeníticos puede ocurrir el fenómeno de sensibilización [6]. El mismo ocurre a cierta distancia del cordón de soldadura. La Figura 10 es una representación esquemática, en ella se pueden observar las franjas negras paralelas, que representan la ZAC donde podría producirse el potencial ataque intergranular. En el rango de temperatura de 600-850 °C, se produce la precipitación de carburos, lo cual conduce a la sensibilización del material [6]. Sin embargo, por encima de este rango de temperatura, los carburos vuelven a disolverse en la solución y, por lo tanto, la región adyacente al límite de fusión estará relativamente libre de carburos (suponiendo que las velocidades de enfriamiento sean lo

suficientemente rápidas como para evitar la precipitación de carburos durante el enfriamiento) [7] [8].

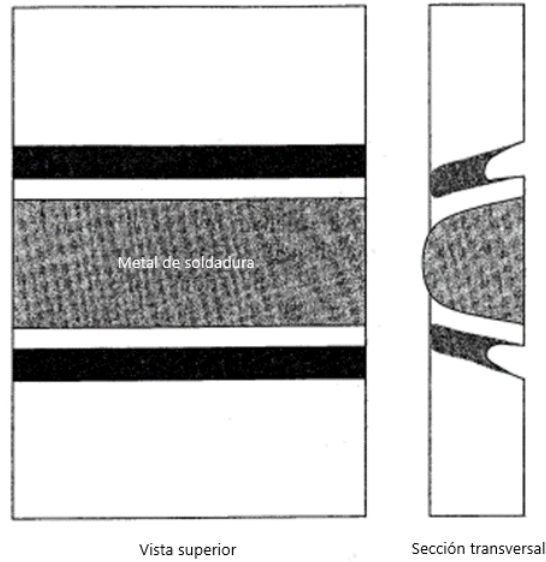


Figura 10: Región de color negro susceptible al ataque intergranular en la zona afectada por el calor (ZAC) de un acero inoxidable austenítico [7].

En la ZAC de la mayoría de los aceros inoxidables austeníticos, los carburos $M_{23}C_6$ ricos en cromo, se forman preferentemente a lo largo de los límites de grano [6], como se aprecia en la representación esquemática de la Figura 11. Esto da como resultado una zona empobrecida en cromo a lo largo del límite de grano que es sensible al ataque corrosivo, ya que al haber menos cromo disponible no alcanzará para que se forme la capa pasiva que previene la corrosión del material. De aquí que el término sensibilización se usa a menudo para describir la condición metalúrgica que conduce al ataque intergranular [7].

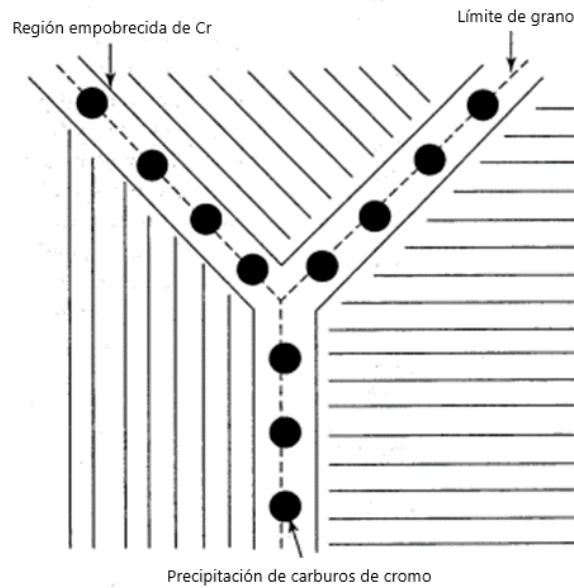


Figura 11: Precipitación de carburos en el límite de grano y agotamiento local del cromo [7].

La corrosión intergranular resulta de la precipitación localizada de carburos y carbonitruros en los bordes de grano [6]. Esta precipitación requiere de una difusión de corto alcance desde la matriz adyacente y produce una región empobrecida en cromo rodeando al precipitado. Esta región empobrecida se observa en la Figura 12 y reduce la resistencia a la corrosión local de la microestructura, lo que promueve un ataque rápido al borde de grano.

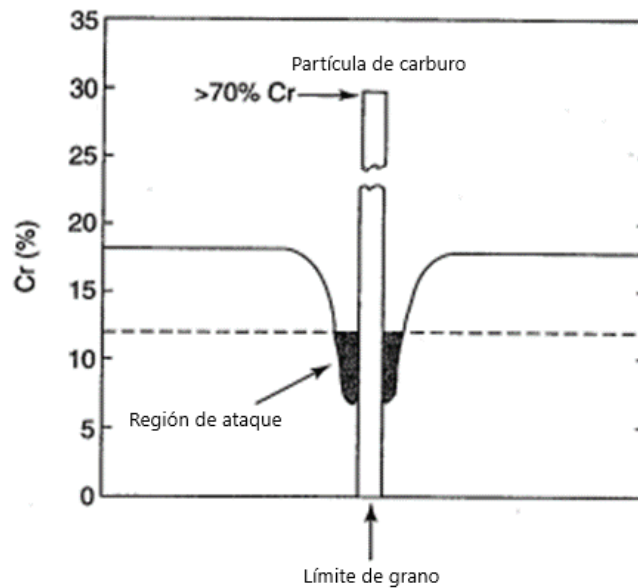


Figura 12: Agotamiento de Cr adyacente al carburo de límite de grano [7].

Para minimizar la corrosión intergranular, se pueden utilizar varios métodos. Algunas de las opciones incluyen:

1. Seleccionar metales base y de aporte con bajo contenido de carbono: Esto ayuda a reducir la formación de carburos en los bordes de grano. En el caso de los aceros inoxidable algunos grados son más susceptibles a la corrosión intergranular que otros. Por lo tanto, es importante elegir un grado de acero inoxidable que sea resistente a la corrosión intergranular para la aplicación específica.
2. Utilizar metales estabilizados con niobio (Nb) y titanio (Ti): Estos elementos forman carburos más estables que el cromo, lo que significa que tienen una mayor capacidad para consumir átomos de carbono. Minimizando la formación en los bordes de grano de carburos ricos en cromo.
3. Recocer el material base antes de la soldadura: El recocido elimina cualquier trabajo en frío anterior, ya que el trabajo en frío acelera la precipitación de carburos. Al eliminar este trabajo en frío, se reduce la susceptibilidad a la corrosión intergranular.
4. Utilizar bajos aportes de calor y temperaturas entre pasadas bajas: Esto ayuda a aumentar las velocidades de enfriamiento de la soldadura, minimizando el tiempo en el rango de temperatura en el que ocurre la sensibilización. De esta manera, se reduce la formación de carburos y se disminuye la corrosión intergranular.
5. Aplicar un tratamiento térmico post-soldadura: Calentar el material soldado a una temperatura entre 900-1100 °C puede ayudar a disolver cualquier carburo que se haya formado a lo largo de los bordes de grano. Si luego se lo enfría lo suficientemente rápido. Esto mejora la resistencia a la corrosión intergranular.
6. Realizar la soldadura utilizando un gas de protección adecuado: El uso de gases de protección como el argón o mezclas de argón con helio ayuda a reducir la contaminación y oxidación de los bordes de grano durante la soldadura. Esto evita la formación de precipitados y disminuye la susceptibilidad a la corrosión intergranular.
7. Control de la velocidad de enfriamiento: Una velocidad de enfriamiento rápida puede ayudar a prevenir la precipitación de carburos en los bordes de grano y reducir la susceptibilidad a la corrosión intergranular. Esto se puede lograr mediante la adopción de prácticas de soldadura que promuevan una rápida disipación del calor, como el uso de técnicas de enfriamiento activo o la aplicación de métodos de enfriamiento controlado [8].

Estos factores pueden ayudar a prevenir y controlar la corrosión intergranular en aceros inoxidable austeníticos. Es importante considerar

todos estos aspectos en función de las condiciones de servicio y las especificaciones del proyecto para garantizar la máxima protección contra la corrosión [7].

2.1.2.2 Composición química de los materiales involucrados

- Composición química nominal del acero inoxidable AISI 316Ti según la norma ASTM A240 que lo regula [9].

| Elemento | % en peso |
|-----------|-------------------|
| Níquel | 10,0 - 14,0 |
| Cromo | 16,0 - 18,0 |
| Molibdeno | 2,0 - 3,0 |
| Silicio | 1,00 máx. |
| Manganeso | 2,00 máx. |
| Carbono | 0,08 máx. |
| Fósforo | 0,045 máx. |
| Azufre | 0,03 máx. |
| Nitrógeno | 0,10 máx. |
| Titanio | 5 x %(C+N) - 0,70 |
| Hierro | Bal |

Tabla 1: Composición química del acero inoxidable AISI 316Ti [9].

- Composición química especificada del acero al carbono IRAM F26 [10].

| Elemento | % en peso máx. |
|----------|----------------|
| Carbono | 0,27 |
| Fósforo | 0,045 |
| Azufre | 0,050 |
| Hierro | Bal |

Tabla 2: Composición química del acero al carbono IRAM F26, para un espesor entre 7,4 a 20 mm [10].

- Composición química especificada del acero al carbono ASTM A36 [11].

| Elemento | % en peso máx. |
|----------|----------------|
| Carbono | 0,25 |
| Silicio | 0,40 |
| Cobre | 0,20 |
| Fósforo | 0,040 |
| Azufre | 0,050 |
| Hierro | Bal |

Tabla 3: Composición química del acero al carbono ASTM A36, para un espesor de 20 mm [11].

- Composición química especificada del electrodo E309L [12].

| Elemento | % en peso máx. |
|-----------|----------------|
| Carbono | 0,04 |
| Cromo | 22,0 – 25,0 |
| Níquel | 12,0 – 14,0 |
| Molibdeno | 0,75 |
| Manganeso | 0,5 – 2,5 |
| Silicio | 1,00 |
| Cobre | 0,75 |
| Fósforo | 0,040 |
| Azufre | 0,030 |
| Hierro | Bal |

Tabla 4: Composición química del electrodo E309L [12].

2.1.2.3 Análisis de la estructura resultante y predicción de posibles defectos mediante el diagrama de Schaeffler

El uso del diagrama de Schaeffler brinda la capacidad de analizar, según el electrodo y los materiales involucrados, si la soldadura resultante generará una microestructura aceptable y, lo más crucial, evitar posibles daños causados por el proceso de soldadura en la unión soldada o en la ZAC (ver Anexo 5.3). En este análisis se considera la composición química de los materiales, definida por las normas y estándares que los regulan. Estas concentraciones nominales proporcionan una base inicial para el análisis. Sin embargo, es importante tener en cuenta que estas concentraciones nominales representan un rango dentro del cual puede variar la composición real del material de colada. Debido a estas variabilidades, al trazar puntos en el diagrama de Schaeffler, se formarán bandas en lugar de puntos discretos. Estas bandas representan las posibles microestructuras resultantes para diferentes composiciones dentro del rango permitido por la norma. Dada la complejidad que requiere la representación en el diagrama de todas las composiciones posibles, se realizó el análisis considerando el valor medio de los elementos que están definidos en un rango.

A continuación, se realizará el análisis para el proceso de soldadura entre los materiales base de acero inoxidable austenítico AISI 316Ti contra los aceros al carbono IRAM F26 y ASTM A36, mediante el empleo del electrodo E309L.

$$Cr_{eq} = \%Cr + \%Mo + 1,5 \times (\%Si) + 0,5 \times (\%Nb)$$

$$Ni_{eq} = \%Ni + 30 \times (\%C) + 0,5 \times (\%Mn)$$

- Cromo y Níquel equivalente promedio para el acero inoxidable AISI 316Ti
 $Cr_{eq} = 17 + 2,5 + 1,5 \times 1 + 0 = 21$
 $Ni_{eq} = 12 + 30 \times 0,08 + 0,5 \times 2 = 15,4$
- Cromo y Níquel equivalente para el acero al carbono IRAM F26
 $Cr_{eq} = 0 + 0 + 0 + 0 = 0$
 $Ni_{eq} = 0 + 30 \times 0,27 + 0 = 8,1$
- Cromo y Níquel equivalente para el acero al carbono ASTM A36
 $Cr_{eq} = 0 + 0 + 1,5 \times 0,40 + 0 = 0,48$
 $Ni_{eq} = 0 + 30 \times 0,25 + 0 = 7,5$
- Cromo y Níquel equivalente promedio para electrodo E309L
 $Cr_{eq} = 23,5 + 0,75 + 1,5 \times 1 + 0 = 25,75$
 $Ni_{eq} = 13 + 30 \times 0,04 + 0,5 \times 1,5 = 14,95$

En el siguiente diagrama (Figuras 13 y 14), se representan los puntos correspondientes a: el acero inoxidable AISI 316Ti (a), el acero al carbono IRAM F26 (b) y el electrodo E309L (d). Al observar el gráfico, podemos notar que el punto (c), fijado por construcción, se encuentra en el punto medio del segmento (ab), lo cual indica que tanto el AISI 316Ti como el IRAM F26 participan por igual en la soldadura. Esta estimación proporciona una aproximación al escenario real, aunque se deben realizar pruebas experimentales para validar los resultados obtenidos y considerar factores que pueden afectar la dilución y la participación de los metales base, como la geometría de la junta, el método de soldadura y los parámetros de soldadura utilizados. Por otro lado, el punto (d) representa el cromo y níquel equivalente del electrodo E309L. Al unir los puntos (d) y (c), obtenemos una recta de dilución del electrodo y los materiales base.

Si la dilución de los materiales base se encuentran en el rango del 12,8% al 31,6%, puntos (f) y (e) respectivamente, la unión soldada no presentará ninguno de los daños mencionados en Anexo 5.3.

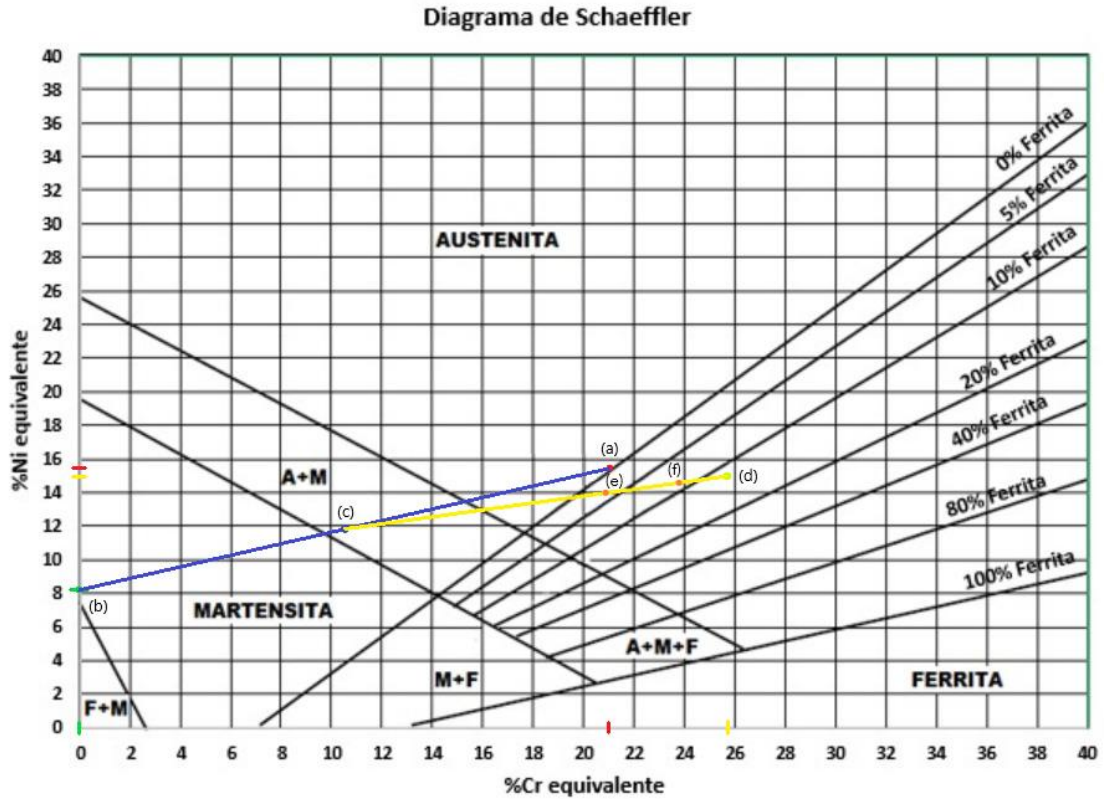


Figura 13: Diagrama de Schaeffler. (a) Acero Inoxidable AISI 316Ti. (b) Acero al carbono IRAM F26. (c) Punto medio del Acero AISI 316Ti y IRAM F26 al participar por igual en la soldadura. (d) Electrodo E309L. (e) Dilución del 31,6% de los materiales base. (f) Dilución del 12,8% de los materiales base [13][14].

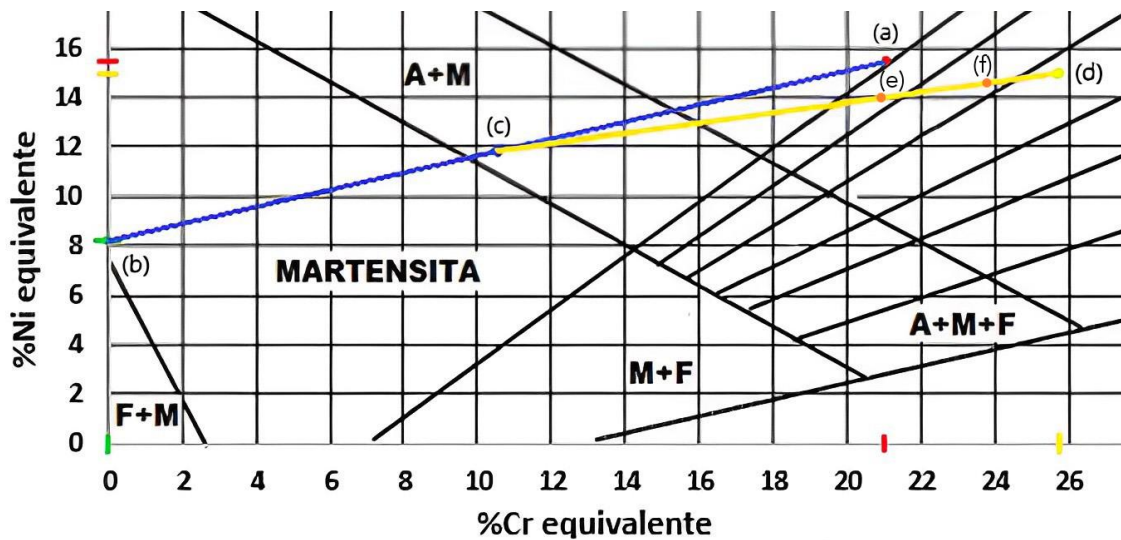


Figura 14: Ampliación del diagrama de Schaeffler de la figura 13.

En este otro diagrama (Figuras 15 y 16), se representan los puntos correspondientes al acero inoxidable AISI 316Ti (a), el acero al carbono ASTM A36 (b), el punto medio entre ambos aceros (c) y el punto de composición del electrodo E309L (d). Estos puntos se unen para formar el segmento de dilución de los materiales.

El segmento de dilución muestra que la dilución de los materiales base debería estar en el rango del 13,2% al 33,2%, puntos (f) y (e) respectivamente, para evitar posibles daños en la unión soldada debido al proceso de soldadura. Este rango garantiza una soldadura sin problemas.

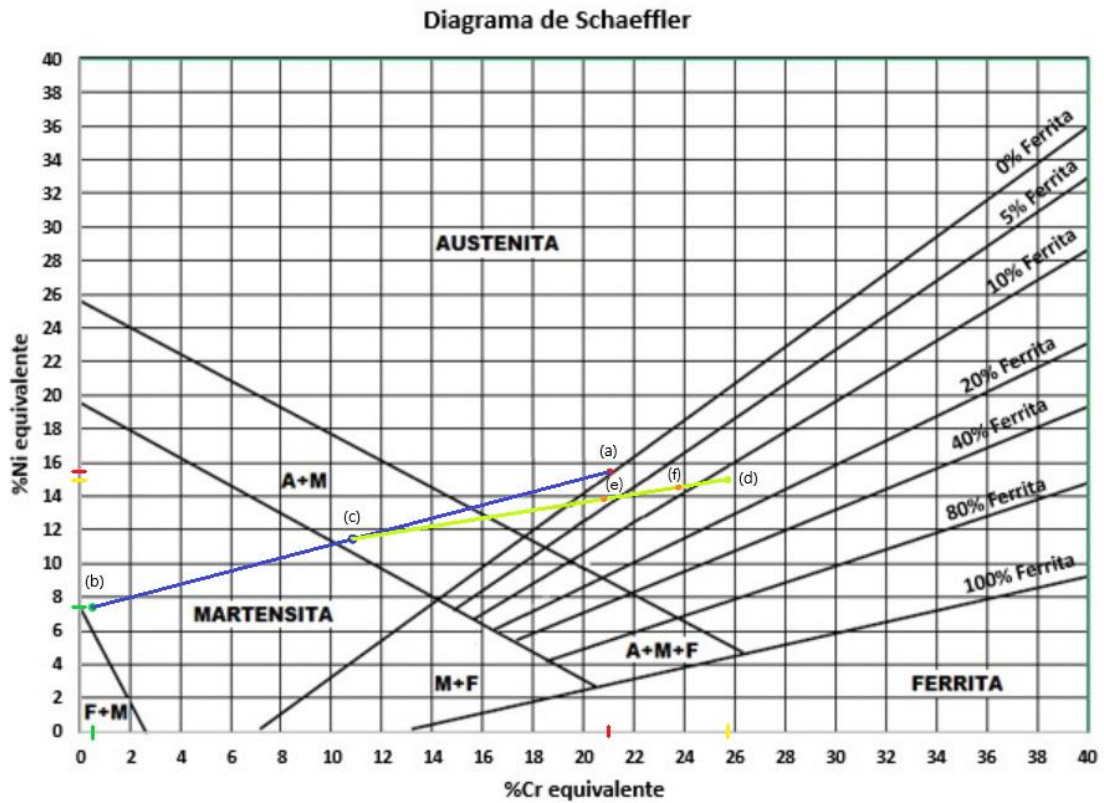


Figura 15: Diagrama de Schaeffler. (a) Acero Inoxidable AISI 316Ti. (b) Acero al carbono ASTM A36. (c) Punto medio del AISI 316Ti y ASTM A36 al participar por igual en la soldadura. (d) Electrodo utilizado: E309L. (e) Dilución del 33,2% de los materiales base. (f) Dilución del 13,2% de los materiales base [13][14].

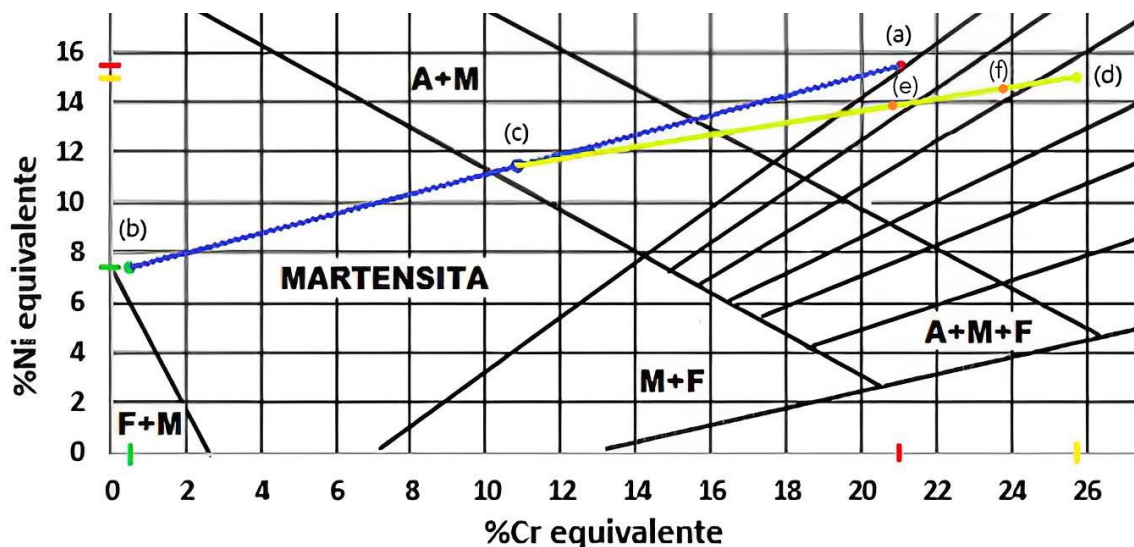


Figura 16: Ampliación del diagrama de Schaeffler de la figura 15.

2.1.2.4 Evaluación de los requisitos de calificación del procedimiento de soldadura

Según el código ASME Sección IX [3], el propósito del Registro de Calificación de Procedimiento (PQR) es demostrar que el proceso de soldadura propuesto es capaz de crear uniones con las propiedades mecánicas requeridas. Esto se logra al cumplir con los requisitos generales establecidos en dicho código, que incluyen la definición de los procesos de soldadura, los materiales, las dimensiones y los parámetros específicos. Además, implica la fabricación de muestras de prueba que serán sometidas a pruebas mecánicas y no destructivas, asegurando así las propiedades mecánicas en las juntas soldadas.

En relación al solicitado ensayo de corrosión intergranular ASTM A262 [5], es importante notar que su omisión no obstaculiza la calificación del procedimiento de soldadura. Los ensayos mecánicos requeridos por el código ASME son suficientes para obtener la aprobación del PQR. Sin embargo, es importante destacar que el ensayo de corrosión intergranular ASTM A262, constituye una prueba adicional que verifica la integridad de la junta soldada y determina si ha ocurrido o no sensibilización del material; aportando información relevante sobre la resistencia a la corrosión y la calidad de la junta soldada.

La Práctica E, del ASTM A262, ha generado inconvenientes al disolver el acero al carbono del cupón durante la exposición a la solución de cobre-sulfato de cobre-ácido sulfúrico al 16%. Para tratar este problema, se buscó modificar el ensayo siguiendo las directrices y el respaldo del código ASME. La solución propuesta implicó reemplazar el segmento de acero al carbono del cupón por el acero inoxidable empleado. Si bien esta modificación permite realizar el ensayo para determinar la corrosión intergranular, es importante reconocer que la diferencia significativa en la conductividad térmica entre los aceros genera cierta incertidumbre sobre la fiabilidad de los resultados.

2.1.2.5 Contenido y variables para la calificación de procedimientos de soldadura

El código ASME Sección IX [3] en el QW-200.2 define el PQR como un documento que registra las variables utilizadas durante la soldadura de los cupones de prueba, así como los resultados de los ensayos realizados en ellos, demostrando la capacidad del proceso de unión para producir uniones con las propiedades mecánicas requeridas. También verifica que el

procedimiento cumpla con los estándares y requisitos establecidos. En este sentido, el PQR documentará todas las variables esenciales que afectan las propiedades mecánicas. Estas variables esenciales, específicas para el proceso de soldadura SMAW en este caso, se indican en la tabla QW-253 [3].

Es relevante señalar que el PQR ofrece flexibilidad para adaptar el procedimiento a requisitos específicos. Además de las variables requeridas por el código, se pueden agregar variables no requeridas si se considera necesario para cumplir con requisitos particulares de la aplicación o el entorno en el que se utilizará la soldadura.

2.1.2.6 Ensayos requeridos para la aprobación del registro de calificación de procedimiento

Para la aprobación de un registro de calificación de procedimiento de soldadura, el código ASME Sección IX [3] en el QW-451.1 (Figura 17) establece la realización de ensayos mecánicos destructivos. Estos ensayos son necesarios para determinar si la junta del cupón y, por consiguiente, el procedimiento de soldadura cumplen con las propiedades mecánicas requeridas.

En el caso de una soldadura entre materiales disímiles, como es el caso de un acero al carbono (P1, según el código ASME se refiere a materiales de acero al carbono) y un acero austenítico (P8, según el código ASME se refiere a materiales de acero inoxidable austenítico), en el ASME sección IX el QW-424 establece que el cupón utilizado para calificar esta soldadura debe estar compuesto por los mismos materiales (P1 y P8), independientemente de su composición química.

El código establece ciertos criterios de calificación de procedimiento de soldadura. En la primera columna se especifica el espesor del cupón soldado a ensayar. En la segunda columna se especifica el rango del espesor calificado en función del espesor del cupón utilizado. Además, en la tercera columna se especifica el espesor depositado permitido.

Dado que el espesor de los materiales base a soldar es de 20 mm, se seleccionó la tercer fila, la cual establece que si se suelda un cupón mayor a 10 mm hasta 19 mm, califica un procedimiento de soldadura con un espesor de materiales base que van desde 5 mm hasta 38 mm (2T), y los 4 ensayos que se deberán realizar serán los especificados en las últimas columnas, 2 ensayos de tracción, 2 ensayos de plegado de cara y 2 ensayos de plegado de raíz. Los resultados de estos ensayos deben ser registrados en el PQR.

Tabla QW-451.1
Pruebas de tensión de soldadura de ranura y pruebas de flexión transversal

| Espesor T de cupón de prueba, soldado, pulg. (mm) | Rango de espesor T del metal base, calificado, pulg. (mm) | | Espesor máximo de metal de soldadura depositado calificado, pulg. (mm) | Tipo y número de pruebas requeridas (Pruebas de Tensión y Curvatura guiada) | | | |
|---|---|------|--|---|------------------------|------------------------|------------------------|
| | Min. | Max. | | Tensión QW-150 | Pliegue lateral QW-160 | Doblado de cara QW-160 | Doblado de raíz QW-160 |
| Menos de $\frac{1}{16}$ (1.5) | T | 2T | 2t | 2 | ... | 2 | 2 |
| $\frac{1}{16}$ to $\frac{3}{8}$ (1.5 to 10), incl. | $\frac{1}{16}$ (1.5) | 2T | 2t | 2 | [Nota 5] | 2 | 2 |
| Más de $\frac{3}{8}$ (10), pero menos de $\frac{3}{4}$ (19) | $\frac{3}{16}$ (5) | 2T | 2t | 2 | [Nota 5] | 2 | 2 |

Figura 17: Tabla QW-451.1. Fuente: ASME Sección IX [3].

El código también permite la aprobación de un procedimiento de calificación utilizando dos materiales de acero austeníticos (P8), por ejemplo el AISI 316Ti, siempre y cuando el calor aportado sea el mismo que se aplica en la soldadura entre el acero austenítico AISI 316Ti y el acero al carbono ferrítico IRAM F26 o el ASTM A36. Si el fabricante ya cuenta con un procedimiento de calificación similar, utilizando dos austeníticos de la misma categoría y los mismos parámetros de soldadura, este puede servir como referencia para no exceder el calor aportado. Esta alternativa brindada por el código, además de calificar la soldadura, también permite realizar efectivamente el ensayo ASTM A262 Práctica E [5] solicitado, el cual requiere atacar con una solución de cobre-sulfato de cobre-ácido sulfúrico al 16% al cupón de soldadura (ver Anexo 5.2). Por lo que no se presentará el problema de disolución parcial del cupón anteriormente mencionado, ya que la solución de cobre-sulfato de cobre-ácido sulfúrico al 16%, que en un principio disolvía el acero al carbono, no disolverá el acero austenítico en este nuevo cupón. Esto permitirá evaluar, mediante el posterior ensayo de plegado, si ha ocurrido sensibilización en el material producto del proceso de soldadura. Esta práctica, dadas las diferencias de conductividad térmica entre un acero al carbono y uno inoxidable, puede generar cierta incertidumbre en sus resultados.

2.1.2.7 Métodos alternativos para la determinación de corrosión intergranular

El GIIMC recomendó inicialmente llevar a cabo el ensayo de corrosión intergranular (ASTM A262 práctica E) para verificar la integridad de la junta soldada, a pesar de no ser un requisito del código.

Para la detección de corrosión intergranular, la ASTM A262 [5] recomienda otras 4 prácticas diferentes a la prueba de Strauss, práctica E de esta misma norma. Puede utilizarse cualquiera de estos otros métodos, como la prueba ASTM A262 práctica A, que requiere ácido oxálico (ver Anexo 5.2). Esta prueba se utiliza para detectar la corrosión relacionada con la precipitación de carburos de cromo, aunque no la cuantifica de la misma manera que lo hace la práctica E.

También puede realizarse la observación mediante microscopía óptica para detectar la presencia de precipitados.

Además de los métodos tradicionales como la prueba de Strauss A262 Práctica E [5] y la microscopía óptica, existen otras técnicas y enfoques que pueden proporcionar información adicional sobre la corrosión intergranular. La técnica de microscopía electrónica de transmisión (TEM), permite un análisis detallado de la estructura y composición de los precipitados y la interfaz metalúrgica en la junta soldada. Esta técnica puede proporcionar información precisa sobre la presencia y distribución de la corrosión intergranular.

También la espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS) es una técnica que se utiliza para monitorear la resistencia de polarización de la junta soldada. Este ensayo se realiza aplicando una pequeña señal eléctrica al material y midiendo la respuesta electroquímica. Los cambios en la impedancia pueden indicar la presencia de corrosión intergranular y ayudar a detectar posibles áreas afectadas.

Otra técnica más apropiada, no considerada, es la técnica DL-EPR o Reactivación Electropotenciocinética de Doble Bucle. Según investigaciones este método es una forma fácil y rápida para cuantificar el grado de sensibilización en aceros inoxidable austeníticos, como el AISI 304 y el AISI 316 [15]. Esta técnica implica la aplicación de una curva de polarización cíclica a una muestra metálica preparada. Obteniendo una curva de polarización mediante la aplicación de un barrido potenciodinámico, donde se varía gradualmente el potencial de la muestra mientras se mide la corriente resultante. Durante esta prueba, la muestra se sumerge en una solución de ácido sulfúrico con tiocionato de potasio y se monitorea el potencial y la corriente, proporcionando información sobre la sensibilización de la muestra a la corrosión intergranular.

Por otro lado, la fractografía es una técnica de análisis que se utiliza para estudiar las superficies de fractura de los materiales y obtener información sobre la causa de la falla. Si bien la fractografía no es un método específico para la detección de la sensibilización de un material o la corrosión

intergranular, puede proporcionar indicios valiosos al analizar las superficies de fractura.

En este contexto para la detección de corrosión intergranular, la fractografía se puede utilizar para identificar características distintivas de este tipo de corrosión, como la formación de fisuras intergranulares o puntos de corrosión. Estas características pueden observarse mediante microscopía óptica o electrónica.

La combinación de estos enfoques complementarios puede proporcionar una evaluación más completa a la corrosión intergranular.

2.1.3 Inspecciones al CAREM

Las inspecciones de fabricación y soldadura de los componentes del proyecto CAREM25 se realizan de manera frecuente y tiene como objetivo garantizar la calidad y cumplimiento de los estándares requeridos.

Durante las inspecciones en el sitio de construcción, se visitan tres sectores clave que actualmente se encuentran en desarrollo:

- 1) El sector del Liner de contención del reactor, donde se lleva a cabo una inspección detallada para verificar su cumplimiento con los requisitos y normas establecidas.
- 2) El área de plateas, donde se trabaja con aceros inoxidable en un sector del edificio, mientras que, en otro sector separado por una pared, se trabajan con aceros al carbono. Esto se debe a que se toman los recaudos necesarios para evitar cualquier tipo de contaminación ferrítica en el sector de aceros inoxidable, tal como lo establece la norma ASTM A 380M [16]. De esta manera, se asegura el cumplimiento de los estándares de calidad en los procesos de fabricación y soldadura.
- 3) El sector de piletas de contención, el cual se encuentra contiguo al Liner de contención (Figura 18).



Figura 18: Vista aérea del reactor CAREM en construcción a la izquierda y las piscinas de contención a la derecha. Fuente: Gerencia de Área CAREM.

Durante las inspecciones, se verifica el cumplimiento de las tareas descritas en los documentos aprobados por la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), que se encuentran detallados en la subsección 1.1.1, con el objetivo de garantizar que se sigan adecuadamente los procedimientos establecidos y que se cumplan los requisitos de calidad y seguridad en la fabricación y soldadura de los componentes del proyecto CAREM25.

Durante el proceso de inspección, cuando se realiza una soldadura, se solicitan y verifican los documentos WPS, WPQ, y PQR a los operarios. Además, se toman medidas de los parámetros de soldadura, como tensión, corriente, calor aportado, temperatura de precalentamiento y tiempo de pasada, para asegurar que se cumplan todos los valores establecidos en la WPS.

Asimismo, en la inspección se realiza un control para asegurarse de que los electrodos se mantengan a la temperatura requerida, evitando así la introducción de hidrógeno en la unión soldada, lo cual podría ocasionar fisuras. También se verifica que no haya contaminación ferrítica en los sectores que involucran aceros inoxidables.

Es importante destacar que el progreso en el proyecto CAREM ha sido limitado durante todo el trabajo, generando retrasos en la instalación de componentes, lo que ha ocasionado problemas tales como la corrosión generalizada en el Módulo 2 que se verá más adelante. Por esta razón, han solicitado asesorías con la necesidad de respuestas rápidas, aunque no se han proporcionado muchos datos cruciales para su plena evaluación.

En una inspección se identificó una falta de penetración en la soldadura que une el TCI con el Coverlid, lo que llevó a la necesidad de construir un Mockup para explorar posibles soluciones sin comprometer el material del Liner. El TCI, el TCE, y el Coverlid forman parte del Módulo 10, siendo el TCI el anillo interno, el TCE el anillo externo al Módulo 10, y el Coverlid el anillo concéntrico más pequeño dentro del reactor, sobre el cual se apoya la tapa del reactor para asegurar el sellado y la contención adecuada de los componentes nucleares (Figuras 18 y 19).

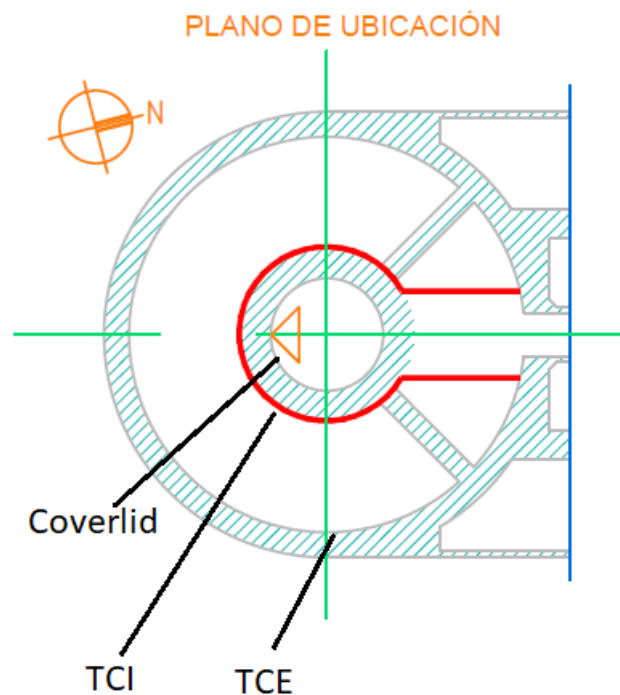


Figura 19: Plano del Módulo 10 del reactor CAREM25.

En consecuencia, durante las inspecciones subsiguientes también se monitoreó el progreso de fabricación del Mockup. Este Mockup consiste en una soldadura de prueba que utiliza los mismos materiales que se emplearán en la obra, con el fin de realizar pruebas y obtener la aprobación para la soldadura final.

Se realizó un riguroso control de otros componentes críticos, como las penetraciones troncocónicas, que desempeñan un papel vital en el alojamiento del sistema de intercambiador de calor. Estas troncocónicas forman un sistema redundante adicional para la seguridad del reactor, y su función es reducir la temperatura del reactor en caso de fallos en otros sistemas.

2.1.4 Evaluación y determinación de métodos para reparación de superficie - Asesoramiento 2

A continuación, se presentan los métodos analizados para la corrección de los defectos en la obra civil del Módulo 1, especialmente en el Liner de contención del reactor.

Se reportaron desniveles con forma de ondulaciones en el Módulo 1, en discordancia con los planos de construcción para el acero al carbono aleado DIN EN 10025-2:2005 S355 J2+N. Estas irregularidades se originaron por distorsiones durante los procesos de fabricación del Liner. Este problema causó un retraso en la instalación del Módulo 4, que debe colocarse sobre el Módulo 1. En consecuencia, se requirió una evaluación y acción inmediata para mitigar el impacto en el calendario del proyecto.

Se han evaluado dos posibles soluciones para la reparación del Módulo 1. Una opción consiste en agregar láminas de un material similar, lo que implica una revisión de las normas del código ASME Sección IX [3] para determinar si se permite la soldadura entre un material ASME y otro que no está especificado en el código, como es el caso del material base del Módulo 1 EN 10025-2:2005 S355 J2+N. Es importante tener en cuenta que, aunque el material original base cumple con la norma DIN, la construcción de la estructura del Liner se rige por el estándar ASME III División 2 (Estructuras de concreto) [17].

La otra solución propuesta es la aplicación de material de recargue, también conocido como Build-up, para lo cual se debió analizar tanto el material de aporte como el método de soldadura a utilizar.

Dado que no se proveyeron más datos como cargas actuantes y la función específica del componente, el estudio se basó en función de la problemática, del material base, la bibliografía y de las condiciones establecidas por el código de construcción ASME, por ende los resultados obtenidos en este trabajo se derivaron posteriormente al sector de Ingeniería Civil del CAREM para el cálculo y para su verificación.

2.1.4.1 Análisis de datos e información proporcionada

Las ondulaciones en el Módulo 1, se cree que fueron causadas durante su proceso de fabricación. Estas deformaciones han afectado la instalación adecuada del Módulo 4, que debe colocarse sobre el Módulo 1. La Figura

20 muestra un plano que ilustra la correcta instalación de estos componentes del reactor.

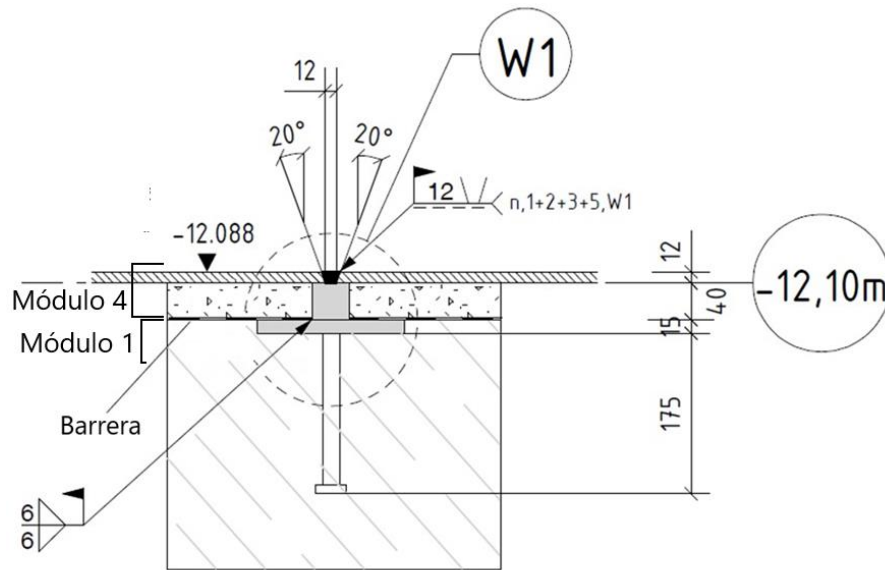


Figura 20: Plano en corte del Módulo 1 y 4. Fuente: Imagen extraída de los Welding Map elaborados por CONUAR.

En la Figura 21 se muestra una representación gráfica de las ondulaciones presentes en la superficie del material del Módulo 1.

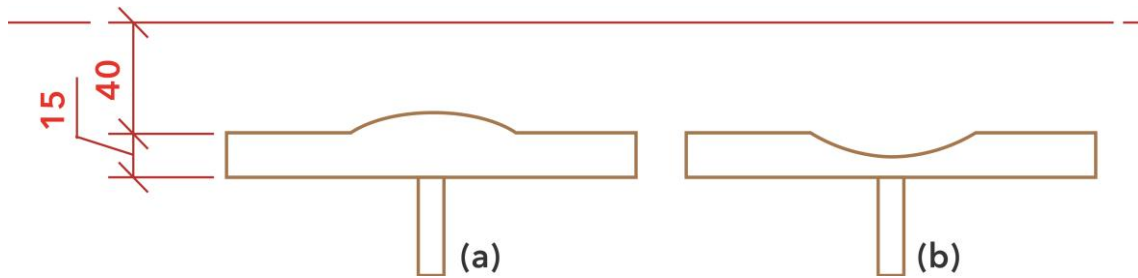


Figura 21: Ondulaciones en la superficie del Módulo 1. (a) Exceso del material en altura. (b) Falta de material en profundidad.

En la figura anterior, se puede observar que las ondulaciones presentan dos tipos de irregularidades: exceso de material en superficie y falta de material en profundidad. Para corregir las ondulaciones con exceso de material, se recomendó amolar la superficie hasta alcanzar la altura requerida. Por otro lado, para los sectores con falta de material, se analizaron las posibles soluciones mencionadas en los métodos presentados en la Figura 22.

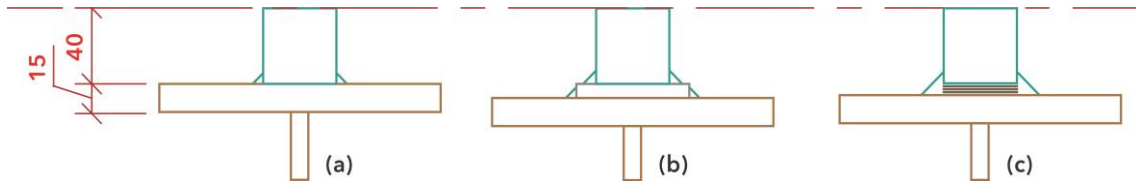


Figura 22: Instalación del Módulo 4 (celeste) sobre el Módulo 1 (marrón) (a) Ambos módulos nivelados e instalados correctamente. (b) Ambos módulos nivelados con la adición de placas en la unión. (c) Ambos módulos nivelados mediante la aplicación de material de recargue.

- **Composición química del material base del Módulo 1**

| Elemento | % en peso máx. |
|-----------|----------------|
| Silicio | 0,55 |
| Manganeso | 1,60 |
| Carbono | 0,20 |
| Fósforo | 0,025 |
| Azufre | 0,025 |
| Cobre | 0,55 |
| Hierro | Bal |

Tabla 5: Composición química del acero al carbono EN 10025-2:2005 S355 J2+N [18].

- **Propiedades mecánicas del material base del Módulo 1**

| | |
|---------------------------|---------|
| Resistencia a la tracción | 470 MPa |
| Tensión de fluencia | 355 MPa |

Tabla 6: Propiedades mecánicas del acero al carbono EN 10025-2:2005 S355 J2+N [18].

2.1.4.2 Análisis de métodos de deposición de material por soldadura para el desnivel del Módulo 1 del Liner de contención.

A continuación se presenta la evaluación de los métodos de deposición de material mediante soldadura:

- La técnica SMAW, también conocida como soldadura con electrodo revestido, es un proceso de soldadura manual ampliamente utilizado en diversas aplicaciones. Este método se basa en la utilización de un electrodo recubierto que se consume durante la soldadura, proporcionando el metal de aporte necesario [19]. Una de las ventajas de la soldadura SMAW es su bajo costo en comparación con otros métodos de soldadura. Esto la hace especialmente adecuada para operaciones en áreas de menor tamaño, donde no se requiere una alta tasa de deposición de

material. Por lo general, la tasa de deposición de la soldadura SMAW es de alrededor de 1 kg/h.

La técnica SMAW ofrece flexibilidad en términos de materiales que se pueden soldar, ya que es compatible con una amplia gama de aleaciones y espesores. Sin embargo, es importante tener en cuenta que el control del grado de fusión en la soldadura SMAW puede ser más desafiante en comparación con otros métodos de soldadura. La dificultad de controlar el grado de fusión suele oscilar entre el 15% y el 30%.

En cuanto a la cantidad de material que puede ser depositado por pasada, generalmente se pueden depositar entre 2 y 4 mm de espesor de material utilizando la soldadura SMAW. Esto puede variar según las condiciones específicas de la soldadura y la configuración del electrodo utilizado [20].

- El método GTAW, también conocido como soldadura TIG (Tungsten Inert Gas) o soldadura de arco de tungsteno, es un proceso de soldadura versátil que puede ser operado tanto de forma manual como mecánica. En este método, se utiliza un electrodo de tungsteno no consumible y se aplica protección de gas inerte para evitar la contaminación del cordón de soldadura [19].

A diferencia de otros métodos de soldadura, en la soldadura GTAW se utiliza material de aporte en forma de varillas que tienen la misma composición que el material base. Esto permite lograr una alta calidad en la soldadura y una mayor compatibilidad entre los materiales unidos. La tasa de deposición de material en la soldadura GTAW es generalmente de alrededor de 2 kg/h.

La soldadura GTAW es especialmente recomendada para aplicaciones en áreas pequeñas y de tamaño mediano, ya sea para reparaciones o para la fabricación de nuevas piezas. Su equipamiento es relativamente de bajo costo y se caracteriza por ofrecer un mayor nivel de precisión y control en comparación con otros métodos de soldadura.

En términos de control del proceso, la soldadura GTAW permite un grado de control que oscila entre el 10% y el 30%. Esto significa que los parámetros de soldadura, como la corriente, el voltaje y la velocidad de avance, pueden ajustarse con mayor precisión para lograr resultados óptimos en cada aplicación.

En cuanto a la cantidad de material de aporte depositado por pasada, la soldadura GTAW permite depositar entre 1,6 y 5 mm de espesor de material. Esta variación en el rango de deposición está influenciada por factores como la configuración del electrodo, el tamaño de la varilla de aporte y las condiciones específicas de soldadura [20].

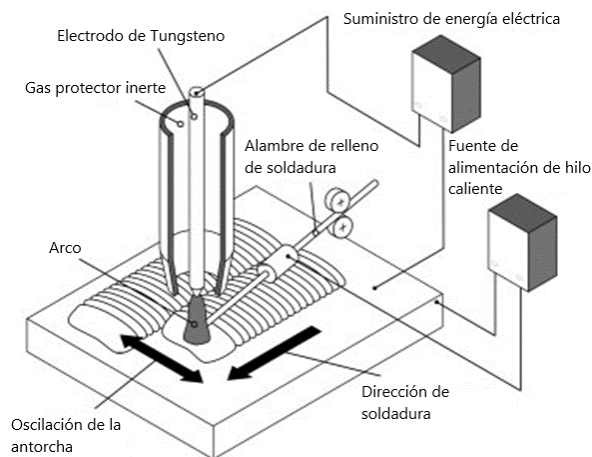


Figura 23: Representación esquemática de la técnica GTAW.
Fuente: Modern Surface Technology [20].

- El proceso GMAW, también conocido como soldadura MIG (Metal Inert Gas) o soldadura de arco con gas de protección, ofrece versatilidad tanto en su operación manual como en su automatización. En este proceso, se utiliza un alambre central de aporte que tiene la misma composición que el material base. El alambre se alimenta continuamente a través de una antorcha de soldadura, y se utiliza un gas de protección inerte para evitar la contaminación del cordón de soldadura [19].

La soldadura GMAW es conocida por su alta tasa de deposición, que generalmente oscila entre 8 y 9 kg/h. Esto significa que se puede depositar una cantidad significativa de material de aporte en un corto período de tiempo, lo que la hace especialmente eficiente en términos de productividad.

En cuanto al equipamiento utilizado en la soldadura GMAW, suele tener un costo más elevado en comparación con otros métodos de soldadura. Sin embargo, esta inversión puede ser justificada por la versatilidad y eficiencia que ofrece. La soldadura GMAW puede ser empleada tanto en pequeñas como en grandes áreas, ya sea para reparaciones o para la fabricación de nuevas piezas.

Este método también destaca por su alto grado de control, que se sitúa en un rango entre el 15% y el 25%. Esto significa que se puede ajustar y controlar de manera precisa la corriente, el voltaje y otros parámetros del proceso para obtener resultados óptimos en términos de calidad y apariencia del cordón de soldadura.

En términos de la cantidad de material de aporte depositado por pasada, la soldadura GMAW permite depositar entre 4 y 8 mm de

espesor de material. Este rango de deposición puede variar en función de factores como el diámetro del alambre de aporte, la configuración de la antorcha y las condiciones específicas de soldadura [20].

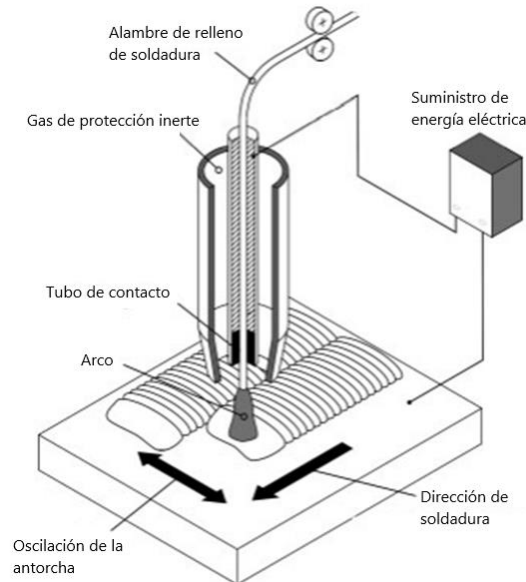


Figura 24: Representación esquemática de la técnica GMAW.
Fuente: Modern Surface Technology [20].

2.1.4.3 Método 1: Adición de láminas de material de similar composición

Como consecuencia del desnivel identificado y la propuesta de CONUAR de rellenar la falta de material con láminas de un material similar al original, se llevó a cabo un estudio que abarcó desde los aspectos mecánicos requeridos, composición química de todos los materiales involucrados, hasta los procedimientos necesarios para realizar la reparación mediante la adición de láminas.

La selección del acero al carbono SA 516 Gr 60 fue realizada por CONUAR, quienes determinaron que era el material adecuado y contaban con stock disponible.

La elección del electrodo de aporte E8018-B2 se realizó después de evaluar diversos materiales consumibles de soldadura disponibles en el mercado argentino. Para este propósito, se consultó a los principales proveedores de varillas de soldadura para CONUAR, entre los que se incluyen Welding Solutions S.A., el proveedor oficial de Lincoln Electric en Argentina, y ESAB (Electric Welding and Cutting Ltd.), que forma parte de CONARCO Alambres y Soldaduras S.A.

Al llevar a cabo la evaluación, se tomaron en consideración factores primordiales, como la composición química, la resistencia mecánica y el bajo contenido de hidrógeno. La elección de estos factores tenía como objetivo lograr una compatibilidad metalúrgica óptima para prevenir la formación de fisuras, inclusiones o el deterioro de las propiedades mecánicas. Además, se buscaba un comportamiento mecánico deseable, con una tensión de fluencia y resistencia a la tracción para el componente en cuestión, igual o mejor que las propiedades originales del material del Módulo 1.

Por lo tanto, frente a los diversos consumibles ofrecidos en el mercado, el E8018-B2 resultó ser la opción más adecuada debido a su diseño específico para la soldadura de materiales de baja aleación, su resistencia a la fisuración por temple, su composición química similar al material original (EN 10025-2:2005 S355 J2+N y al SA 516 Gr 60 de las láminas) y su resistencia mecánica ligeramente superior.

Si bien el electrodo E7018 también puede ser utilizado para soldar estos dos materiales, posee elementos de aleación, como níquel y vanadio, que no están presentes en el SA 516 Gr 60, en comparación con el E8018-B2. Por lo tanto, no es la opción más adecuada para soldar estas láminas.

Composición química y propiedades mecánicas del material de suplemento para reparación del Módulo 1 SA 516 Gr 60 y del electrodo E8018-B2

| Elemento | % en peso |
|-----------|-------------|
| Silicio | 0,15 – 0,40 |
| Manganeso | 0,60 – 0,90 |
| Carbono | 0,21 máx. |
| Fósforo | 0,025 máx. |
| Azufre | 0,025 máx. |
| Hierro | Bal |

Tabla 7: Composición química del acero al carbono SA 516 Gr 60 [21].

| | |
|---------------------------|-------------|
| Resistencia a la tracción | 415-550 MPa |
| Tensión de fluencia | 220 MPa |

Tabla 8: Propiedades mecánicas del acero al carbono SA 516 Gr 60 [21].

| Elemento | % en peso máx. |
|-----------|----------------|
| Cromo | 1,00 - 1,50 |
| Molibdeno | 0,40 - 0,65 |
| Hierro | Bal |
| Carbono | 0,05 - 0,12 |
| Manganeso | 0,90 |
| Fósforo | 0,030 |
| Azufre | 0,030 |
| Silicio | 0,80 |

Tabla 9: Composición química del electrodo E8018-B2 [22].

| | |
|---------------------------|---------|
| Resistencia a la tracción | 552 MPa |
| Tensión de fluencia | 414 MPa |
| Elongación a rotura | 20 % |

Tabla 10: Propiedades mecánicas del electrodo E8018-B2 [22].

Determinación de aceptación del material SA 516 Gr 60 como suplemento

Dado que CONUAR no cuenta con el material base DIN EN 10025-2:2005 S355 J2+N, se propuso utilizar un material disponible con composición y propiedades mecánicas similares al material base original, que es el SA 516 Gr 60.

Para verificar el cumplimiento de los requerimientos mecánicos del material DIN EN 10025-2:2005 S355 J2+N, se procedió a evaluar sus propiedades según las especificaciones del código ASME Sección IID [23]. De acuerdo con dichas especificaciones, se establece que el material debe tener una resistencia a la tracción de 470 MPa y una tensión de fluencia de 355 MPa.

Dado que el cliente no proporcionó información adicional, como las cargas actuantes sobre el componente o su función específica, se procedió a realizar el análisis utilizando los datos disponibles en la Tabla 2 de ASME IIA-2 SA-516 [21]. En dicha tabla, se verificó que el material SA 516 Gr 60 tiene una resistencia a la tracción de 415-550 MPa. Sin embargo, el valor mínimo de resistencia no cumple con el requisito mínimo establecido para el material S355 J2+N, el cual es de 470 MPa. Por lo tanto, se solicitó al fabricante del componente que asegure que el material SA 516 Gr 60 cumpla con la resistencia mínima requerida del S355 J2+N. Esto implicó solicitarle a CONUAR que realice ensayos de tracción sobre el material SA

516 Gr 60 que poseen para determinar si cumple con la resistencia mínima de 470 MPa.

Evaluación de la compatibilidad de soldabilidad entre un material ASME y otro no especificado

De acuerdo con el código ASME Sección IX [3], la cláusula QW-423 establece y permite la soldabilidad entre un material que está incluido en la lista (QW-422) y otro que no está especificado en el código.

El material no especificado debe cumplir una composición química y propiedades mecánicas similares al material a soldar (QW-423.2).

El material no especificado debe ser identificado en el Procedimiento de Soldadura (WPS) y en el PQR, donde se deben especificar su grado, tipo, composición química y propiedades mecánicas. La tensión de fluencia del material debe ser definida por el fabricante (QW-424.1).

La sección QW-423.1 define los criterios para la calificación de soldaduras, considerando específicamente el tipo de material no especificado.

Análisis de la estructura resultante y predicción de posibles defectos mediante el diagrama de Schaeffler

El empleo del diagrama de Schaeffler es una herramienta crucial que permite identificar el tipo de acero involucrado y predecir la posible aparición de defectos en la soldadura (ver Anexo 5.3), así como la estructura resultante del cordón. Es de suma importancia aplicar este método para determinar si la soldadura entre las láminas y el material base no sufran algún tipo de daño al ser soldadas.

Para representar los aceros en el diagrama de Schaeffler (Figuras 25 y 26) se utilizaron las siguientes ecuaciones para cada material:

$$Cr_{eq} = \%Cr + \%Mo + 1,5 \times (\%Si) + 0,5 \times (\%Nb)$$

$$Ni_{eq} = \%Ni + 30 \times (\%C) + 0,5 \times (\%Mn)$$

- Cromo y Níquel equivalente para el S355 J2+N:

$$Cr_{eq} = 0 + 0 + 1,5 \times 0,55 + 0 = 0,825$$

$$Ni_{eq} = 0 + 30 \times 0,2 + 0,5 \times 1,6 = 6,8$$

- Cromo y Níquel equivalente para el SA 516 Gr 60:

$$Cr_{eq} = 0 + 0 + 1,5 \times 0,275 + 0 = 0,4125$$

$$Ni_{eq} = 0 + 30 \times 0,21 + 0,5 \times 0,75 = 6,675$$

- Cromo y Níquel equivalente para el electrodo E8018-B2:

$$Cr_{eq} = 1,25 + 0,525 + 1,5 \times 0,80 + 0 = 2,975$$

$$Ni_{eq} = 0 + 30 \times 0,085 + 0,5 \times 0,90 = 3$$

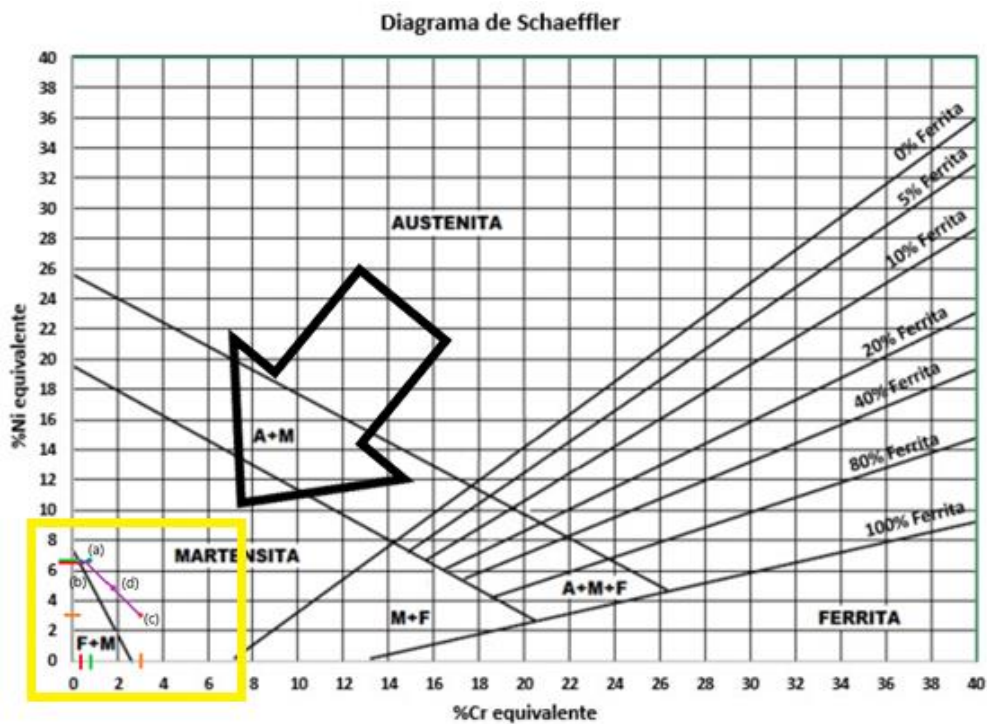


Figura 25: Diagrama de Schaeffler. (a) Acero al carbono S355J2+N. (b) Acero al carbono SA 516 Gr 60. (c) Electrodo E8018-B2. (d) Estructura de la soldadura resultante con un 50% de dilución y riesgo de fisuración por temple por debajo de 400 °C [13][14].

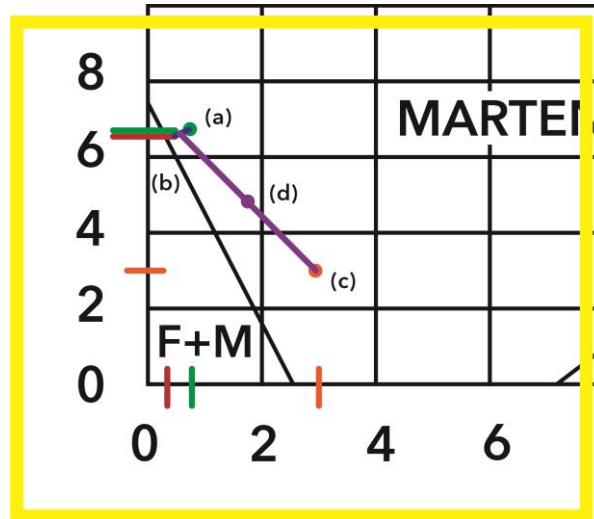


Figura 26: Ampliación del diagrama de Schaeffler de la figura 25.

Al analizar la respuesta del gráfico al realizar la soldadura entre los aceros SA 516 Gr 60 y S355J2+N, utilizando el material de aporte E8018-B2, se puede observar que la composición de la junta soldada puede experimentar transformaciones en la microestructura, dependiendo de la velocidad de enfriamiento.

Es importante tener en cuenta que la velocidad de enfriamiento durante el proceso de soldadura juega un papel fundamental en la microestructura resultante. Si la velocidad de enfriamiento es alta, es más probable que se forme martensita en la ZAC. Por otro lado, si la velocidad de enfriamiento es más lenta, es más probable que se formen ferrita y carburos.

Es importante destacar que durante el proceso de soldadura, se debe tener en cuenta la posibilidad de fisuración por temple en la ZAC (ver Anexo 5.3) cuando la temperatura desciende por debajo de los 400 °C. Este fenómeno se debe a las tensiones residuales generadas durante la soldadura y puede ser una preocupación significativa.

2.1.4.4 Método 2: Aplicación de soldadura de recargue

Evaluación de la soldadura de recargue o build-up

Entre las alternativas consideradas, se encuentra la utilización de la soldadura de recargue, también conocida como "build-up". Este método consiste en depositar material sobre otro mediante técnicas de soldadura con atmósfera protectora. Se consideran principalmente los procesos SMAW, GTAW y GMAW [20] para llevar a cabo esta técnica.

Tras realizar un análisis comparativo de los tres métodos propuestos, subsección 2.1.4.2, teniendo en cuenta sus ventajas y desventajas, se ha determinado que el proceso SMAW es la técnica más adecuada para llevar a cabo la reparación requerida debido a una serie de ventajas.

En primer lugar, el SMAW se destaca por su versatilidad. Además, su portabilidad permite llevar a cabo las operaciones de soldadura en áreas de difícil acceso o de menor tamaño.

La facilidad de uso del SMAW también es un punto a favor. Además, el proceso de aprobación de la soldadura se simplifica al poder utilizar procedimientos ya existentes. Esto no solo agiliza el proceso de ejecución, sino que también garantiza la conformidad con los estándares y normativas establecidas.

A pesar de algunas desventajas mencionadas, como la baja productividad en términos de tasa de deposición de material, es importante destacar que en el caso de la reparación en cuestión no se necesita depositar grandes cantidades de material sobre las fallas, por lo que la baja productividad no es un factor determinante.

Asimismo, la complejidad de limpieza y preparación es más pronunciada en la técnica GTAW, lo que añade un nivel adicional de complejidad y requerimientos antes de realizar la soldadura.

En cuanto a la generación de escoria, a pesar de que debe ser removida, ofrece múltiples beneficios en el proceso de soldadura. La escoria actúa como una capa protectora sobre el cordón de soldadura, lo que puede ayudar a reducir la aparición de tensiones al minimizar la exposición del metal base al aire y ralentizar la velocidad de enfriamiento, conduciendo a una solidificación más progresiva y uniforme del cordón de soldadura. Esto contribuye a una soldadura más uniforme y con menos tensiones residuales. Además, la escoria evita salpicaduras o proyecciones durante la soldadura y proporciona resistencia al flujo del metal de aporte fundido, permitiendo un mayor control en la forma de la soldadura.

Un beneficio adicional de la escoria es su capacidad para capturar y atrapar impurezas presentes en el metal base y en el entorno circundante. Esto contribuye a mantener una soldadura más limpia y de mayor calidad al evitar la formación de inclusiones y defectos en el cordón de soldadura.

Composición química y propiedades mecánicas del electrodo E7018

Tras realizar una búsqueda por catálogo de los electrodos disponibles en el mercado argentino a través de proveedores como Welding Solutions S.A. y ESAB, se determinó que el electrodo más adecuado para llevar a cabo la reparación mediante el proceso de soldadura SMAW es el E7018. Esto se debe a que el material base original, el EN 10025-2:2005 S355 J2+N, presenta una composición química más similar a dicho electrodo en comparación con los demás disponibles. Además, este electrodo presenta una resistencia a la tracción y tensión de fluencia ligeramente mejores que el material original. Al ser de bajo contenido de hidrógeno, disminuye la formación de defectos de soldadura, como lo son la fragilización por hidrógeno, las porosidades, y la fisuración por temple. Además, este electrodo es versátil y adecuado para un amplio rango de aplicaciones, específicamente en este tipo de acero de baja aleación. Además, este electrodo es versátil y adecuado para un amplio rango de aplicaciones, específicamente en este tipo de acero de baja aleación.

A continuación, se presentan las propiedades mecánicas (Tabla 11) y la composición química correspondiente (Tabla 12) del electrodo, las cuales han sido extraídas de la Sección IIC del código ASME [24].

| | |
|---------------------------|---------|
| Resistencia a la tracción | 490 MPa |
| Tensión de fluencia | 400 MPa |

Tabla 11: Propiedades mecánicas del electrodo E7018 [24].

| Elemento | % en peso máx. |
|-----------|----------------|
| Níquel | 0,30 |
| Cromo | 0,20 |
| Molibdeno | 0,30 |
| Hierro | Bal |
| Carbono | 0,15 |
| Vanadio | 0,08 |
| Manganeso | 1,60 |
| Fósforo | 0,035 |
| Azufre | 0,035 |
| Silicio | 0,75 |

Tabla 12: Composición química del electrodo E7018 [24].

Estos datos son fundamentales para garantizar la selección adecuada del electrodo y asegurar que cumpla con las propiedades mecánicas requeridas para la reparación del componente.

Análisis de la estructura resultante y predicción de posibles defectos mediante el diagrama de Schaeffler

Los resultados obtenidos en el diagrama de Schaeffler son fundamentales para determinar si el electrodo seleccionado es apropiado para llevar a cabo la tarea de relleno en el material del Módulo 1.

Para representar los aceros en el diagrama de Schaeffler (Figuras 27 y 28), se utilizan las siguientes ecuaciones para determinar el cromo y níquel equivalente.

$$Cr_{eq} = \%Cr + \%Mo + 1,5 \times (\%Si) + 0,5 \times (\%Nb)$$

$$Ni_{eq} = \%Ni + 30 \times (\%C) + 0,5 \times (\%Mn)$$

Estas ecuaciones permiten calcular los valores de cromo y níquel equivalentes para el acero en cuestión, y así ubicarlo en el diagrama de Schaeffler para analizar su composición y prever posibles problemas de solidificación y formación de fases indeseables.

- Cromo y Níquel equivalente para el S355 J2+N:

$$Cr_{eq} = 0 + 0 + 1,5 \times 0,55 + 0 = 0,825$$

$$Ni_{eq} = 0 + 30 \times 0,2 + 0,5 \times 1,6 = 6,8$$

- Cromo y Níquel equivalente para el electrodo E7018:

$$Cr_{eq} = 0,2 + 0,3 + 1,5 \times 0,75 + 0 = 1,625$$

$$Ni_{eq} = 0,3 + 30 \times 0,15 + 0,5 \times 1,6 = 5,6$$

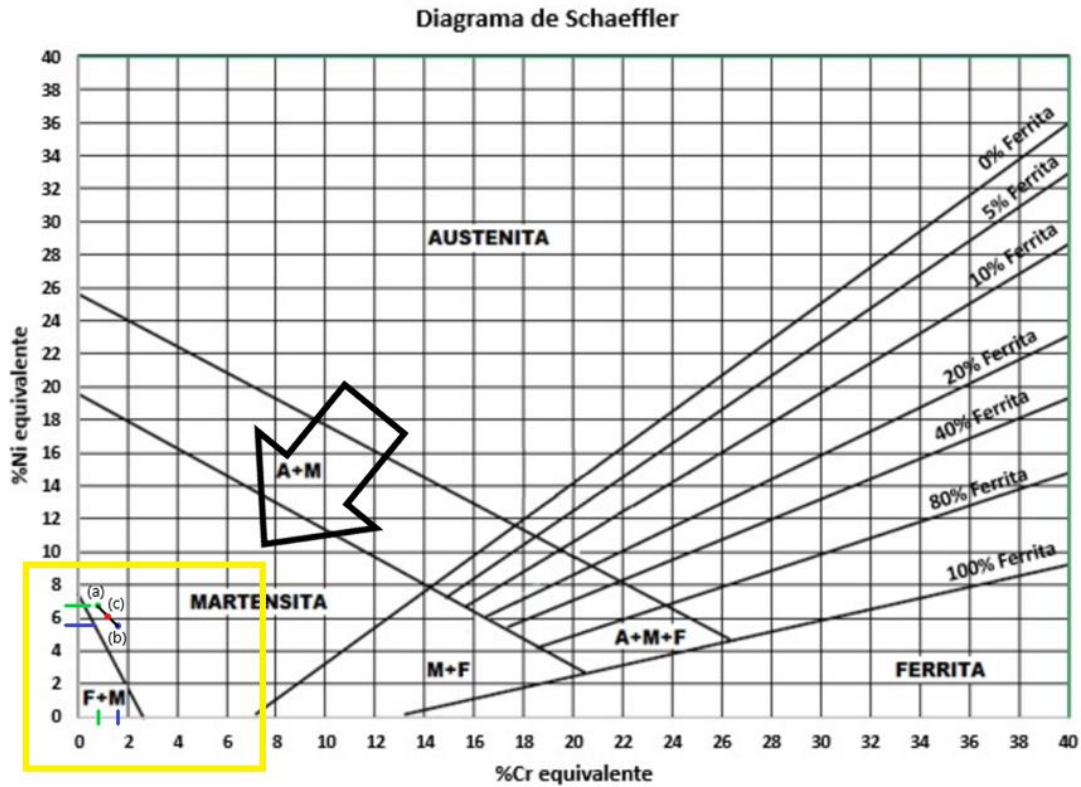


Figura 27: Diagrama de Schaeffler. (a) Acero al carbono S355J2+N. (b) Electrodo E7018. (c) Estructura de la soldadura resultante con un 50% de dilución y riesgo de fisuración por temple por debajo de 400 °C [13][14].

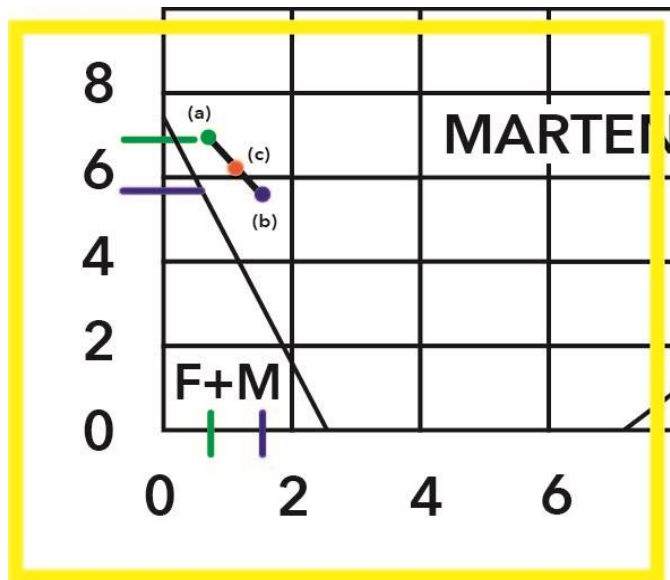


Figura 28: Ampliación del diagrama de Schaeffler de la figura 27.

Utilizando el diagrama de Schaeffler (Figuras 27 y 28) y trazando los puntos de cromo y níquel equivalente del material base S355J2 y del electrodo E7018, se ha determinado que la estructura resultante en el

cordón de soldadura será martensita si la velocidad de enfriamiento es lo suficientemente alta. Por otro lado, si la velocidad de enfriamiento es más lenta, la estructura será ferrita o perlita.

Adicionalmente, se ha identificado un riesgo potencial de fisuración por temple por debajo de los 400 °C (ver Anexo 5.3). Este riesgo puede manifestarse en la ZAC, donde las temperaturas pueden elevarse sin llegar a los 400 °C. Esta situación implica que la microestructura en la ZAC puede variar y estar sujeta a cambios significativos. La velocidad de enfriamiento, así como la duración y la temperatura máxima alcanzada en la ZAC, son factores determinantes en la formación de la microestructura resultante.

2.2 Resultados y Discusión

En esta sección se presentan los resultados obtenidos en los trabajos realizados para el proyecto CAREM25 y la discusión de los mismos.

2.2.1 Revisión de registros y convalidación de tubos del generador de vapor (CAREM)

En las observaciones realizadas, se identificó que la certificación de calificación de un técnico ensayista de corrientes inducidas estaba vencida al momento de realizar los ensayos correspondientes. Esta situación fue reportada en el informe de inspección IN-EN_GMAT-GIIMC-069 [25].

Por otro lado, se realizó la convalidación de los registros de los tubos de Inconel 690 del generador de vapor, donde se corroboró que se cumplían con los requisitos establecidos en el documento ET-CAREM25M-13-r1 B0300 [4] el cual indica los requerimientos de los tubos rectos que serán procesados para elaborar el mazo de tubos de los generadores de vapor del CAREM tomando como base una guía del EPRI ("Guidelines for PWR Steam Generator Tubing Specifications and Repair") [26]. Adjuntando en el informe de inspección IN-EN_GMAT-GIIMC-069 [25] la cantidad de tubos aprobados y rechazados en los ensayos no destructivos.

2.2.2 Respuesta técnica para la calificación de procedimiento de soldadura - Asesoramiento 1

2.2.2.1 Diagramas de Schaeffler y dilución óptima

Tras la investigación llevada a cabo en relación con la composición química de los materiales empleados, se aplicó el enfoque del diagrama de Schaeffler. Este método proporcionó valores de dilución de los componentes base con el electrodo. Suponiendo un aporte equitativo del 50% tanto del acero inoxidable AISI 316Ti como del acero al carbono IRAM F26, los resultados indicaron que el intervalo de dilución óptimo debería oscilar entre el 12,8% y el 31,6%. El electrodo E309L contribuiría al resto. Manteniéndose dentro de estos márgenes, se anticipa la ausencia de posibles fallos en la soldadura.

Del mismo modo, se procedió a evaluar la unión entre el acero inoxidable AISI 316Ti y el acero al carbono ASTM A36, también con una distribución de 50% para cada material. De acuerdo con el método, se estimó una dilución en el rango del 13,2% al 33,2%, suministrando el resto con el electrodo E309L.

La elaboración de un diagrama de Schaeffler con todas las bandas posibles puede ser extremadamente complejo e inviable, debido a las variabilidades en las composiciones químicas. Por lo tanto, se recomienda obtener la composición específica de colada del material para futuros análisis, lo que proporcionaría resultados más precisos.

La investigación llevada a cabo por Ricaurte Ospina Lopez y colaboradores [13] ha delineado las regiones de susceptibilidad en el diagrama de Schaeffler donde los procesos de soldadura podrían ocasionar daños. Por lo tanto, resulta crucial mantener controlados los niveles de dilución tanto de los componentes base como del material de aporte.

2.2.2.2 Tratamientos térmicos post-soldadura

En concordancia con lo anterior, el estudio efectuado por J. P. Z. Sloderbach [27] sugiere la conveniencia de aplicar tratamientos térmicos posteriores a la soldadura, como el recocido, revenido o la relajación de tensiones. Esto es especialmente relevante si la dilución resulta excesiva, ya que podría dar lugar a defectos tales como porosidad o inclusiones, así como a características microestructurales diferentes de las del material base al solidificarse. Investigaciones previas, como la realizada por el Nickel

Development Institute [28], respaldan estos hallazgos, indicando que una dilución excesiva puede conllevar a una estructura de grano más grande y menos refinada en comparación con el material base.

En consecuencia, se resalta la importancia de controlar la soldadura y la baja dilución de los materiales base para limitar la mezcla entre los componentes originales y el material añadido. Esto ayudará a mantener las propiedades mecánicas iniciales de los materiales base en la ZAC, lo que finalmente resultará en uniones más fuertes.

2.2.2.3 Formación de zonas duras y su impacto en la integridad estructural

Al analizar las Figuras 13 y 15, es importante tener en cuenta que, aunque el diagrama de Schaeffler indique que ambas soldaduras resultarán en una microestructura principalmente austenítica con una baja proporción de ferrita, se debe tener en cuenta que esto no garantiza que la microestructura final no sea martensítica.

La formación de una estructura martensítica dependerá de los parámetros de soldadura, las velocidades de enfriamiento y los tratamientos térmicos posteriores.

Por lo tanto, es crucial realizar un control riguroso de estos parámetros para evitar la formación de estructuras martensíticas no deseadas. Esto implica seleccionar adecuadamente los parámetros de soldadura, como la corriente, la tensión, la velocidad de avance y el precalentamiento, para minimizar las velocidades de enfriamiento rápidas que favorecen la transformación martensítica.

En la Figura 29 se muestra una ilustración gráfica de la velocidad de enfriamiento recomendada, presentada con fines ilustrativos no se basa en tasas de enfriamiento para una composición específica de electrodo. Esta velocidad evita la formación de zonas duras, como la martensita o fases intermetálicas no deseadas. Estas zonas duras pueden causar fragilidad en el componente, aumentando el riesgo de fracturas y disminuyendo su capacidad de deformación plástica. Además, la presencia de estas zonas duras y frágiles pueden comprometer la resistencia a la corrosión del acero inoxidable, ya que la martensita y las fases intermetálicas pueden ser menos resistentes a los agentes corrosivos, lo que aumenta la susceptibilidad del material a la corrosión localizada, como picaduras o corrosión intergranular, como fue observado por A. A. Omar en su investigación [29].

La formación de estas zonas duras también afectará las propiedades mecánicas del componente. Las áreas con mayor dureza y resistencia

resultantes de las zonas duras pueden generar una distribución no uniforme de tensiones a lo largo de la junta soldada. Esto puede provocar concentraciones de tensiones en las interfaces entre las zonas duras y el material circundante, lo que aumenta la posibilidad de fallas prematuras, como la propagación de fisuras.

Además de los efectos mencionados, la presencia de zonas duras puede tener un impacto negativo en la integridad estructural y la vida útil del componente. Las propiedades mecánicas alteradas y la distribución no uniforme de tensiones pueden debilitar la estructura en su conjunto, lo que puede llevar a deformaciones no deseadas o fallas estructurales.

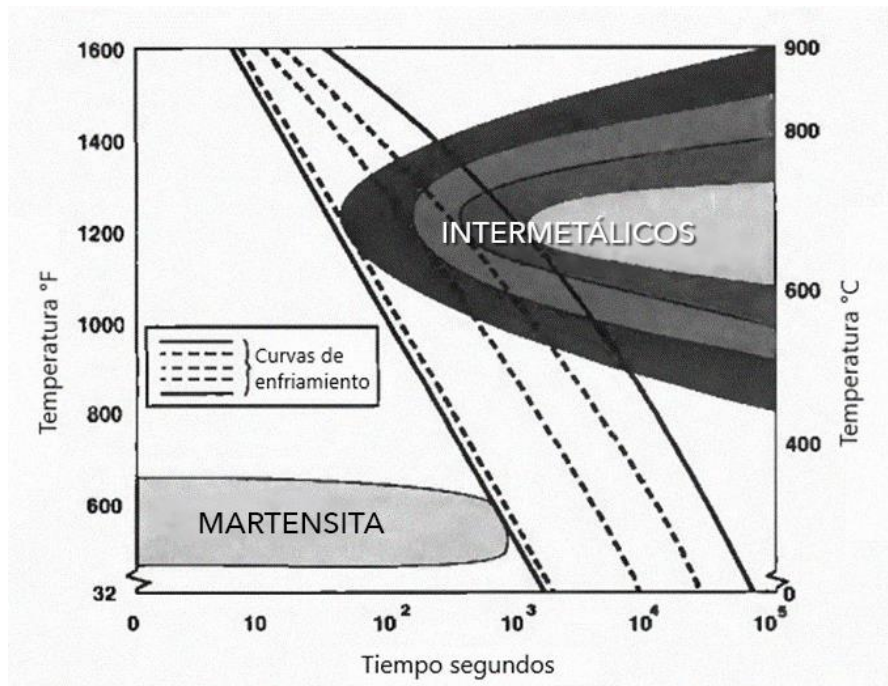


Figura 29: Ubicación de las fases intermetálicas en relación con la zona de martensita (alotrópica) y curvas de enfriamiento típicas, la curva sólida de la izquierda es la deseada para evitar la formación de zonas duras [29].

2.2.2.4 Formación de óxidos en fisuras

Según R. L. Klueh y equipo [30] las fisuras se forman en las zonas de precipitación y a lo largo de los límites de grano paralelos a la línea de fusión conteniendo partículas de precipitado o por presencia de óxidos.

Estos investigadores señalan que en sus experimentos de soldadura de materiales disímiles, se observa que el material con un alto contenido de cromo, que le proporciona resistencia a la corrosión, experimenta una disminución del cromo en las partículas cercanas a los límites de grano, que son paralelas a la línea de fusión. Esto ocurre debido a la formación de

carburos de cromo, lo que conduce a la formación de una hendidura de óxido en la superficie exterior. Esta hendidura se debe a la pérdida de resistencia a la corrosión que previamente proporcionaba el cromo, que ahora está ausente en esa área en particular. En contraste, en otras partes del material donde no se forma la hendidura, el grosor del óxido es similar al de otras áreas del acero [30].

La pérdida de cromo en la matriz y la difusión de carbono hacia el metal de soldadura conducen a una disminución de la resistencia y a una concentración de tensiones en la región. Una vez que se inicia una fisura, su propagación se produce debido a tensiones externas, las tensiones térmicas cíclicas (debido a las diferencias en los coeficientes de expansión térmica de los materiales de la unión) y posiblemente las tensiones generadas por el óxido que se forma dentro de la fisura. La baja resistencia a la oxidación en la región adyacente a los límites de grano paralelos a la línea de fusión favorece la continuación de la oxidación a lo largo de la fisura. La concentración de deformación en la muesca de óxido reduce la capacidad del material para resistir tensiones y aumenta su susceptibilidad a la fractura, lo que resulta en una falla de baja ductilidad. Por lo tanto, la formación de una muesca de óxido debido a la corrosión puede contribuir a la reducción de la capacidad de absorción de energía del material y a la aparición de una falla de baja ductilidad [30].

2.2.2.5 Consideraciones normativas y recomendaciones de ensayos

Por otro lado, en cuanto a la revisión del marco normativo, específicamente en el código de construcción ASME IX [3], se establece una perspectiva interesante. Según este código, se plantea que el ensayo ASTM A262 [5] puede prescindirse, ya que el propio ASME IX QW-451.1 (Figura 17) detalla los ensayos necesarios. No obstante, es importante considerar la posibilidad de sensibilización. En este sentido, se recomienda llevar a cabo el solicitado ensayo ASTM A262 práctica A, o la práctica E, la cual implicó una modificación del proceso de calificación avalado por el ASME. Esto implicaría la utilización de dos aceros austeníticos pertenecientes a la misma categoría (en este caso, el acero inoxidable AISI 316Ti, objeto de análisis en este estudio) y aplicando los mismos parámetros y cantidad de calor aportado.

2.2.3 Inspecciones al CAREM

A continuación, se presentan los resultados de las inspecciones realizadas en el lugar de construcción del proyecto CAREM durante las distintas visitas efectuadas. Posteriormente, se lleva a cabo una discusión sobre estos resultados, incluyendo las medidas adecuadas para resolver los hallazgos identificados.

Resultados

Inspección del día 19 de mayo

- Durante la inspección del Módulo 8, se detectó que una soldadura circunferencial que unía el Módulo 3 al Módulo 8 no cumplía con los parámetros de precalentamiento y diseño de junta establecidos en el WPS correspondiente. Dichos módulos forman parte del Liner de contención, siendo estructuras circulares que pertenecen a la estructura del encofrado.

Además, se identificaron problemas en la documentación relacionada con el WPS, como la falta de firmas y aprobación por parte de la CNEA. También se observó la realización de una soldadura sin la documentación necesaria, incluyendo WM, PFC, WPS y WPQ.

- Durante la inspección, se observó el amolado de limpieza de las soldaduras en las penetraciones de las troncocónicas del Módulo 10 en la platea. Dos de ellas estaban siendo sometidas al proceso de amolado interno en la platea (Figura 30), mientras que otra estaba siendo radiografiada en el sector pozo, y otra esperaba a ser radiografiada en el sector platea.



Figura 30: Troncocónica en proceso de amolado, el mismo se efectuó en cordones de soldadura interiores.

- En pozo se verificó la correcta toma de parámetros de soldadura, indicados en la Figura 31, en los suplementos de las penetraciones de la soldadura circunferencial del Módulo 10. Se realizó el reemplazo correspondiente en la ecuación establecida en el punto QW-409.1 del ASME IX [3]:

$$Q = \frac{V \cdot i}{Vel}$$

Donde:

Q: Calor aportado [J/mm].

V: Voltaje de la soldadora [V].

I: Intensidad de la soldadora [A].

Vel: Velocidad de avance del cordón de soldadura [mm/s].

El calor aportado en un cordón de soldadura puede ser calculado y medido. Es crucial asegurarse de que el calor aportado no exceda los límites especificados en la WPS.

| CONUAR SM&S | | REQUERIMIENTOS GENERALES DE CONTROL DE SOLDADURAS | | PC N°: RGC5-21- FGC-1606 Rev 1 | |
|--|---------------------|---|---|-----------------------------------|--|
| Equipo/pieza: Módulo 10 / <i>SUP. PENETRAC.</i> | | WPS / WPQ: <i>1088-1-01-127</i> | | Rev 5/1088-1-37 | |
| Especificación técnica (ET): N/A | | Orden de Compra (OC): N/A | | | |
| Proyecto: Líner Metálico de Contención | | Instructivo de referencia: IT-315 | | Rev.: 2 | |
| Proveedor: CONUAR | | Plano: <i>P1088-010-401</i> | | Rev.: 2 | |
| Parámetros a controlar | Control (OK/OK*/RZ) | Observación Nro | Parámetro según WPS | Fecha | |
| Revisión de WPS y WPQ | <i>ok</i> | - | | <i>19/05/21</i> | |
| Identificación, almacenaje y manipulación de materiales de soldadura | <i>ok</i> | - | | <i>19/05/21</i> | |
| Preparación, ejecución y examinación de juntas soldadas | <i>ok</i> | - | | <i>19/05/21</i> | |
| Alineación y ajuste de pieza antes de soldar | <i>ok</i> | - | | <i>19/05/21</i> | |
| Control de parámetros de soldadura según WPS: | | | | | |
| <i>Junta</i> | <i>ok</i> | | <i>TOPE</i> | <i>19/05/21</i> | |
| <i>Metal base</i> | <i>ok</i> | (*1) | <i>P35SNL2</i> | <i>19/05/21</i> | |
| <i>Metal de aporte</i> | <i>ok</i> | (*2) | <i>ER9018MH4R</i> | <i>19/05/21</i> | |
| <i>Posición</i> | <i>ok</i> | | <i>HORIZONTAL</i> | <i>19/05/21</i> | |
| <i>Temperatura de precalentamiento y entre pasadas</i> | <i>ok</i> | | <i>TR915 T60.120</i> | <i>19/05/21</i> | |
| <i>Características eléctricas</i> | <i>ok</i> | | <i>129,7 AMP. 23,2V</i> | <i>19/05/21</i> | |
| <i>Tratamiento térmico</i> | N/A | - | | | |
| <i>Técnica</i> | <i>ok</i> | | <i>Corrión Recto</i> | <i>19/05/21</i> | |
| Observaciones: CUÑO: <i>ML</i> SOLDADURA: <i>SSM10-01</i> PINZA AMPEROMETRICA: 22-005-015 PIRÓMETRO LASER: 13-017-007 | | | Referencias: Vel. Avance: <i>23 cm/mi</i> | | |
| Calor aportado: <i>0,784 KJ/mm</i> | | | Lote de aporte: <i>φ32 2K70105</i> | | |
| No Conforme | INC N°: | Rechazado | Aprobado | | |
| Recutado | | Revisado | | Aprobado | |
| Nombre: <i>[Firma]</i> | Nombre: | Nombre: | Nombre: | | |
| Firma: <i>[Firma]</i> | Firma: | Firma: | Firma: | | |
| Fecha: <i>19/05/2021</i> | Fecha: | Fecha: | Fecha: | | |

Figura 31: Requerimientos generales de control de soldaduras. En color rojo se recuadran los parámetros empleados para la determinación del calor aportado en el cordón de soldadura. En color verde se recuadran otros parámetros sujetos a inspección.

$$Q = \frac{V \cdot i}{Vel} = \frac{23,2 V * 129,7 A}{23 \text{ cm/min}} = \frac{23,2 V * 129,7 A}{3,83 \text{ mm/s}} = 785 \frac{J}{mm} = 0,785 \frac{KJ}{mm}$$

Inspección del día 21 de julio

- En la platea, se identificaron dos troncocónicas pertenecientes al Módulo 10. Una de ellas tenía el cabezal soldado y estaba lista para la prueba hidráulica, mientras se esperaba la finalización de los ensayos no destructivos (Figura 32). Por otro lado, la otra troncocónica se encontraba en proceso de soldadura del soporte provisional, faltando la soldadura del casquete/cabezal para la prueba

hidráulica (Figura 33). Durante la inspección, se verificó que los parámetros de soldadura, como la corriente, el voltaje y la velocidad de avance, se estaban cumpliendo y registrando correctamente en ambas troncocónicas.



Figura 32: Troncocónica VM-4006 con cabezal soldado para la prueba hidráulica, pendiente de la finalización de los ensayos no destructivos (END).



Figura 33: Troncocónica VM-4273 en proceso de soldadura de soportes provisionales.

- En pozo del Módulo 10, se estaba llevando a cabo la alineación de la penetración troncocónica VM-4005, quedando pendiente el punteado para la colocación de los soportes provisionales. Además, en el mismo lugar se encontraba otra penetración troncocónica lista para su colocación y alineación.

Inspección del día 12 de agosto

- En platea, se pudo verificar que las troncocónicas VM-4006 y VM-4273 (Figura 34) del Módulo 10 presentaban los casquetes soldados, listos para la realización de la prueba hidráulica. Además, se constató que se había realizado exitosamente el ensayo de tintas penetrantes.



Figura 34: Troncocónica VM-4273 con casquete soldado.

- En la zona de pozo, se estaban llevando a cabo soldaduras en el Módulo 10, y se verificó que se estaban tomando los parámetros de soldadura de manera adecuada. Asimismo, se identificó que una troncocónica se encontraba en la zona de platea, lista para ser colocada.
- Durante la inspección, se recomendó realizar ensayos de ultrasonido en el Módulo 2 debido a la corrosión generalizada observada (Figura 35). Estos ensayos son necesarios debido al ingreso de agua de lluvia y al escaso avance en dicho Módulo.



Figura 35: Corrosión generalizada en el Módulo 2 (pared izquierda) y desnivel del Módulo 1 (suelo).

Durante esta inspección, se observó que el Módulo 1 presentaba un desnivel significativo. En la Figura 35, se puede apreciar el Módulo 1 (estructura esquelética en el suelo) que está distorsionado, presentando ondulaciones positivas y negativas. Debido a la necesidad de una pronta respuesta por parte del fabricante, se requería agilidad para avanzar con la instalación del Módulo 4, el cual se une al Módulo 1 y necesita estar correctamente alineado. Por este motivo, se llevó a cabo una evaluación para la reparación de la superficie afectada (ver subsección 2.1.4). En la Figura 39 se muestra el Módulo 4 montado y soldado al Módulo 1, luego de dicha reparación.

Además, se propusieron varias tareas a realizar a corto plazo. Estas incluyen el amolado de las costuras de todo el Liner, la soldadura de la troncocónica VM-4005 y la eliminación de la rigidización del TCE (anillo externo del Módulo 10).

Inspección del día 10 de noviembre

- En el área de pozo, se llevaron a cabo tareas de amolado de soldaduras en los Módulos 10 y 8. Durante la inspección, se identificaron ciertas imperfecciones en una soldadura circunferencial y se solicitó que se realice la reparación correspondiente.
- En el área de platea, se realizó la inspección del Mockup y se informó que se esperaba la realización de soldaduras GTAW tanto con respaldo como sin respaldo.

- Se informó que se debería agregar un inserto a una de las troncocónicas para cumplir con el diámetro requerido, y se solicitó que esta modificación se agregue al WM.
- En platea, se estaban llevando a cabo tareas de soldadura (Figura 36) y se observó que el WPS utilizado no se ajustaba al diseño de junta empleado. Es importante destacar que el diseño de junta no es una variable esencial según el código ASME IX [3], por lo que es posible que el uso de este procedimiento se haya debido a un mal entendido por parte del sector de QA del fabricante. Sin embargo, es recomendable revisar el documento para asegurarse de que coincida con los diseños de junta que se utilizarán, aunque los demás parámetros (materiales base, aporte, etc.) estén cubiertos por el WPS.



Figura 36: Tareas de soldadura al momento de la inspección.

- En las soldaduras de esquina se observaron partículas superficiales que deberán ser removidas (Figura 37).



Figura 37: Partículas superficiales detectadas en el cordón de soldadura.

- Se observó herramental de acero al carbono en contacto con placas de acero inoxidable (Figura 38), lo cual representa un riesgo de contaminación ferrítica para el acero inoxidable. Según la norma ASTM A 380M [16], que establece que las superficies de los componentes de acero inoxidable deben estar libres de cualquier contaminación ferrítica, indica que no debe entrar en contacto con ningún tipo de acero al carbono. La presencia de partículas de hierro libre, provenientes del acero al carbono, altera la composición química de la capa pasiva del acero inoxidable, induciendo a la ruptura de la pasividad del acero inoxidable, generando sitios de iniciación de la corrosión.



Figura 38: Herramental de acero al carbono en contacto con placas de acero inoxidable.

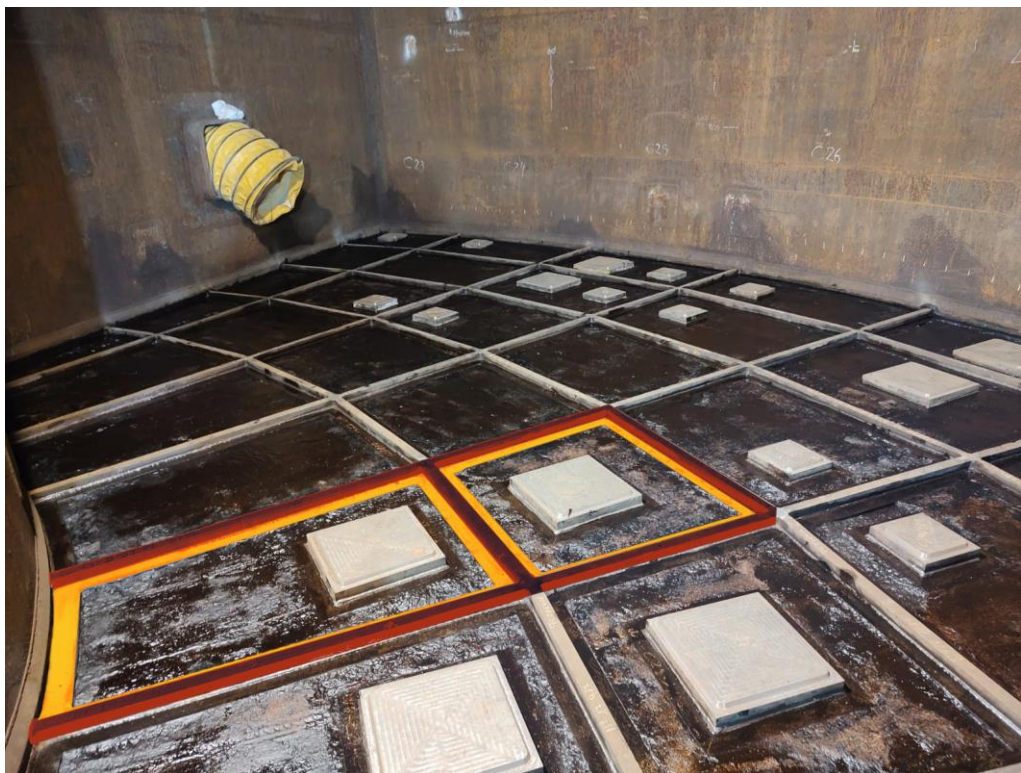


Figura 39: Pintura aplicada sobre Módulo 1 y 4. En color amarillo se puede visualizar el Módulo 1 sobre el cual se apoya el Módulo 4, delineado en color rojo.

- Se realizó la aplicación de una capa superficial sobre el Módulo 1 y 4 (Figura 39). Durante la inspección de la soldadura entre el Módulo 1 y 4, se identificaron sectores con gargantas menores a 5 mm (Figura

41). Estas soldaduras en ángulo, también conocidas como soldaduras de garganta, se miden tomando la altura del triángulo más grande que pueda inscribirse en la sección del metal de aportación, generalmente en el lado exterior del triángulo (Figura 40). Sin embargo, según los planos, el espesor del cordón de soldadura debe ser de 6mm (Figura 42), por lo que se encuentra por debajo del valor establecido.

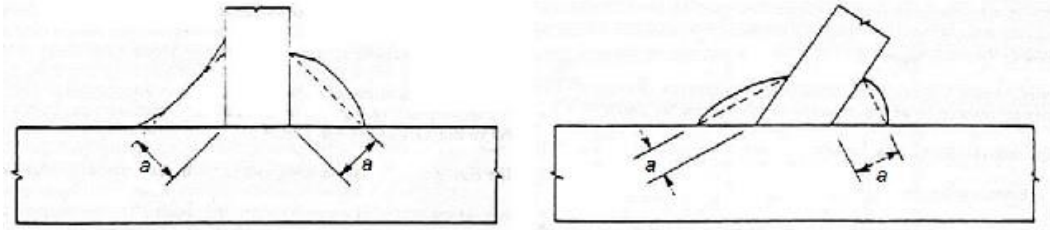


Figura 40: Espesor de garganta indicado con la letra "a".

Se emitió una No conformidad y se solicitó al CAREM evaluar la criticidad de dejar el cordón de soldadura en ese estado. Buscando garantizar la integridad y seguridad del Módulo.



Figura 41: Soldaduras en sectores gargantas con menos de 5 mm.

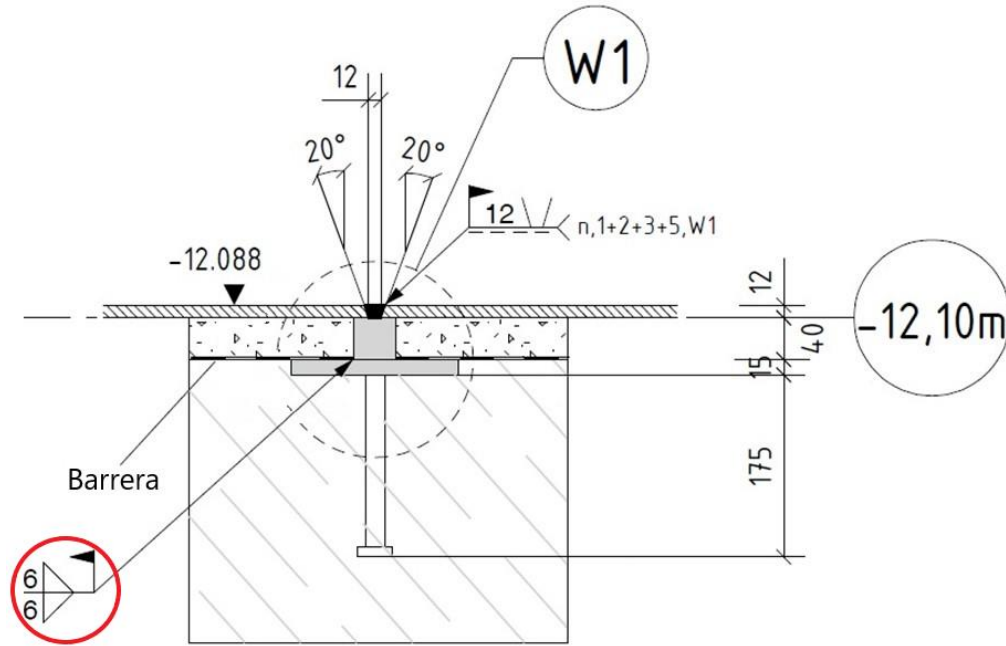


Figura 42: Welding Map que muestra el espesor requerido del cordón de soldadura resaltado con un círculo rojo. Fuente: Imagen extraída de los Welding Map elaborados por CONUAR.

Discusión

Debido al ingreso de agua de lluvia y al lento avance en la fabricación, se observó corrosión generalizada en el Módulo 2 (Figura 35). Se llevaron a cabo inspecciones visuales in situ para determinar las posibles causas y se evaluaron soluciones factibles. Además, se planificaron ensayos de ultrasonido para verificar la integridad del material. Se concluyó que la corrosión del Módulo 2 tuvo lugar debido al ingreso de agua de lluvia y se propuso la aplicación de una capa de pintura para proteger del avance de la corrosión al material del componente.

Se detectó una falta de penetración en una soldadura circunferencial que une el TCI con el Coverlid, lo cual llevó a solicitar la construcción de un Mockup. Este Mockup fue inspeccionado en cada visita debido a la importancia crítica de la unión soldada entre el TCI y el Coverlid. La solicitud de este Mockup confirma la viabilidad y eficacia del proceso de reparación propuesto, tal como se pudo contrastar en la investigación realizada por C. R. Das y su equipo [31] la cual llevó a cabo la elaboración de un Mockup para la reparación de la carcasa en una turbina de vapor de un reactor nuclear, para probar y validar un proceso de reparación antes de aplicarlo al componente original.

La identificación de herramental de acero al carbono sobre placas de acero inoxidable en el sector de inoxidables conlleva un potencial riesgo de contaminación ferrítica, como se establece en la norma ASTM A 380M [16]. Es relevante notar que en la Figura 38 de la derecha se observan las soldaduras que unen la estructura del banco de acero al carbono con las placas de acero inoxidable. Sin embargo, es importante destacar que estas soldaduras están ubicadas por debajo de las placas de acero inoxidable, y no están a nivel como se percibe, lo cual ha sido diseñado de manera intencionada. El propósito de esta disposición es brindar un soporte de apoyo adecuado para los componentes de acero inoxidable que deben ser ensamblados y soldados sobre las placas de acero inoxidable del banco, asegurando que no entren en contacto en ningún momento con la estructura de acero al carbono ni con las soldaduras que unen las placas de apoyo de acero inoxidable. El problema identificado se relaciona con la colocación frecuente de herramientas de acero al carbono sobre estas placas de apoyo de acero inoxidable, lo que ha llevado a la conclusión de que no se está cumpliendo con el requisito de evitar la contaminación ferrítica mencionada. Este hallazgo fue reportado a CONUAR para su atención.

Por otro lado, las mediciones realizadas con el calibre de soldadura manual en las soldaduras de garganta entre el Módulo 1 y el Módulo 4 no cumplieron con el espesor mínimo requerido establecido en el WPS N° W1088-1-100-014 rev 3 [32]. Este hallazgo es sumamente relevante debido a que la falta de espesor en las soldaduras de garganta o filete puede causar la falla prematura del componente, tal como lo estudiaron Chia Lung Chang y equipo [33], lo que resultó en la generación de una No conformidad para estas soldaduras.

2.2.4 Evaluación y determinación de métodos para reparación de superficie - Asesoramiento 2

En función de los datos obtenidos de los métodos evaluados para la reparación de la superficie se puede determinar que el Método 1: Adición de láminas de acero al carbono SA 516 Gr 60 presenta algunos desafíos. En principio dicho acero presenta una resistencia a la tracción de 415 a 550 MPa mientras que el material original del Módulo 1 el S355J2+N posee 470 MPa, por lo que al cliente se le solicitó realizarle ensayos de resistencia mecánica al material en cuestión para determinar que cumple con el mínimo de 470 MPa que posee el S355J2+N. Los mismos no fueron realizados por CONUAR.

Otro inconveniente analizado mediante el diagrama de Schaeffler, el cual se aplicó utilizando la composición de dichos materiales y del electrodo E8018-B2. Dio un como resultado riesgo de fisuración por temple debajo de los 400 °C.

Cuando la temperatura en la ZAC alcanza un punto crítico cercano a los 400 °C y luego desciende rápidamente, se generan tensiones residuales significativas en la zona. Estas tensiones residuales pueden resultar en la formación de fisuras, especialmente si la ZAC está sometida a esfuerzos mecánicos.

Por lo tanto, es crucial controlar y regular cuidadosamente la velocidad de enfriamiento posterior al proceso de soldadura. Un enfriamiento demasiado rápido puede provocar una rápida disminución de la temperatura en la ZAC, lo que aumenta el riesgo de fisuración por temple. Para mitigar este riesgo, es recomendable utilizar técnicas de enfriamiento controlado, como un precalentamiento, postcalentamiento o tratamiento de relajación de tensiones.

El precalentamiento tiene un impacto en la magnitud del gradiente de temperatura resultante, en la distribución de tensiones y deformaciones durante la soldadura. Asimismo, ayuda a controlar la velocidad de enfriamiento, lo que resulta en un metal de soldadura más homogéneo y con menor presencia de tensiones internas, con microestructuras de la zona afectada por el calor con una mayor resistencia a la formación de fisuras por hidrógeno [34], también evita la formación de estructuras alótropas duras como la martensita y sus efectos adversos [29]. Además, para minimizar las tensiones residuales y reducir el riesgo de fisuración, también es beneficioso considerar el uso de postcalentamiento o tratamientos térmicos como el recocido o la relajación de tensiones. Estos procesos ayudan a liberar las tensiones internas del material, promoviendo su estabilización y mejorando la integridad de la pieza soldada.

A pesar de que CONUAR optó por la implementación del Método 2 mediante la técnica SMAW, es importante destacar que el método presenta los mismos inconvenientes de soldadura que presentaba el Método 1, por lo que corre el riesgo de fisuración por debajo de los 400 °C. Por otro lado, se corroboró según investigaciones realizadas por Peng Zhao y su equipo [35], que la aplicación de relleno por soldadura aumenta el tamaño de grano en la ZAC y debido a la baja deposición reportada [20], podrá ser necesario realizar varias pasadas para completar el material faltante, lo que puede provocar una reducción de la dureza, aproximadamente en 20 MPa según se reportó en la investigación [35].

2.3 Conclusiones parciales

2.3.1 Revisión de registros y convalidación de tubos del generador de vapor (CAREM)

En la revisión de los registros de los tubos de Inconel 690, se llevaron a cabo verificaciones de los ensayos no destructivos realizados en estos componentes. Se examinaron minuciosamente los registros de los tubos que habían sido validados para asegurar su conformidad con los requisitos especificados en el documento ET-CAREM25M-13-r1 B0300 [4] así como con las directrices establecidas en la guía del EPRI titulada "Directrices para las Especificaciones y Reparación de Tubos de Generadores de Vapor de Reactores de Agua a Presión" [26].

Como resultado de esta revisión, se generó un informe de inspección denominado IN-EN_GMAT-GIIMC-069 [25], el cual proporciona información detallada sobre la cantidad de tubos que pasaron satisfactoriamente los ensayos y aquellos que fueron rechazados. Además, se descubrió que la certificación de un técnico encargado de llevar a cabo ensayos de corrientes inducidas estaba vencida en el momento en que se llevaron a cabo dichos ensayos. Este hallazgo plantea incertidumbres acerca de la precisión de los resultados obtenidos durante los ensayos. Por lo tanto, esto se incluyó en el informe mencionado anteriormente.

2.3.2 Respuesta técnica para la calificación de procedimiento de soldadura - Asesoramiento 1

Dada la consulta para el cambio de ensayos de calificación del cupón soldadura se puede concluir que la omisión del ensayo intergranular, ASTM A262 Práctica E [5], no impide la aprobación de la calificación de una soldadura, ya que la norma de construcción es la ASME Sección IX [3], y esta no solicita ensayos de este tipo. Solo exige que se ensaye a los cupones mediante ensayos destructivos para determinar las propiedades mecánicas.

Por otro lado, el acero inoxidable AISI 316Ti tiene un alto contenido de titanio, por lo que si el material fue procesado adecuadamente habrá carburos de titanio dentro de los granos austeníticos, mejorando la estabilidad de la estructura contra la precipitación de carburos de cromo, y consecuentemente reduce significativamente la sensibilización del material,

ya que en tratamientos térmicos entre 600-850 °C [7], como sucede en una soldadura, los carburos de cromo precipitan como carburos $M_{23}C_6$ intergranularmente a lo largo de los límites de grano de la austenita, dejando un entorno que es susceptible y que puede ser atacado por la corrosión, pudiendo provocar la fragilización del material.

El molibdeno, incorporado en el AISI 316Ti, también dificulta la precipitación de carburos de cromo, ya que, al ser un elemento alfégeno, se disuelve en la ferrita delta, siendo un gran formador y estabilizador de carburos, disminuyendo el porcentaje de carbono en la composición disponible para que se formen carburos de cromo.

Después de analizar la evaluación utilizando el diagrama de Schaeffler, se ha determinado que es posible realizar la soldadura entre el acero inoxidable AISI 316Ti y el acero al carbono IRAM F26 o el acero al carbono ASTM A36. Para garantizar la integridad de la soldadura y evitar daños, se debe controlar el porcentaje de dilución de los materiales base. Pero se tiene que tener en cuenta que el análisis se realizó en base a las composiciones nominales por norma, lo cual al no ser preciso, generará una serie de bandas, en el diagrama de Schaeffler, con todas las microestructuras y daños posibles. Por ende, se recomienda realizar un análisis de la colada del material en cuestión para que el análisis arroje datos precisos.

En función de las concentraciones nominales, el análisis se realizó utilizando el valor medio de los elementos definidos en rangos. Por lo que en el caso de la soldadura entre el AISI 316Ti y el acero al carbono IRAM F26, se ha establecido que un rango de dilución del 12,8% al 31,6% para los materiales base es adecuado, evitando así cualquier tipo de daño causado por el proceso de soldadura.

De manera similar, para la soldadura entre el AISI 316Ti y el acero al carbono ASTM A36, se ha determinado que un rango de dilución del 13,2% al 33,2% del material base es apropiado para prevenir posibles daños ocasionados durante el proceso de soldadura.

Es fundamental resaltar que al controlar eficazmente el porcentaje de dilución dentro de los rangos establecidos, se logra asegurar la calidad y resistencia de la soldadura, al tiempo que se minimizan los efectos adversos y se garantiza la durabilidad y rendimiento de la unión entre los materiales.

Teniendo en cuenta todos estos factores, podemos asumir que si la unión se realiza siguiendo las condiciones y parámetros de soldadura establecidos, incluyendo la dilución calculada correspondiente a los materiales base, se evitará la sensibilización del material. Esto implica que no será necesario realizar el ensayo de corrosión intergranular, ya que, además de contar con

una concentración adecuada de titanio para prevenir la formación de precipitados de cromo, los ensayos mecánicos establecidos en ASME Sección IX QW-451.1 [3] serán suficientes para calificar al componente como apto para el servicio.

Además, es crucial ejercer un estricto control sobre la velocidad de enfriamiento lo que promoverá la formación de una microestructura deseable y minimizará la posibilidad de formación de fases duras, como la martensita, con enfriamientos rápidos, o las fases intermetálicas, con enfriamientos lentos [29]. Estas fases pueden comprometer la calidad de la unión soldada, ya que son propensas a la corrosión localizada, fragilización por hidrógeno y agrietamiento por corrosión bajo tensión. Estos inconvenientes se hacen especialmente problemáticos en entornos corrosivos y húmedos.

Es importante tener en cuenta que la composición del electrodo puede influir en la velocidad de enfriamiento y en la formación de fases intermetálicas. En el caso específico del electrodo E309L, aunque no está compuesto principalmente de níquel, contiene este elemento y cumple con los requisitos necesarios para realizar la unión soldada. A pesar de que el níquel es más receptivo, ósea tiene una mayor afinidad, al carbono que el cromo, lo que significa que es más probable que forme fases duras en las uniones soldadas. Por otro lado, al ser de bajo contenido de carbono ("L"), puede reducir la formación de carburos en la ZAC, y, por lo tanto, disminuir la susceptibilidad del material a la sensibilización [29].

Se debe resaltar que el GIIMC solicitó inicialmente la ejecución del ensayo A262 Práctica E [5] en otra gestión del grupo, lo que dificulta determinar por qué no se optó por solicitar en primera instancia el A262 Práctica A [5], que cualitativamente evalúa la presencia de corrosión intergranular. Se presume que el GIIMC seleccionó primero el ensayo A262 Práctica E con el objetivo de verificar la integridad de la unión soldada. Sin embargo, durante este ensayo, se observó que el ácido destinado a atacar el acero austenítico para verificar la no sensibilización afectaba y disolvía por completo el acero al carbono o ferrítico. Como consecuencia, no fue posible llevar a cabo el ensayo de plegado requerido por la norma A262 Práctica E.

Dadas las opciones disponibles en el ASTM A262, hubiera sido más apropiado realizar inicialmente la ASTM A262 Práctica A para determinar la presencia de corrosión intergranular. En caso de obtener un resultado positivo, se podría considerar llevar a cabo otro ensayo para cuantificar los precipitados. Cabe destacar que la ASTM A262 Práctica A se utiliza para aceptar y no para rechazar un material. Por lo tanto, en caso de encontrar

corrosión intergranular, será necesario emplear otro método para rechazar el componente.

En el caso de que se desee realizar el ensayo A262 Práctica E en la soldadura mencionada, es esencial llevar a cabo un cupón de ensayo entre dos materiales austeníticos. Esto se debe a que el código ASME permite el cambio de material siempre y cuando se respete el calor aportado en la soldadura original entre el austenítico y el ferrítico. Se permite el uso de un procedimiento de calificación similar, en caso de disponer de uno, entre dos austeníticos de la misma categoría y con los mismos parámetros para no exceder el calor aportado. Posteriormente, se podría realizar el ensayo de corrosión solicitado inicialmente por el GIIMC, que es el A262 Práctica E. A pesar que el código permite esta modificación, realizar esta práctica puede generar un cierto grado de incertidumbre en los resultados, debido a las diferencias de conductividad térmica entre un acero al carbono y uno inoxidable.

Finalmente también se recomienda la realización de otro tipo de ensayos que determinen si ocurrió precipitación de carburos de cromo, como el ASTM A262 Práctica A ya nombrado, o mediante las técnicas anteriormente mencionadas como la técnica de microscopía de barrido electrónico, TEM, Microscopía óptica, entre otras técnicas, u otros ensayos establecidos por la norma ASTM A262.

2.3.3 Inspecciones al CAREM

Los avances en la obra del CAREM se han visto ralentizados, lo que ha generado complicaciones, como la corrosión generalizada en el Módulo 2. Como resultado, se ha solicitado la realización de ensayos no destructivos para determinar el espesor y la pérdida de material causada por este evento, el cual podría haberse evitado con medidas simples como la aplicación de una capa de pintura protectora.

La construcción de un Mockup es una práctica recomendada para validar la viabilidad y eficacia de un proceso de reparación. La construcción del mismo permitió confirmar la viabilidad y eficacia del proceso de reparación propuesto para la soldadura circunferencial que une el TCI con el Coverlid.

Con respecto al diseño de junta distinto empleado, y a la luz de las definiciones y pautas del código ASME Sección IX [3], es evidente que el proceso de soldadura SMAW permite cierta flexibilidad en lo que respecta al diseño de la junta. Según el código, un cambio o modificación en el diseño

de la junta no se considera una variable esencial que requiera la creación de un nuevo cupón o la realización de nuevos ensayos de calificación (PQR) para validar el WPS existente.

Esta flexibilidad se basa en la premisa de que, si se mantienen constantes las variables esenciales, como los materiales base y de aporte, las condiciones de soldadura, etc., el WPS previamente calificado sigue siendo válido incluso cuando se adapta a diseños de junta diferentes. Esto es respaldado por el código ASME y se refuerza por la definición de variables no esenciales, que se refiere a condiciones que no se consideran críticas para las propiedades mecánicas del componente.

Si bien la incertidumbre en cuanto a la influencia de cambios en el diseño de la junta es válida y debe ser tratada con precaución, es importante destacar que el código ASME ha establecido pautas claras que respaldan la revisión y adaptación de un WPS para ajustarse a diseños de junta específicos sin necesidad de recalificar. Por lo tanto, se puede concluir que, si se siguen adecuadamente las normas y se mantienen constantes las variables esenciales, el uso del WPS existente sigue siendo una práctica válida y aceptable para garantizar la integridad de las uniones soldadas.

En relación a la contaminación ferrítica mencionada (Figura 38), es importante destacar que si bien la mesa de trabajo está fabricada con acero al carbono, se han utilizado placas de acero inoxidable para apoyar las grillas. Esta medida se ha tomado específicamente para prevenir cualquier riesgo de contaminación ferrítica en los materiales de acero inoxidable que se apoyan y se trabajan sobre dicha mesa. Por lo tanto, se considera que la aplicación y cumplimiento de la norma ASTM A 380M [16] es apropiada para prevenir esta forma de contaminación.

Otro hallazgo importante fue la falta de espesor en ciertos sectores del cordón de soldadura entre el Módulo 1 y el Módulo 4. En este sentido, se dejó a criterio de la Gerencia CAREM evaluar la criticidad de esta deficiencia en la soldadura. Cabe mencionar que, dado que las soldaduras de filetes se encuentran sometidas a cizallamiento cuando las placas están bajo tensión, la resistencia de la unión es considerablemente menor que la del material de la placa o de una unión a tope. Además, la investigación de Chia Lung Chang y equipo [33] determinaron que la falta de espesor puede ocasionar una falla prematura en el componente. Por lo tanto, fue necesario informar la No conformidad correspondiente en base a la inspección realizada.

En general, se recomienda una revisión exhaustiva de los documentos, procedimientos y parámetros utilizados en la obra, así como una mayor atención a los detalles durante el proceso de fabricación y montaje. El

cumplimiento de los estándares establecidos, una adecuada supervisión y un enfoque proactivo en la detección y solución de problemas son aspectos fundamentales para el desarrollo del proyecto CAREM.

2.3.4 Evaluación y determinación de métodos para reparación de superficie - Asesoramiento 2

Dada la problemática presentada en el Módulo 1 del CAREM, se evaluaron las distintas opciones propuestas para solucionar el problema de la reparación de la superficie. Este inconveniente retrasó la instalación del Módulo 4, por lo que se requirió una resolución al problema de manera rápida.

Como se expuso, en los puntos anteriores, existen distintas alternativas de soluciones al problema del desnivel en el Módulo 1. La aplicación de láminas de chapa era una alternativa adecuada, ya que evitaba el trabajo manual del recargue y garantizaba las propiedades mecánicas del material, pero el inconveniente en esto es que no se disponía del material original EN 10025-2:2005 S355 J2+N, que a su vez era de otra norma de construcción, lo cual condujo a la verificación de la posibilidad de soldar el material base original a uno de norma ASME. Esto no era impedimento a la hora de realizarse, pero se debían realizar ciertos requisitos para la aprobación.

Además, el material propuesto SA 516 Gr 60 no cumplía con las propiedades mecánicas presentes en el S355, debido a que el SA 516 Gr 60 presenta una menor resistencia máxima y de tensión de fluencia respecto del S355. En consecuencia, se solicitó a CONUAR la necesidad de llevar a cabo ensayos de tracción para determinar si la resistencia mecánica del material SA 516 Gr 60 iguala o supera la resistencia mecánica del S355 con el fin de asegurar la adecuación de dichas propiedades.

Por otro lado, la propuesta de recargue de material, o también llamada build-up, se consideró la más adecuada y la que se efectuó en la obra, mediante la técnica del proceso SMAW con electrodo revestido E7018 o ER7018, ya que estos presentan resistencia mecánica similar al material original del Módulo 1. Se justifica el uso de esta técnica debido a su versatilidad, portabilidad, facilidad de uso y costos más bajos. Además, simplifica el proceso de aprobación de la soldadura. Sin embargo, es importante tener una WPS que respalde este tipo de soldaduras.

Si analizamos las desventajas, se puede mencionar la baja deposición de material, pero dado que las reparaciones son pequeñas, no tiene un impacto

significativo. El nivel de limpieza en comparación con otros métodos es inferior y puede generarse escoria. Aunque la escoria debe ser removida, lo que ralentiza el proceso y requiere más mano de obra, esta tiene la ventaja de proporcionar protección al cordón de soldadura, reducir la velocidad de enfriamiento, prevenir salpicaduras o proyecciones, mejorar el control de la forma de la soldadura y capturar impurezas.

En base a los motivos expuestos, la técnica de build-up con el proceso SMAW se ha demostrado como la más efectiva para resolver este tipo de inconvenientes.

3. Asesoramiento Técnico a Nucleoeléctrica Argentina S.A. (NASA)

3.1 Métodos

A continuación se detallan los métodos empleados para el asesoramiento técnico a Nucleoeléctrica Argentina S.A.

3.1.1 Evaluación de aptitud del material de insertos y discos para uso en el reactor nuclear Atucha II

NASA pidió evaluar los componentes fabricados por la empresa alemana KSB SE & Co a principios de 2021. Estos componentes son insertos y discos de acero inoxidable usados en juegos de fuelles para reemplazar válvulas en la central nuclear Atucha II. Aunque KSB SE & Co es un proveedor de estos materiales, los insertos y discos de acero inoxidable que fabricaron no cumplen con los requisitos mínimos de contenido de ferrita delta según el estándar WS E 13.2 de la RE-L 5002 [36]. Este estándar establece que el contenido recomendado de ferrita delta debe ser del 2% al 10%, con una recomendación específica de 4% al 8% para materiales que vayan a ser soldados, como en este caso. Sin embargo, los componentes suministrados por KSB SE & Co tienen un contenido de ferrita delta entre el 1% y 3%, por debajo de los valores requeridos en los documentos de construcción.

El cliente NASA proporcionó información que se compone de los registros de soldadura realizados por KSB SE & Co, los mismos contienen los parámetros utilizados en el proceso de soldadura, con el fin de demostrar la integridad de las juntas en caso de que se efectuase una soldadura con los materiales en cuestión. Además, se contó con los informes de los ensayos metalográficos realizados también por el proveedor KSB SE & Co. Estos ensayos lo llevaron a cabo con el propósito de determinar dos características importantes del material DIN 1.4550: la presencia de ferrita delta, la cual arrojó valores en un rango del 1% al 3% en distintas regiones del material, y la ausencia de fisuración en caliente después de someterlo al proceso de soldadura.

Es fundamental destacar que estos ensayos metalográficos, cuyos informes fueron proporcionados por el fabricante, se realizaron bajo los estándares establecidos en los documentos AVS E63 y RE-L 1615E, los

cuales presentan los criterios para determinar la presencia de ferrita delta y la resistencia al agrietamiento en caliente. Lamentablemente, la referencia precisa de estos documentos no está disponible debido a restricciones de acceso. Sin embargo, es importante mencionar que los resultados de estos ensayos no cumplen con la concentración mínima requerida de ferrita delta establecido en la especificación técnica de compra.

Es importante tener en cuenta que los datos utilizados en este trabajo se basan en los proporcionados por el cliente y que no se dispone de información sobre la ubicación final de los componentes en el sistema del reactor nuclear, ni sobre su función, las solicitaciones termomecánicas a las que están sujetos o los ciclos térmicos a los que pueden estar expuestos durante su operación.

La investigación sobre la fisuración en caliente proporcionó suficientes fundamentos teóricos para evaluar si este fenómeno puede ocurrir en procesos de soldadura, y considerando todos los elementos mencionados anteriormente se elaboró un informe con el objetivo de que NASA evalúe la aceptación o el rechazo de los lotes del material en cuestión.

3.1.1.1 Fisuración en caliente

La fisuración en caliente, también conocida como fisuración por solidificación, se refiere a la formación de fisuras en los bordes de grano durante el proceso de solidificación debido a las restricciones a la contracción libre. Durante la solidificación, se generan deformaciones localizadas en el líquido, lo cual puede dar lugar a la aparición de fisuras.

La presencia de impurezas, especialmente azufre y fósforo, tienden a concentrarse en el último líquido en solidificar, lo que amplía el rango de solidificación y, por lo tanto, aumenta el rango crítico de fisuración. Esto se debe a la baja difusividad de las impurezas en la fase austenítica.

Para prevenir este problema, es necesario mantener una fracción mínima de ferrita delta. Algunos autores recomiendan un rango del 5% al 10% [37], otros recomiendan hasta el 12% de ferrita delta [38]. Estar dentro de estos rangos recomendados tiene dos efectos: modificar el patrón de solidificación, pasando de una estructura regular (Figura 43, izquierda) a una más tortuosa (Figura 43, derecha), y actuar como una fase que captura y retiene las impurezas, ya que la ferrita delta tiene mayor solubilidad para impurezas, lo que disminuye el rango de solidificación. La Figura 43 esquematiza la intersección de los granos al solidificarse. En el lado izquierdo de la figura se muestra la solidificación primaria austenítica, donde se observa el paquete de granos de austenita donde sus límites de grano,

bastante planos y suaves pueden ser camino preferencial para las fisuras. Mientras que en el lado derecho se muestra la solidificación primaria de ferrita delta, que exhibe una trayectoria más compleja a lo largo de los límites debido a la incorporación del límite de grano a lo largo de la interfaz delta-gamma, lo cual reduce la probabilidad de propagación de fisuras.

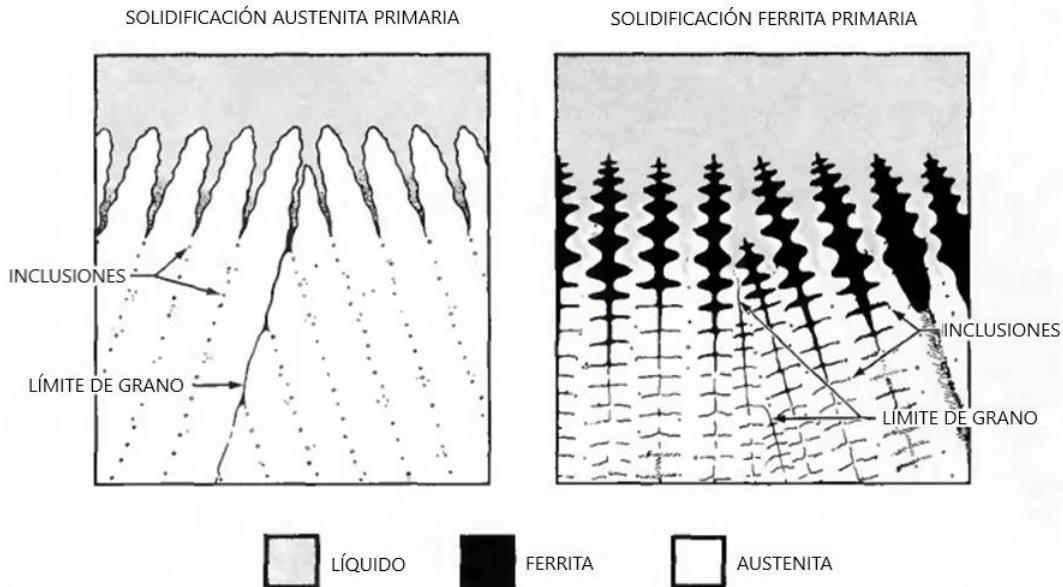


Figura 43: Representación esquemática de dos granos de solidificación que se intersectan. Solidificación primaria austenítica (izquierda) y solidificación primaria de ferrita delta (derecha), la cual exhibe una trayectoria de fisuras más compleja a lo largo de los límites [39].

El control de la fracción de ferrita delta se logra mediante el equilibrio entre elementos gamágenos y alfégenos. Dependiendo de la relación entre el equivalente de cromo y el equivalente de níquel (Cr_{eq}/Ni_{eq}), se puede lograr el modo de solidificación Ferrita delta-Austenita (FA), que presenta una mayor resistencia a la fisuración por solidificación como se observa en la Figura 44. Esto se debe a que proporciona bordes de grano más tortuosos, lo que dificulta el avance de las posibles fisuras.

En dicha Figura 44 se encuentra el modo de solidificación y la susceptibilidad al agrietamiento en función del Cr_{eq}/Ni_{eq} .

Se puede observar que el modo de solidificación Austenítico (A) presenta la mayor tasa de agrietamiento mientras que el modo de solidificación Austenita-Ferrita delta presenta una alta tasa cuando la relación de Cr_{eq}/Ni_{eq} equivalente es bajo y a medida que la relación aumenta se observa un descenso de la tasa de agrietamiento, hasta el punto en el que comienza a precipitar primariamente Ferrita delta y posteriormente Austenita (FA), donde se aprecia la menor tasa a la fisuración en comparación con cualquier otra composición química posible en el material. A medida que aumenta la

relación Cr_{eq}/Ni_{eq} deja de ser un acero austenítico para ser puramente ferrítico el cual aumentará progresivamente la susceptibilidad a la fractura a medida que aumente la relación.

Al finalizar la solidificación, la interfaz entre la ferrita delta y la austenita está presente y la energía de interfaz γ/δ es menor que la interfaz γ/γ , lo que significa que hay una menor capacidad de mojado de la película líquida remanente no solidificada, que contiene impurezas de azufre y fósforo. Esto permite que la estructura pueda soportar las deformaciones sin fisurarse [39]. Además, durante las etapas finales de solidificación, el aumento de la solubilidad de las impurezas en la ferrita delta reduce la cantidad de fase que contiene impurezas de bajo punto de fusión.

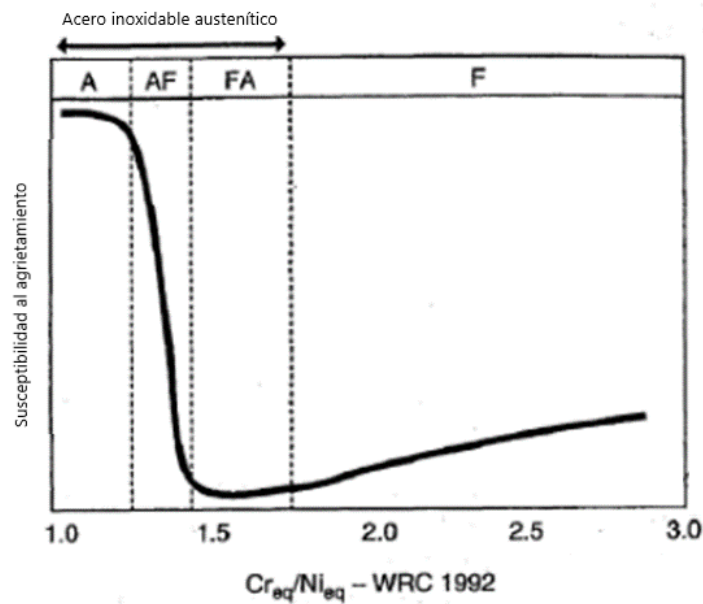


Figura 44: Susceptibilidad al agrietamiento por solidificación de la soldadura en función de la composición de Cr_{eq}/Ni_{eq} [7].

La bibliografía señala que la susceptibilidad a la fisuración en caliente está relacionada con las concentraciones de azufre y fósforo en el acero. Sin embargo, tratar estas impurezas puede resultar costoso, e incluso en aceros considerados extremadamente limpios, se pueden encontrar niveles de azufre y fósforo superiores al 0,02% en peso (200 ppm). Por lo tanto, en lugar de centrarse en la eliminación de impurezas, es más efectivo controlar el comportamiento de solidificación mediante la manipulación del contenido de Cr_{eq}/Ni_{eq} .

La Figura 45 muestra un diagrama predictivo basado en estudios publicados sobre el agrietamiento del metal de soldadura en aceros inoxidables austeníticos. A medida que el valor de Cr_{eq}/Ni_{eq} aumenta por encima de un nivel crítico, se observa un aumento significativo en la

resistencia al agrietamiento, independientemente del nivel de impurezas presente. Este aumento drástico se debe al cambio en el comportamiento de solidificación, pasando de la formación de austenita primaria a la formación de ferrita delta primaria [7].

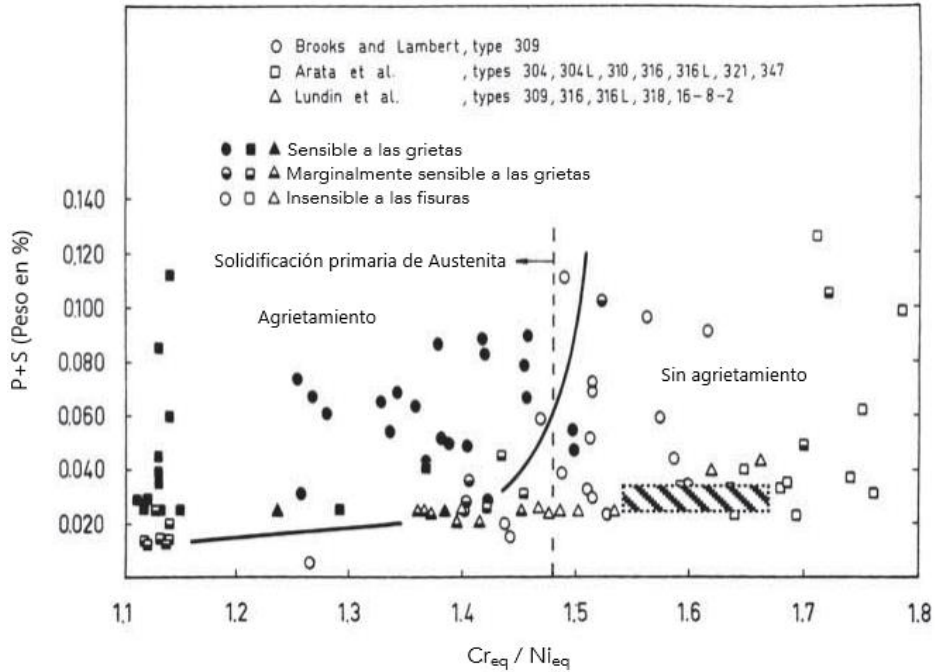


Figura 45: Diagrama de Suutala, utilizado para predecir la susceptibilidad al agrietamiento por solidificación en soldaduras en función de la composición del metal de soldadura [40].

En el diagrama de la Figura 46, proporcionado por el "Stainless Steel Subcommittee of the Welding Research Council" (WRC) [7] [41], se puede estimar tanto el contenido de ferrita delta como el modo de solidificación en función de la composición del material. Este diagrama se basa en el análisis de cientos de soldaduras para determinar el número de ferrita delta (FN), que representa aproximadamente el porcentaje de ferrita delta en el material, y el modo de solidificación correspondiente. En el diagrama, se identifica la región de solidificación Ferrita-Austenita (FA) con un número de ferrita delta entre 0 y 20, junto con las concentraciones de Cr_{eq} / Ni_{eq} asociadas. Por otro lado, las composiciones que se encuentran en las regiones A o AF presentan una mayor susceptibilidad al agrietamiento en comparación con aquellas en la región FA [7].

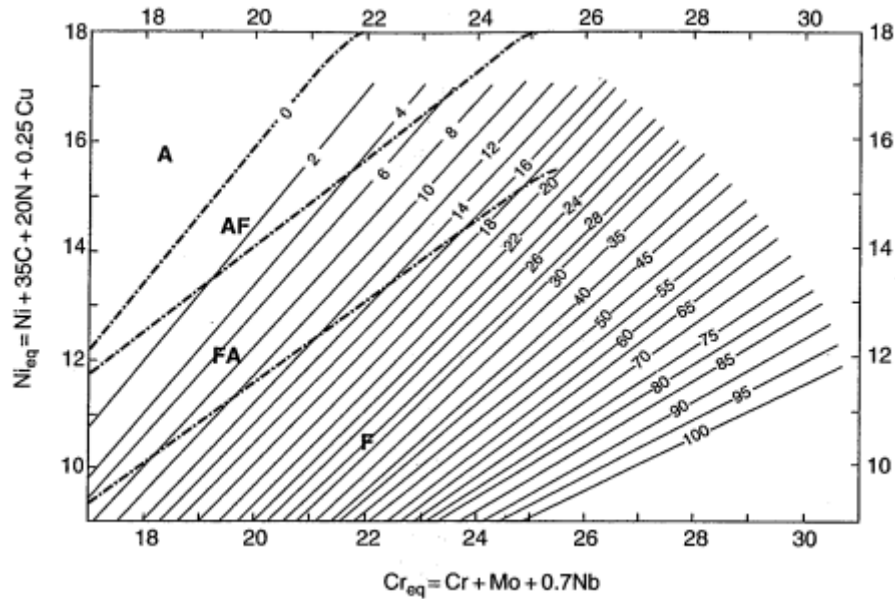


Figura 46: Diagrama WRC-1992 utilizado para predecir el modo de solidificación en función de las concentraciones de Cromo y Níquel equivalentes [7] [41].

3.1.1.2 Composición química del acero inoxidable DIN 1.4550

| Elemento | % en peso |
|------------|----------------|
| NíquelG | 9,0 - 13,0 |
| CromoA | 17,0 - 19,0 |
| SilicioA | 1,00 máx. |
| ManganesoG | 2,00 máx. |
| CarbonoG | 0,08 máx. |
| FósforoA | 0,045 máx. |
| AzufreA | 0,015 máx. |
| NiobioA | 10 x %C - 1,00 |
| Hierro | Bal |

Tabla 13: Composición química del acero inoxidable DIN 1.4550 [9].

3.1.1.3 Evaluación de la susceptibilidad a daños por tratamientos térmicos en el acero inoxidable DIN 1.4550

A partir de la composición del acero inoxidable DIN 1.4550, es posible determinar el cromo y níquel equivalente necesarios para evaluar, según el diagrama de Schaeffler, la susceptibilidad del material a posibles daños debido a tratamientos térmicos, como lo es la soldadura, así como también la posible microestructura resultante.

Para el análisis que se realiza en esta sección, se simuló los extremos posibles en composición del material. Un escenario posible es alcanzar la

concentración máxima posible de cromo equivalente en el material, la cual se obtiene mediante las composiciones máximas de elementos alfégenos y las concentraciones mínimas de elementos gamágenos en el material. De manera equivalente, para lograr un material con las concentraciones mínimas de cromo equivalente, se requiere evaluar el material con las composiciones mínimas de elementos alfégenos y las concentraciones máximas de elementos gamágenos.

$$Cr_{eq} = \%Cr + \%Mo + 1,5 \times \%Si + 0,5 \times \%Nb$$

$$Ni_{eq} = \%Ni + 30 \times \%C + 0,5 \times \%Mn$$

- Cr_{eq}/Ni_{eq} máximo para el acero inoxidable DIN 1.4550:

$$Cr_{eq} = 19 + 0 + 1,5 \times 1 + 0,5 \times 1 = 21$$

$$Ni_{eq} = 9 + 30 \times 0,08 + 0,5 \times 2 = 12,4$$

- Cr_{eq}/Ni_{eq} mínimo para el acero inoxidable DIN 1.4550:

$$Cr_{eq} = 17 + 0 + 1,5 \times 1 + 0,5 \times 10 \times 0,08 = 18,9$$

$$Ni_{eq} = 13 + 30 \times 0,08 + 0,5 \times 2 = 16,4$$

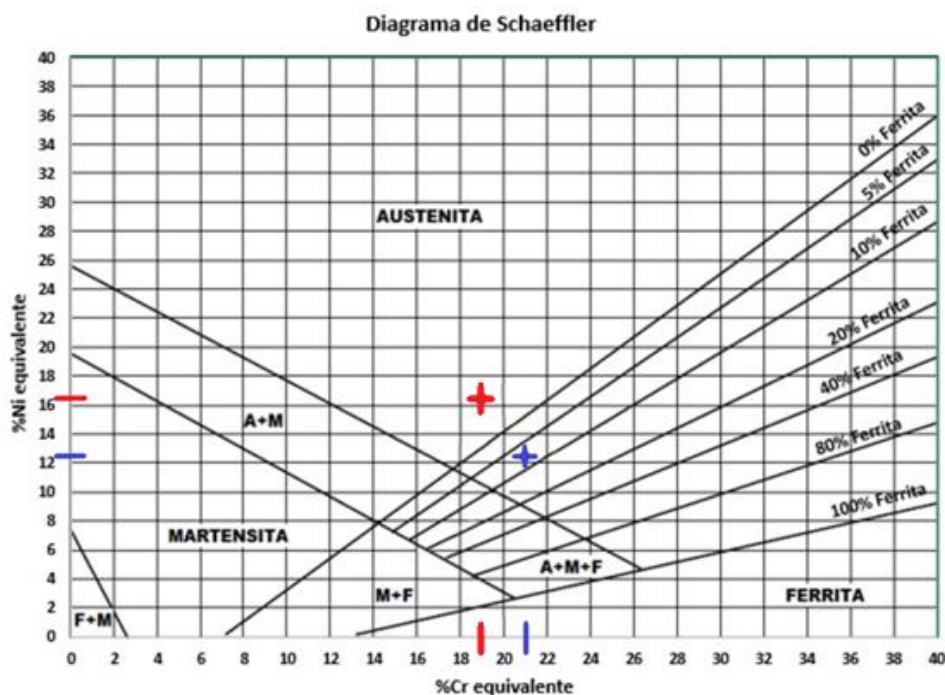


Figura 47: Diagrama constitutivo de Schaeffler. El valor máximo en composición de alfégenos y mínimo de gamágenos en color azul, mientras que el valor mínimo de alfégenos y máximo de gamágenos se representa en color rojo [13][14].

Al observar la Figura 47, se puede visualizar que el punto rojo correspondiente al mínimo de cromo equivalente (concentración mínima de

elementos alfégenos) y máximo de níquel equivalente (concentración máxima de elementos gamágenos) del acero inoxidable DIN 1.4550 se sitúa en la región propensa a la fisuración en caliente por encima de los 1250 °C, como se indica en el Anexo 5.3, donde se presenta el diagrama de Schaeffler con las zonas susceptibles a daños. Además para este punto, las estimaciones teóricas por este método indican que el porcentaje de ferrita delta estaría en cero. Por otro lado, el punto correspondiente al cromo equivalente máximo y al níquel equivalente mínimo cae en la pequeña zona donde no presentará problemas al realizar una soldadura. Arrojando un porcentaje de ferrita delta entre el 5% y 10%.

Considerando la capacidad del material de sufrir fisuración en caliente en uno de los escenarios planteados, J. C. Lippold y equipo sugieren que dicho material debe tener un contenido de ferrita delta entre el 5% y el 10% [37]. Esta concentración ayuda a prevenir la formación de grietas en caliente en el material.

El siguiente diagrama constitutivo, conocido como el diagrama Delong (Figura 48), fue propuesto por ASME III para determinar el contenido de ferrita delta en los aceros inoxidables austeníticos y dúplex. Esta representación gráfica que ha realizado Delong a partir de una modificación del diagrama Schaeffler, permite predecir el porcentaje de ferrita delta hasta un máximo de 18 FN, considerando también el nivel de nitrógeno presente en el cálculo. Con el fin de mejorar la correlación entre la ferrita delta calculada y la ferrita delta medida en el metal de soldadura [42].

Delong realizó estudios sobre la influencia del nitrógeno en la reducción del contenido de ferrita delta observado en el metal de soldadura. Este fenómeno ocurre debido a la incorporación de nitrógeno en la pileta líquida de soldadura, provocada por la turbulencia en el flujo de gas durante los procesos de soldadura GMAW y GTAW, así como por una longitud de arco excesiva en el proceso SMAW [43].

Al no estar disponible el contenido de nitrógeno, se considera un valor de 0,06% para los procesos GTAW y SMAW, o 0,08% para los metales de soldadura GMAW. En este caso, se utilizó un valor de 0,06% debido a que los ensayos se realizaron utilizando la técnica GTAW, según la información proporcionada por el proveedor KSB SE & Co. Cuando la composición química es precisa, el diagrama puede predecir el número de ferrita delta según el estándar WRC dentro de un margen de ± 3 en alrededor del 90% de las pruebas realizadas en las familias de aceros AISI 306, 309, 316 y 317 [42].

A continuación se realizará el cálculo, según el método de DeLong, para la determinación del contenido de ferrita delta en el acero inoxidable DIN 1.4550.

$$Cr_{eq} = \%Cr + \%Mo + 1,5 \times \%Si + 0,5 \times \%Nb$$

$$Ni_{eq} = \%Ni + 30 \times \%C + 30 \times \%N + 0,5 \times \%Mn$$

- Cr_{eq}/Ni_{eq} máximo para el acero inoxidable DIN 1.4550:

$$Cr_{eq} = 19 + 0 + 1,5 \times 1 + 0,5 \times 1 = 21$$

$$Ni_{eq} = 9 + 30 \times 0,08 + 30 \times 0,06 + 0,5 \times 2 = 14,2$$

- Cr_{eq}/Ni_{eq} mínimo para el acero inoxidable DIN 1.4550:

$$Cr_{eq} = 17 + 0 + 1,5 \times 1 + 0,5 \times 10 \times 0,08 = 18,9$$

$$Ni_{eq} = 13 + 30 \times 0,08 + 30 \times 0,06 + 0,5 \times 2 = 18,2$$

El diagrama expuesto en la Figura 48 demuestra que el número de ferrita delta en el acero inoxidable varía ampliamente en función de los cambios en su composición de alfégenos y gamágenos. Por un lado se tiene el punto azul, el cual corresponde a la máxima concentración de elementos alfégenos y mínima de gamágenos, determinando una concentración de ferrita delta en alrededor del 6% al 8%. Mientras que el punto rojo con una mínima concentración de alfégenos y máxima de gamágenos determina que el material estará muy lejos de presentar la fase ferrita delta en el material.

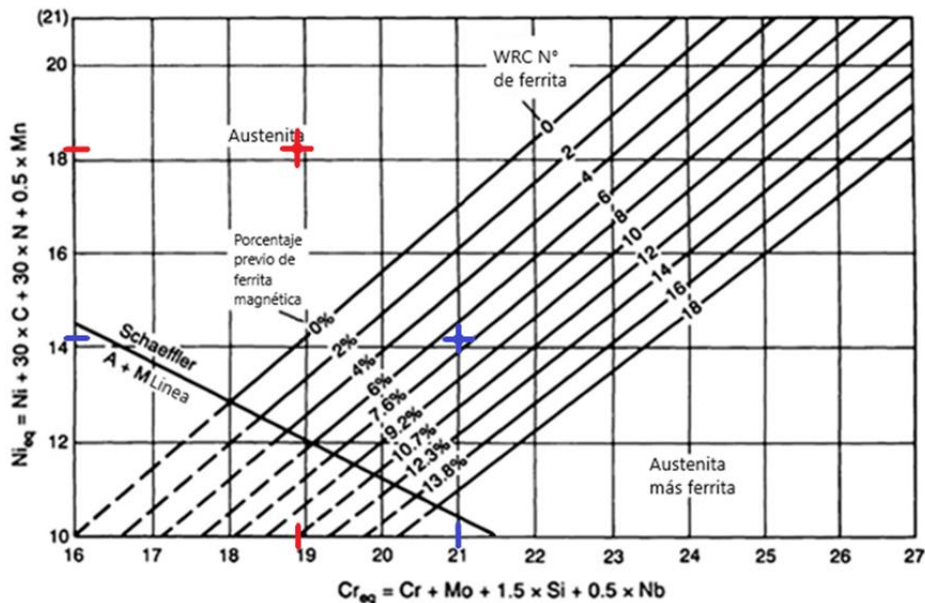


Figura 48: Diagrama constitutivo de DeLong para Aceros Inoxidables. La composición máxima en alfégenos y mínima en gamágenos se muestra en color azul, y los valores mínimos de alfégenos y máximos de gamágenos se representan en color rojo [42].

Adicionalmente, otro enfoque utilizado para determinar la susceptibilidad del material a la fisuración en caliente es el uso del diagrama de Suutala. Este diagrama permite predecir la posibilidad de fisuración al representar el punto de la suma de fósforo y azufre presentes en el material en función de la relación entre el cromo y níquel equivalente.

$$Cr_{eq} = \%Cr + 1,37 \times \%Mo + 1,5 \times \%Si + 2 \times \%Nb + 3 \times \%Ti$$

$$Ni_{eq} = \%Ni + 0,31 \times \%Mn + 22 \times \%C + 14,2 \times \%N + \%Cu$$

$$P + S = 0,045 + 0,015 = 0,06$$

- Cr_{eq}/Ni_{eq} máximo para el acero inoxidable DIN 1.4550:

$$Cr_{eq} = 19 + 0 + 1,5 \times 1 + 2 \times 1 + 0 = 22,5$$

$$Ni_{eq} = 9 + 0,31 \times 2 + 22 \times 0,08 + 14,2 \times 0,06 + 0 = 12,232$$

$$Cr_{eq}/Ni_{eq} = 1,839$$

- Cr_{eq}/Ni_{eq} mínimo para el acero inoxidable DIN 1.4550:

$$Cr_{eq} = 17 + 0 + 1,5 \times 1 + 2 \times 10 \times 0,08 + 0 = 20,1$$

$$Ni_{eq} = 13 + 0,31 \times 2 + 22 \times 0,08 + 14,2 \times 0,06 + 0 = 16,232$$

$$Cr_{eq}/Ni_{eq} = 1,238$$

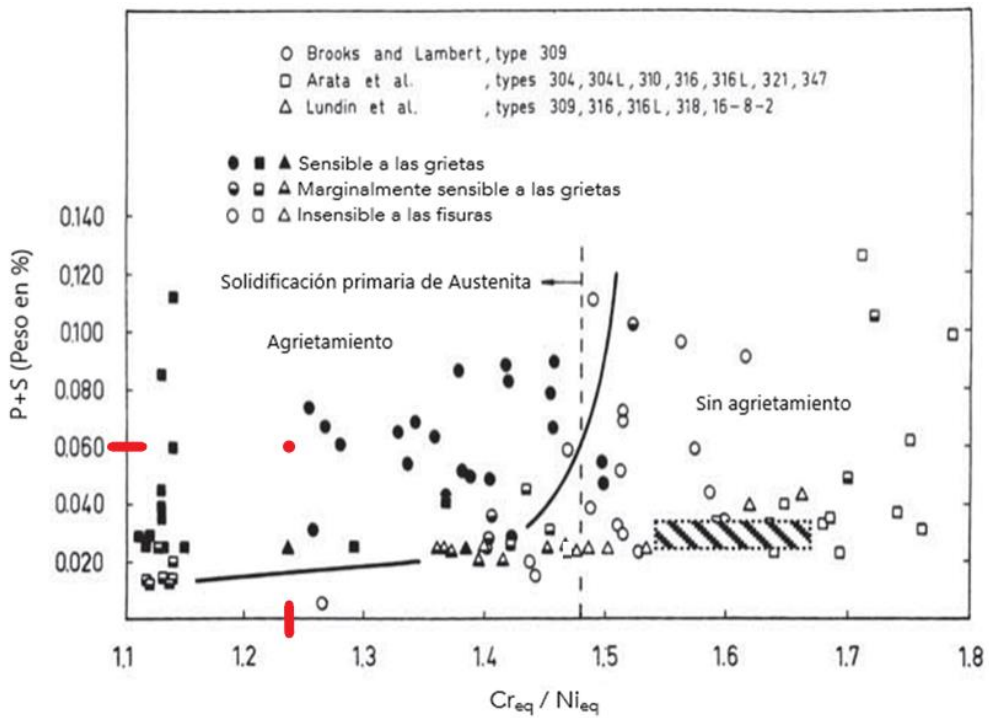


Figura 49: Diagrama de Suutala para Aceros Inoxidables Austeníticos. El punto rojo denota la concentración máxima de elementos gamágenos y la mínima de elementos alfégenos. La limitación del eje Cr_{eq}/Ni_{eq} impidió graficar el punto opuesto [40].

Los resultados del análisis, presentados en la Figura 49, indican que cuando se utilizan los valores máximos de elementos gamágenos y mínimos de alfégenos, punto rojo, el material se encuentra en la región susceptible a sufrir agrietamiento. Mientras que el punto de máxima concentración de alfégenos y mínima de gamágenos no pudo ser graficado debido el gráfico limita la relación Cr_{eq}/Ni_{eq} hasta el valor de 1,8. Dado que el resultado obtenido supera este valor se encontraría en la región que no sufre agrietamiento.

Adicionalmente en este diagrama se muestran los resultados obtenidos, por distintos investigadores, en varios aceros inoxidable de la serie AISI 300, incluyendo el AISI 347 el cual tiene una composición muy similar al DIN 1.4550. Los resultados obtenidos por Arata demuestran claramente que, aunque el material pueda ubicarse dentro de la región sin agrietamiento, existe una tendencia a presentar fisuras [40].

Como complemento a los análisis previos, se utilizó otro diagrama predictivo desarrollado por Suutala basado en la composición del acero inoxidable (Figura 50), el mismo utiliza la misma ecuación empleada en el análisis previo de Suutala (Figura 49) por ende se corresponden los mismos valores de cromo y níquel equivalentes. Este diagrama permite trazar el níquel equivalente y el cromo equivalente correspondientes al análisis, lo que proporciona información sobre la microestructura de precipitación primaria. Esta microestructura es un factor crítico para determinar la susceptibilidad del material a la fisuración [44].

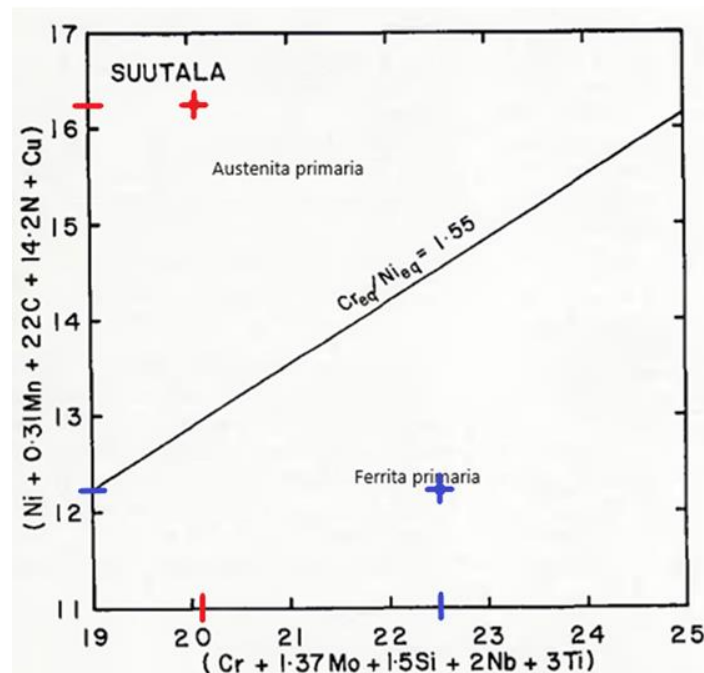


Figura 50: Diagrama de Suutala. La concentración máxima de alfégenos y mínima de gamágenos en color azul, mientras que la concentración máxima de gamágenos y mínima de alfégenos se encuentra en color rojo [44].

Al analizar los valores correspondientes de cromo y níquel equivalente en el diagrama de Suutala (Figura 50), se puede observar que el punto azul representa las concentraciones máximas de elementos alfégenos y mínimas de elementos gamágenos, lo que resulta en una microestructura primaria de ferrita delta debido a la precipitación. Por otro lado, el punto rojo, que refleja las concentraciones mínimas de alfégenos y máximas de gamágenos en el acero, genera una microestructura primaria de austenita. Sin embargo, debido a la falta de información precisa sobre las concentraciones exactas de acero en cuestión, existe un amplio grado de incertidumbre.

Si el material en cuestión tiene una composición cercana a su mínima concentración de alfégenos y máxima de gamágenos, es probable que sea propenso a desarrollar fisuras. Esto se debe a que la austenita proporciona rutas directas de propagación, sin la tortuosidad característica de una microestructura primaria de ferrita delta.

Investigaciones llevadas a cabo por Suutala [45], Vitek y David [46], y Lippold [47], han demostrado que el límite entre la solidificación de la austenita primaria y la ferrita delta primaria no solo depende de la composición del metal de soldadura, sino también de la velocidad de crecimiento o solidificación, cuando el proceso de soldadura promueve velocidades de crecimiento superiores a 10 mm/s (0,39 in/s) [44]. Por lo que se establece este límite como un parámetro de control para evitar la precipitación de la austenita primaria, en aceros con una composición microestructural de ferrita delta cerca del límite establecido.

Un método altamente efectivo y ampliamente aceptado en la actualidad, respaldado por el AWS A5.4 y considerado como una mejora del diagrama de DeLong, al cual suplantó, es el diagrama WRC-1992. Este diagrama es especialmente recomendado para aceros inoxidables de la serie AISI 300 y aleaciones dúplex. Se destaca por su precisión y preferencia en la predicción del contenido de ferrita delta en aceros inoxidables de la serie AISI 300. Se ha observado una mejor correlación entre los valores de ferrita delta medidos y los predichos utilizando este diagrama en comparación con el de DeLong [42]. El diagrama WRC-1992 permite determinar el modo de solidificación del material en función de su composición de cromo y níquel equivalentes, y su representación para esta evaluación se muestra en la Figura 51.

$$Cr_{eq} = \%Cr + \%Mo + 0,7 \times \%Nb$$

$$Ni_{eq} = \%Ni + 35 \times \%C + 20 \times \%N + 0,25 \times \%Cu$$

- Cr_{eq}/Ni_{eq} máximo para el acero inoxidable DIN 1.4550:

$$Cr_{eq} = 19 + 0 + 0,7 \times 1 = 19,7$$

$$Ni_{eq} = 9 + 35 \times 0,08 + 20 \times 0,06 + 0 = 13$$

- Cr_{eq}/Ni_{eq} mínimo para el acero inoxidable DIN 1.4550:

$$Cr_{eq} = 17 + 0 + 0,7 \times 10 \times 0,08 = 17,56$$

$$Ni_{eq} = 13 + 35 \times 0,08 + 20 \times 0,06 + 0 = 17$$

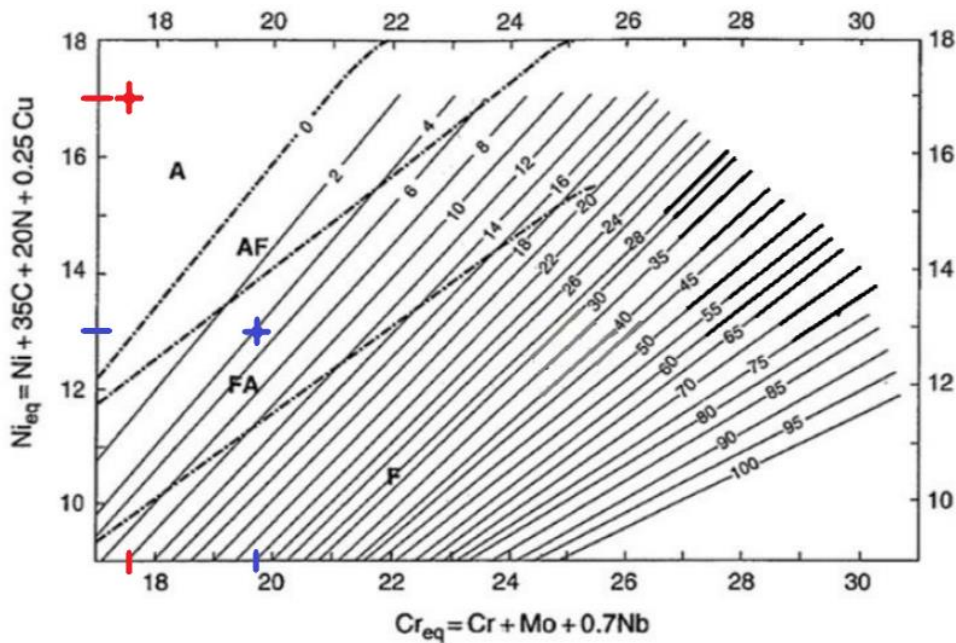


Figura 51: Diagrama WRC-1992 de Kotecki, indicando composiciones máximas de elementos alfégenos y mínimas de gamágenos máximas (azul) y mínimas en elementos alfégenos y máximas en gamágenos (rojo) [7] [41].

Al graficar los valores de cromo y níquel equivalentes en el diagrama WRC-1992 (Figura 51), tanto para un acero con las concentraciones máximas de alfégenos y las mínimas de gamágenos, y viceversa, se puede determinar que el material tendrá dos modos de solidificación en función de su composición. Para la concentración máxima de elementos alfégenos y mínima de gamágenos el material solidificará primariamente en ferrita delta con un porcentaje entre el 4% y 6%, para luego solidificar el resto en austenita. Mientras que para concentraciones mínimas de elementos alfégenos y máxima de gamágenos el material solidificará todo en austenita, y no habrá ferrita delta en la microestructura final. Esto puede generar una morfología propensa a la fisuración en caliente. Es fundamental tener en cuenta este aspecto, especialmente en el contexto de las condiciones de altas temperaturas, como las que se encuentran en los procesos de

soldadura del material. La estructura y morfología resultantes de la solidificación pueden tener un impacto significativo en la susceptibilidad del material a los daños por fisuración.

Por último, se llevó a cabo el análisis predictivo del contenido de ferrita delta basado en la investigación realizada por Aström en 1998 [48]. En dicho estudio, se propone la siguiente ecuación para determinar el número de ferrita delta:

$$FN = -48,53 - 13,85 \times C + 12,73 \times Si + 1,16 \times Mn + 3,89 \times Cr - 3,14 \times Ni + 4,60 \times Mo + 10,10 \times Cu - 20,36 \times N$$

- Reemplazando los valores de composición química del acero inoxidable DIN 1.4550 con máxima concentración de alfégenos y mínima de gamágenos:

$$FN = -48,53 - 13,85 \times 0,08 + 12,73 \times 1 + 1,16 \times 2 + 3,89 \times 19 - 3,14 \times 9 + 0 + 0 - 20,36 \times 0,06$$

$$FN = 9,84$$

- Reemplazando los valores de composición química del acero inoxidable DIN 1.4550 con máxima concentración de gamágenos y mínima de alfégenos:

$$FN = -48,53 - 13,85 \times 0,08 + 12,73 \times 1 + 1,16 \times 2 + 3,89 \times 17 - 3,14 \times 13 + 0 + 0 - 20,36 \times 0,06$$

$$FN = -10,5$$

Según la ecuación de Aström [48], se determina que el contenido microestructural de ferrita delta es aproximadamente del 9,84% en el acero con las concentraciones máximas de elementos alfégenos y mínima de gamágenos, mientras que el acero con su concentración mínima de alfégenos y máxima de gamágenos tiene un valor negativo de ferrita delta en -10,5%. Esto indica que el material, en este último análisis estará lejos de presentar una estructura ferrítica en el material.

3.1.1.4 Análisis de datos del proveedor

Los componentes suministrados por el proveedor KSB SE & Co. estaban destinados a ser potencialmente soldados por NASA en el futuro. Sin embargo, al percatarse de que los materiales no cumplían con la concentración mínima de ferrita delta establecida en el WS E 13.2 de la REL 5002 [36], el proveedor llevó a cabo metalografías y soldaduras utilizando materiales con el código de marcado EHZ. El propósito de estas metalografías y soldaduras fue demostrar a NASA que no habría fisuración

en caliente durante el proceso de soldadura de los componentes, así como también para evidenciar el contenido de ferrita delta. El objetivo final era demostrar a NASA para que considerara aceptar tanto ese lote en particular como los demás (JPW, JMG y KFW). Por lo tanto el proveedor adjuntó informes que incluyen los resultados del contenido de ferrita delta obtenido por ellos con una metodología no informada, el análisis que respalda la ausencia de fisuración en caliente durante la soldadura y los registros de soldadura [49].

En estos mismos documentos proporcionados por el proveedor, se reconoce que el material del lote EHZ presenta un promedio de ferrita delta del 2%, y que no se encontraron grietas por fisuración en caliente.

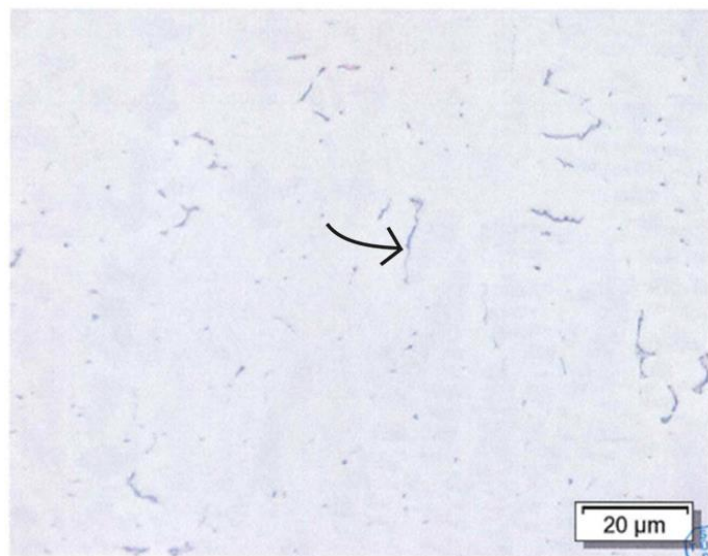


Figura 52: Contenido de ferrita delta del 1%, cordón gris (indicado por la flecha). Magnificación 1000x, realizado por KSB SE & Co. [49].

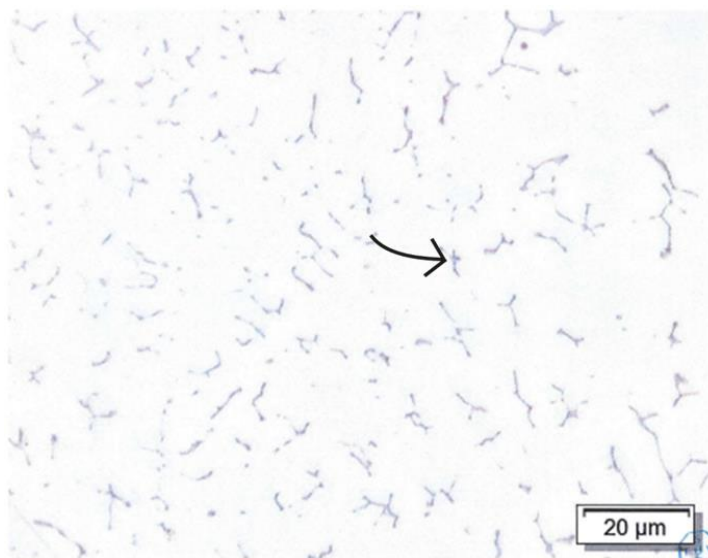


Figura 53: Contenido de ferrita delta del 2%, cordón gris (indicado por la flecha). Magnificación 1000x, realizado por KSB SE & Co. [49].

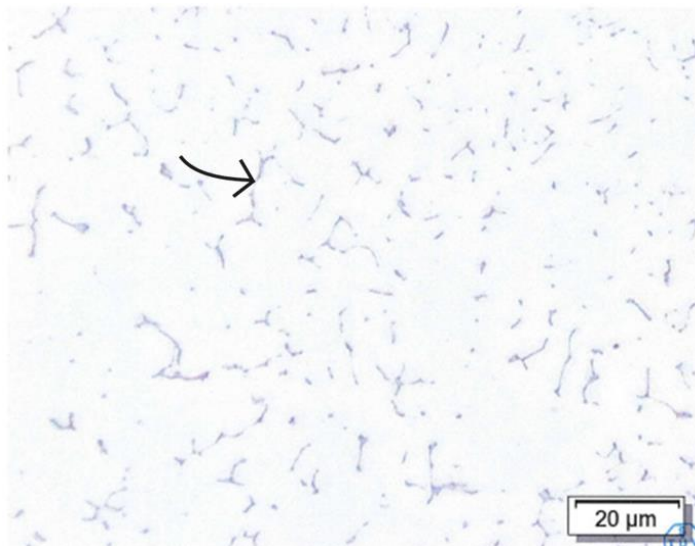


Figura 54: Contenido de ferrita delta del 3%, cordón gris (indicado por la flecha). Magnificación 1000x, realizado por KSB SE & Co. [49].

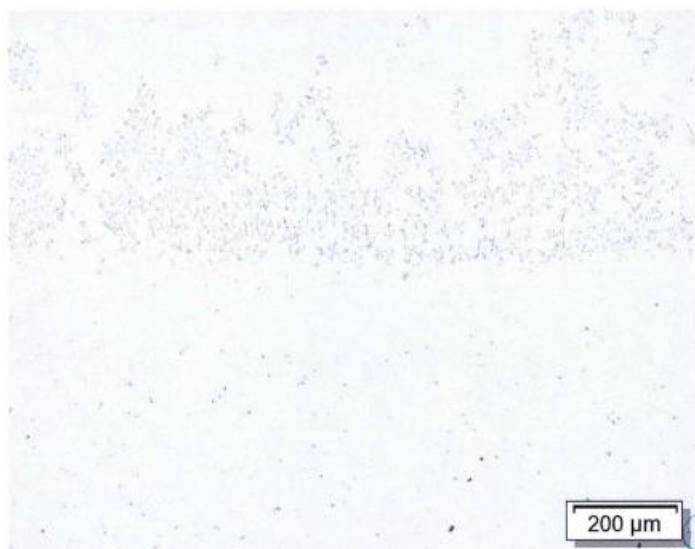


Figura 55: Estructura metalográfica del material base en transición/metal de soldadura. No se aprecian fisuras en caliente en el cordón de soldadura ni en la zona afectada por el calor. Magnificación 100x, realizado por KSB SE & Co. [49].

El análisis de las metalografías del lote EHZ, expuestas en las Figuras anteriores, revela la presencia de ferrita delta en distintas concentraciones: 1% (Figura 52), 2% (Figura 53) y 3% (Figura 54), según informó KSB SE & Co.

En la Figura 55 se muestra una metalografía de corte transversal del cordón de soldadura realizada por el proveedor KSB SE & Co. con el propósito de demostrar la ausencia de fisuración en caliente.

3.1.2 Análisis comparativo de métodos para la elaboración de un nuevo procedimiento de transporte de materiales Clase C1

A solicitud de NASA, se redactó una especificación técnica, con el objetivo de consolidar todos los requisitos establecidos para el embalaje, transporte y almacenaje de componentes metálicos de Clase C1 utilizados en la central nuclear de Atucha II. Estos componentes son vitales para el sistema primario de refrigeración del núcleo y requieren garantías de seguridad. Se trabajó con los requerimientos establecidos en las Secciones 7.8 y 11 del documento WS E 13.2 de la RE-L 5002 [36], así como las Secciones 5 a 9 del AVS E 10.2 [50], que establecen directrices para el transporte de materiales Clase C1. También se analizó el ASME III División 1 sección NB componentes Class 1 [51] y distintas fuentes bibliográficas como investigaciones o artículos académicos.

La nueva especificación busca mejorar el transporte y asegurar el manejo adecuado de los componentes, cumpliendo con regulaciones y contribuyendo a la operación segura y eficiente de la central nuclear. Cubre procedimientos para la preservación de materiales, diseño de embalaje, condiciones de transporte, señalización, manipulación y almacenamiento, aplicados desde la fabricación hasta la instalación de los componentes. Su objetivo es brindar mayor claridad y fluidez en la presentación de la información.

Se exponen los puntos más relevantes de la especificación técnica desarrollados donde se detallan las mejoras en los aspectos en función de los siguientes propósitos:

- Embalaje: Utilizar envases y embalajes adecuados que cumplan con los requisitos de seguridad para contener y proteger los materiales Clase C1 durante el transporte.
- Transporte: Realizar el traslado seguro de los materiales Clase C1 desde su lugar de origen hasta su destino, siguiendo las regulaciones y normativas aplicables.
- Preservación: Mantener las propiedades y condiciones de los materiales Clase C1 durante el transporte, evitando alteraciones o contaminaciones que puedan afectar su integridad o seguridad.
- Paquetes de envío: Preparar y etiquetar correctamente los materiales Clase C1 para su envío, incluyendo la

documentación necesaria y los requisitos de notificación según las regulaciones vigentes.

- **Marca:** Aplicar marcas y etiquetas apropiadas en los envases y embalajes que indiquen claramente la clasificación del material Clase C1, sus riesgos asociados y las precauciones necesarias.
- **Manipulación:** Manejar los materiales Clase C1 de forma segura y adecuada durante todas las etapas del transporte, siguiendo las mejores prácticas y protocolos establecidos.
- **Depósito:** Almacenar temporalmente los materiales Clase C1 en instalaciones seguras y adecuadas antes, durante y después del transporte, garantizando su integridad y minimizando los riesgos asociados.

Estas funciones son fundamentales para asegurar la seguridad y cumplir con las regulaciones aplicables en el transporte de materiales Clase C1.

3.1.3 Redacción de especificación técnica de aleaciones base níquel para componentes internos del reactor

En base a lo solicitado por NASA, se redactó una especificación técnica actualizada para establecer requisitos mínimos en la fabricación de componentes internos para los reactores nucleares de las centrales Atucha I y Atucha II, específicamente materiales base níquel, como Inconel X-750 y 718, usados en la fabricación de bulones y resortes. El trabajo se basó en especificaciones existentes de estas centrales nucleares, como la RE-L 5002 [36] y la MTS A (1,2,3) 15.61 [52] que establecen las directrices para la fabricación del Inconel X-750, así como también en normas como la ASTM, ASME o KTA en sus versiones más recientes. Además, se recurrió a la información recopilada sobre la experiencia en servicio en el uso de estos materiales en manuales como el realizado por el EPRI, así como a la información proporcionada por el fabricante Special Metals [53] [54].

La especificación detalla requisitos para los fabricantes, incluyendo ingeniería de fabricación, procesos, exámenes y pruebas de componentes y partes.

A continuación, se procederá a desarrollar la investigación bibliográfica basándose en lo mencionado previamente, para poder comprender el comportamiento de las aleaciones base níquel, su procesamiento, tratamientos térmicos y experiencia en servicio en centrales nucleares de potencia.

Revisión bibliográfica de aleaciones base níquel

El estudio bibliográfico acerca de las aleaciones base níquel trata las propiedades mecánicas, características microestructurales, formas típicas de degradación y fallas observadas en componentes internos de reactores nucleares para las aleaciones X-750 y 718.

Las aleaciones de base níquel se utilizan ampliamente en diversas industrias debido a sus propiedades únicas. Destacan por su matriz austenítica, su capacidad para disolver altas concentraciones de elementos de aleación y su resistencia a la corrosión con la adición de cromo y aluminio.

Estas aleaciones también presentan una buena resistencia mecánica a altas temperaturas gracias a la precipitación de fases ordenadas con titanio y aluminio. Por lo que son versátiles y se pueden utilizar en un amplio rango de temperaturas, desde criogénicas hasta cerca de 1200 °C, manteniendo su matriz austenítica y una buena resistencia a la corrosión en todo ese rango. Son materiales ideales para diversas aplicaciones en diferentes condiciones de temperatura y ambientes corrosivos. Los aleantes adicionales incorporados en las aleaciones base níquel X-750 y 718, como aluminio, titanio y niobio, endurecidas por precipitación proporcionan una excelente resistencia mecánica y a la corrosión en diversos ambientes y temperaturas extremas. Estas aleaciones base níquel endurecibles por precipitación son conocidas como superaleaciones [55] [56].

3.1.3.1 Aleación 718

La aleación 718 es una superaleación de níquel altamente resistente al calor y a la corrosión, especialmente diseñada para aplicaciones en entornos exigentes como las centrales nucleares. Sus características la hacen altamente adecuada para estos entornos.

En primer lugar, destaca por su excelente resistencia al calor, manteniendo su integridad mecánica en temperaturas de hasta aproximadamente 700 °C e incluso en temperaturas criogénicas de -250 °C. Asimismo, ofrece una alta resistencia a la corrosión frente a ácidos, sales y gases corrosivos, gracias a su contenido de níquel y cromo, que son componentes clave en esta propiedad.

En cuanto a sus propiedades mecánicas, la aleación 718 muestra una resistencia excepcional a la tracción, ductilidad y tenacidad a altas temperaturas, así como una notable resistencia a la fatiga y al agrietamiento por corrosión bajo tensión. Su capacidad para endurecerse por precipitación

se debe principalmente a la presencia de niobio, aunque otros elementos como el tantalio, el aluminio y el titanio también contribuyen a este aspecto.

Además, esta aleación presenta una baja tasa de expansión térmica, lo que significa que mantiene su forma y tamaño de manera estable ante cambios de temperatura. En el ámbito de las centrales nucleares, la aleación 718 se utiliza en diversos componentes del reactor, como tubos, pernos, resortes y elementos estructurales, los cuales están expuestos a altas temperaturas y ambientes corrosivos. También se emplea en turbinas de vapor de alta presión y temperatura, así como en intercambiadores de calor, debido a su resistencia tanto al calor como a la corrosión.

Experiencia en servicio

La aleación 718 se ha utilizado en una variedad de aplicaciones en reactores de agua liviana, incluidas las rejillas espaciadoras de los ensamblajes de combustible, los resortes de sujeción de los ensamblajes de combustible y los componentes de las válvulas.

Se han reportado un número limitado de fallas en servicio de la aleación 718 en reactores de agua liviana. En 1987, se informó de una falla por fatiga de un resorte de sujeción de un ensamblaje de combustible de Babcock & Wilcox Company (B&W). El alambre de aleación 718 se laminó en caliente, se recoció a 1040 °C, se decapó, se estiró en frío, se recoció a 980 °C, se decapó de nuevo, se volvió a estirar en frío, se enrolló y después se envejeció a temperatura constante de 720 °C durante 8 horas, seguido de un segundo envejecimiento a temperatura constante de 620 °C durante 10 horas. La tensión máxima de servicio en torsión es de aproximadamente 455 MPa. Se ha informado de un fallo de servicio, que se atribuyó a la fatiga por fretting, que se inició debido a un mecanismo de rozamiento causado por el contacto entre el muelle y una tuerca del tubo guía. Se supone que los cambios de diseño o fabricación realizados en aquel momento fueron eficaces para evitar que se repitiera, ya que desde entonces no se han registrado más fallos [55].

También se han reportado un número significativo de fallas por fatiga de resortes de sujeción de componentes del núcleo Westinghouse. En 1999 y 2003, se informaron fallas por PWSCC (Fisuración por Corrosión bajo Tensión del Agua Primaria del sistema de refrigeración primario del reactor nuclear) en tornillos de resorte de boquilla superior de ensamblaje de combustible hechos de aleación 718. Las fallas se indicaron como ocurridas cerca de la rosca superior en las pruebas de laboratorio de Westinghouse. Los niveles de tensiones específicos en las ubicaciones de falla no se informaron. La morfología de la fisuración fue una fisuración intergranular consistente con

PWSCC. El enfoque correctivo adoptado fue utilizar tornillos de aleación 718 con modificaciones en su tratamiento térmico para una mayor resistencia a PWSCC, también proporcionada por el granallado, y luego por una secuencia de fabricación mejorada junto con el granallado [55].

Tratamientos termomecánicos y propiedades mecánicas

A continuación se presentan los tratamientos termomecánicos (Tabla 14) y las propiedades mecánicas (Tabla 15) mínimas requeridas a temperatura ambiente, en relación con los tratamientos termomecánicos mencionados.

| Especificación | Tratamiento termomecánico |
|--|---|
| <p>AMS 5596 - chapa, tira, lamina y placa ASTM</p> <p>ASTM B 670 - placa, chapa y tira</p> <p>AMS 5662 y AMS 5663 - barras, forjados y anillos</p> <p>ASME B y ASME SB 637 - barras y forjados</p> | <p>Recocido de solubilización entre 925 °C - 1010 °C entre 1-2 horas.</p> <p>Envejecimiento a 720 °C por 8 horas.</p> <p>Enfriamiento en horno hasta 620 °C.</p> <p>Mantener a 620 °C hasta completar 18 horas de envejecimiento. Enfriamiento al aire.</p> |
| <p>AMS 5597 - chapa, tira y placa</p> <p>AMS 5664 - barras, forjados y anillos</p> | <p>Recocido de solubilización entre 1040 °C - 1065 °C.</p> <p>Envejecimiento a 760°C por 10 horas.</p> <p>Enfriamiento en horno hasta 650 °C, mantener a 650 °C hasta completar 20 horas de envejecimiento.</p> <p>Enfriamiento al aire.</p> |

Tabla 14: Tratamientos termomecánicos aplicables para la aleación 718 [55].

| Especificación | Resistencia mecánica [MPa] | Tensión de Fluencia [MPa] | Reducción de área % | Dureza |
|---|----------------------------|---------------------------|--------------------------|----------------|
| AMS 5596 ASTM B 670 | 1241 | 1034 | - | 36 HRC |
| AMS 5662 AMS 5663 ASTM B ASME SB 637 | 1241, 1241, 1276 | 1034 | 8, 12, 15 ⁽¹⁾ | 331 HB mín. |
| AMS 5597 | 1241 | 1034 | - | 38 HRC |
| AMS 5664 | 1241 | 1034 | 12-15 ⁽²⁾ | 341 HB |

Tabla 15: Propiedades mecánicas correspondientes a las distintas especificaciones de la aleación 718.

(1) Valor más alto para la dirección longitudinal, valor medio para la dirección transversal larga de las piezas forjadas y valor más bajo para la dirección transversal de las barras. (2) Mayor valor para piezas forjadas y anillos y menor valor para barras [55].

Las propiedades óptimas del Inconel 718 en términos de resistencia a la rotura y ductilidad se logran mediante el tratamiento térmico especificado en AMS 5596 y AMS 5662 (Tabla 15), basado en la información previamente mencionada. Además, si el material tiene un tamaño de grano fino de al menos ASTM N° 5, se obtendrá una buena resistencia a la fatiga.

En la siguiente Figura 56 se ilustra las propiedades mecánicas típicas de la aleación 718 cuando se somete a un tratamiento de recocido y envejecimiento a altas temperaturas.

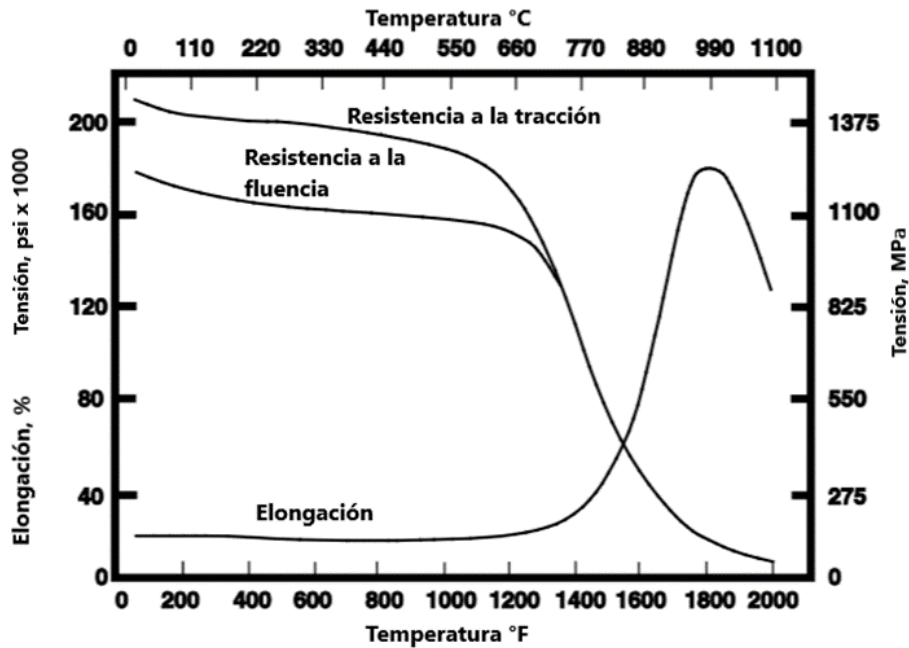


Figura 56: Propiedades a alta temperatura de una barra de diámetro 12.7 mm laminada en caliente, recocida a 980 °C por 1 hora y envejecida a 720 °C por 8 horas, y luego a 620 °C durante un tiempo total de 18 horas [55] [53].

La aleación 718 exhibe excelentes propiedades mecánicas en un amplio rango de temperaturas, incluyendo condiciones de bajas temperaturas. Esto la convierte en un material adecuado para su aplicación en reactores nucleares.

El fabricante Special Metals recomienda el uso de la aleación 718 con el tratamiento térmico específico que consiste en el recocido a 980 °C durante 1 hora, seguido del envejecimiento a 720 °C durante 8 horas, enfriar en horno hasta 620 °C y mantener a esa temperatura durante un tiempo total de 18 horas. Este tratamiento térmico ha demostrado ser altamente beneficioso para el uso de la aleación 718 en aplicaciones de resortes. El material exhibe una excelente resistencia a la relajación, especialmente a temperaturas de hasta 590 °C, como se evidencia en la Figura 57 [55] [53].

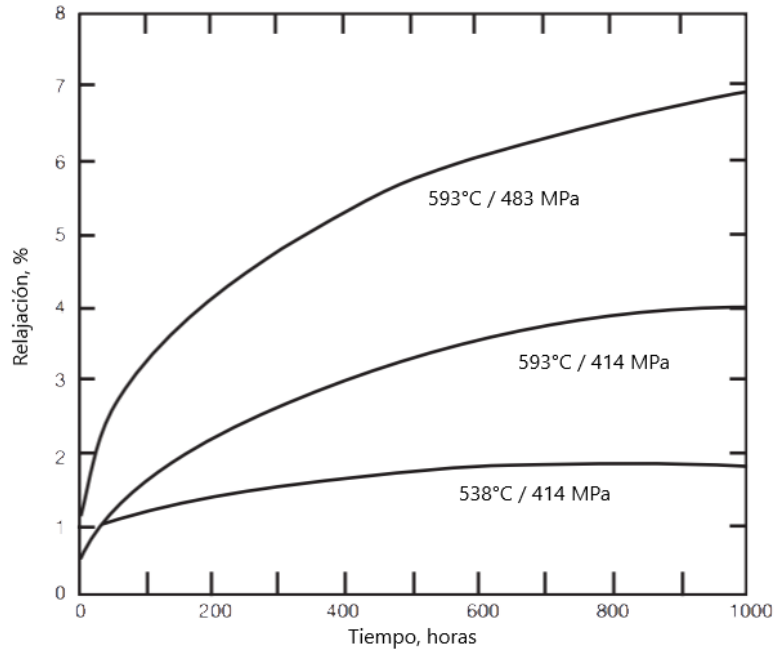


Figura 57: Relajación de resortes helicoidales de 3.76 mm de diámetro, de alambre templado N°1 estirado en frío. Resortes recocidos a 980 °C por 1 hora y envejecido a 720 °C por 8 horas, enfriado en horno hasta 620 °C y mantenido durante un tiempo total de envejecimiento de 18 horas [53].

El EPRI recomienda ciertos tratamientos térmicos para la fabricación de resortes utilizando la aleación 718, los cuales se describen en la Tabla 14. Sin embargo, debido a las fallas reportadas en estos materiales por PWSCC en entornos de aplicaciones de reactores PWR, se sugiere aplicar límites más estrictos dentro de los establecidos en SB 637. Esto garantizará que el material aún cumpla con los requisitos del código ASME, pero exhiba una mayor resistencia a la fisuración por corrosión bajo tensión (SCC) [55].

La sensibilidad al SCC está estrechamente relacionada con la distribución y morfología de las fases de endurecimiento y los carburos. Por lo tanto, es crucial mantener un control preciso dentro de los límites recomendados. Estos límites más estrictos incluyen reducir el rango de temperatura de recocido de 930 – 1010 °C a 980 – 1010 °C durante 1 hora, seguido de un endurecimiento por precipitación en dos pasos a 720 °C durante ocho horas y a 620 °C durante 8 a 10 horas. Además, se requiere que el tamaño de grano sea ASTM 5 o más fino [55] [53].

Adicionalmente se recomendó mejorar las prácticas de procesamiento en conjunto con la optimización del tratamiento térmico.

En la secuencia original, se sugiere un laminado previo al endurecimiento por envejecimiento. Para mejorar esta secuencia, se ha agregado un granallado posterior con el objetivo de aplicar tensiones de compresión en el área superior de la rosca.

La secuencia final de fabricación incorpora las mejoras mencionadas anteriormente y, además, incluye un laminado en caliente en roscas que ya han sido endurecidas por envejecimiento. Esperando que este ajuste proporcione tensiones residuales más favorables y una microestructura mejorada, disminuyendo las posibilidades de crecimiento de grano. Agregando además un pulido en la transición de la cabeza al vástago para reducir la probabilidad de corrosión bajo tensión en esa área o PWSCC.

Las pruebas realizadas en tornillos fabricados siguiendo la secuencia final demostraron que no se presentaron fallas por SCC o PWSCC en ensayos realizados durante 1500 horas, mientras que los tornillos fabricados según la secuencia original fallaron después de 100 o 200 horas [55].

El EPRI también sugiere otros dos tratamientos térmicos que pueden inhibir la SCC en condiciones del refrigerante primario de reactores PWR. Estos tratamientos son los siguientes:

- Recocido de solubilización a 1095 °C durante 1 h, temple al agua, envejecer a 720 °C durante 50 h y luego a 665 °C durante 50 h, temple al aire. Este tratamiento resulta en una dureza aproximada de 42 HRC.
- Recocido de solubilización a 1095 °C durante 1 h, temple al agua, envejecer a 665 °C durante 100 h, temple al aire. La dureza final se encuentra alrededor de los 37 HRC.

El buen rendimiento de estos tratamientos térmicos se relaciona con la ausencia de segundas fases, como carburos y δ , en los bordes de grano. Además, aseguran una distribución uniforme de los precipitados γ'' y γ' en toda la matriz [55].

Por otro lado, se ha encontrado que se realizaron pruebas para analizar el comportamiento de los materiales en centrales nucleares cuando son sometidos a deformación bajo condiciones de irradiación. Los resultados de estas pruebas revelan que la aleación 718 presenta una baja tasa de fluencia, lo que la convierte en una opción recomendada para aplicaciones de resortes en el núcleo de reactores [55].

Tamaño de grano

Se recomienda que los resortes hechos de Inconel 718 tengan un tamaño de grano ASTM N°5 o menor. En la Figura 58 se muestra el efecto del tamaño de grano para tratamientos de recocido a diferentes temperaturas durante 30 minutos en productos laminados de Inconel 718 con distintos porcentajes de trabajado en frío [55] [53].

En el mismo, se observa que a medida que se incrementa el trabajo en frío, se obtiene un tamaño promedio de grano mayor según la escala ASTM. Dado que este valor es inversamente proporcional al tamaño de grano, podemos concluir que los granos serán más pequeños. Esto tiene sentido, ya que al deformar el material, los granos grandes se fragmentan en granos más pequeños. La Figura 58 muestra que existe una temperatura crítica de 980 °C, por debajo de la cual los granos no aumentan de tamaño. A partir de esta temperatura, comienzan a crecer. Por lo tanto, es esencial controlar cuidadosamente la temperatura y el tiempo para evitar que el tamaño de grano supere el ASTM N°5.

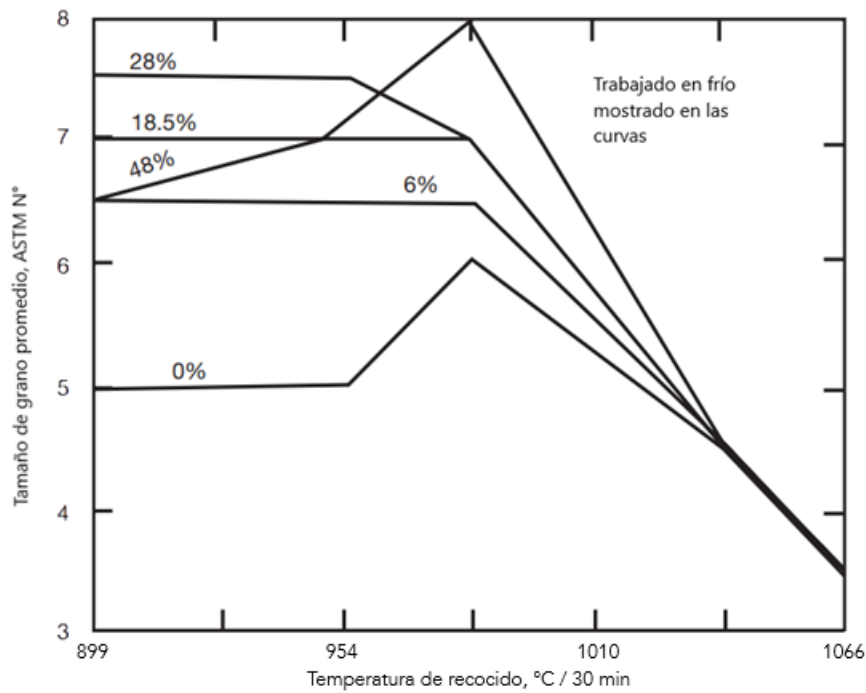


Figura 58: Efecto de la temperatura de recocido en el tamaño de grano de la lámina para distintos porcentajes de trabajado en frío [55] [53].

Un estudio analizado trata el impacto de diferentes tratamientos termomecánicos en la aleación 718. Estos tratamientos tienen un efecto significativo en la microestructura, afectando la disposición de los granos, precipitados y fases presentes, lo cual incide en la fragilidad del material en entornos de reactores PWR [57].

En particular, ciertas fases y la distribución de precipitados pueden aumentar la susceptibilidad de la aleación 718 a la SCC. El artículo menciona que los tratamientos termomecánicos que evitan la formación de la fase- δ (compuesta principalmente por Ni y Nb) pueden mejorar la resistencia a la SCC. Por otro lado, se observa que condiciones con una alta cantidad de

fase- δ en los límites de grano y dentro de los granos pueden ser más propensas a experimentar SCC [57].

Además, el tamaño de grano también puede influir en la fragilidad del material. En general, se ha observado que un tamaño de grano más grande puede aumentar la susceptibilidad a la SCC [57]. Por lo tanto, es justificable restringir el tamaño de grano a ASTM N°5 o menor, como se recomienda [55] [53].

Limitaciones del empleo de la aleación 718 en reactores nucleares

- **Procesamiento termomecánico adverso**

Las pruebas de laboratorio indican que esta aleación puede tener una susceptibilidad relativamente alta a la fisuración por corrosión bajo tensión intergranular (IGSCC) en entornos de refrigerante de reactor si el material se produjo de acuerdo con las secuencias de procesamiento termomecánico que se especifican en las típicas especificaciones de la industria mencionadas en la Tabla 14. Sin embargo, como también se plantea en los tratamientos termomecánicos, propiedades mecánicas y tamaño de grano, se han identificado mejoras en los pasos de procesamiento termomecánico que aumentan la resistencia a la corrosión bajo tensión [55].

- **Altas tensiones y daño en la superficie**

La Aleación 718 pueden experimentar corrosión bajo tensión intergranular si las tensiones totales están cerca o superan el límite elástico, especialmente si hay daño en la superficie (por ejemplo, trabajo en frío local). Sin embargo, se espera que estas versiones mejoradas muestren tasas de crecimiento de grietas relativamente bajas si las grietas se inician [55].

- **Efectos de la irradiación**

Las pruebas realizadas en ubicaciones del núcleo donde se acumularon considerables fluencias de neutrones muestran que la Aleación 718 tiene una mejor resistencia a la fisuración por corrosión bajo tensión asistida por irradiación (IASCC) que la mayoría de las otras aleaciones austeníticas [55].

- **Microestructura**

Las condiciones metalúrgicas producidas por los tratamientos termomecánicos a la aleación 718 tienen una influencia considerable en las propiedades mecánicas, afectando a la microestructura, y dependiendo de la formación de precipitados en los límites de grano, también puede afectar la susceptibilidad al IGSCC [58] [59].

Las fases que determinan a la aleación 718 son las siguientes:

- Matriz γ cúbica y centrada en las caras (FCC).
- Precipitados intergranulares γ' (estructura L_{12}), que suelen estar presentes en aleaciones de níquel envejecidas y son metaestables.
- Precipitados intragranulares γ'' (estructura ordenada DO_{22}). Esta fase es el principal precipitado de endurecimiento debido a las tensiones de coherencia que se producen durante la precipitación. Además, también son metaestables y su formación está relacionada con la adición de niobio.
- La fase δ es similar a γ'' , con una composición ideal del tipo Ni_3Nb . Posee una estructura ortorrómbica y es estable. Puede presentarse en forma de bloques en los bordes de los granos o como placas de Widmanstätten a lo largo de la matriz en los planos de deslizamiento $\{111\}$. La precipitación es más notable entre 925 y 950 °C. Asimismo, desempeña un papel importante en el control del tamaño de grano, ya que inhibe el crecimiento de los granos.
- Fases de Laves (A_3B) se forma si la concentración de Nb 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.
- Fases menores.

En función de las fases antes mencionadas se listan los precipitados obtenidos en los tratamientos térmicos a distintas temperaturas [58]:

- El tratamiento térmico a 760 °C forma precipitados γ' dentro de los granos.
- El envejecimiento a 870 °C produce precipitados intragranulares e lenticulares gruesos con $\sim 0,3 \mu m$ de longitud, con una estructura cristalina ordenada DO_{22} . Estos precipitados son enriquecidos en Nb y Ti, pero empobrecidos en Al, Fe, Cr y Mo en comparación con la matriz. Estos mejoran la resistencia mecánica de la aleación, pero su tamaño y distribución pueden influir en la formación de fisuras y la propagación de la corrosión bajo tensión.

- El envejecimiento a 760 °C produce precipitados γ'' mucho más finos, tanto dentro de los granos como en los límites de grano. Estos precipitados son de forma lenticular y tienen un tamaño entre 10 y 40 nm. La presencia de estos precipitados secundarios puede aumentar aún más la resistencia y la dureza de la aleación, mejorando sus propiedades mecánicas y su capacidad de resistir la deformación por fluencia.
- El tratamiento térmico cerca de 950 °C provoca la precipitación de la fase delta (Ni_3Nb) en los límites de grano. Esta fase δ estabiliza los límites de grano, lo que resulta en una mayor resistencia a la deformación por fluencia de la aleación. Este tratamiento térmico es comúnmente utilizado en aplicaciones aeroespaciales para mejorar la resistencia estructural del material en condiciones de alta temperatura y carga.
- La aleación 718 altamente segregada, es decir, con una distribución desigual de los elementos químicos en su estructura, puede ser susceptible a la formación de la fase Laves en las regiones ricas en niobio (Nb). La presencia de la fase Laves puede debilitar los límites de grano y promover la propagación de la corrosión bajo tensión, reduciendo así la integridad del material.
- Aunque la formación de precipitados en los límites de grano, como la fase δ y la fase Laves, es deseable para promover la resistencia a la deformación por fluencia, también tienen un efecto perjudicial en la resistencia de la aleación a la corrosión bajo tensión inducida por fisuras intergranulares. Estos precipitados pueden actuar como sitios preferenciales para la iniciación y propagación de fisuras, aumentando la susceptibilidad a la corrosión bajo tensión en ambientes corrosivos.
- En un trabajo reciente realizado por EPRI, se demostró que el tratamiento térmico y la tendencia resultante a la formación de la fase δ tienen un impacto significativo en la susceptibilidad a la corrosión bajo tensión inducida por fisuras intergranulares en agua primaria de reactores PWR. Indicando la importancia de seleccionar cuidadosamente los parámetros del tratamiento térmico para garantizar un equilibrio óptimo entre la mejora de las propiedades mecánicas y la resistencia a la corrosión del material en aplicaciones específicas.

3.1.3.2 Aleación X-750

La superaleación de base níquel X-750, también conocida como Inconel X-750, es una aleación austenítica de níquel-cromo-hierro endurecible por precipitación. Fue originalmente desarrollada para aplicaciones de alta temperatura que requieren buena resistencia a la corrosión y alta resistencia, como en turbinas de gas. En plantas de energía nuclear, se utiliza donde se necesita alta resistencia a la corrosión similar a la aleación 600 base níquel (Inconel 600), pero con mayor resistencia mecánica y mayor resistencia a la fatiga que la aleación 600.

Inicialmente, se utilizaron tratamientos térmicos desarrollados para la industria de turbinas de gas. Sin embargo, debido a problemas que surgieron en los primeros cuatro años de servicio en entornos nucleares, se desarrollaron tratamientos térmicos específicos para mejorar el rendimiento y tratar la SCC. La aleación X-750 producida de acuerdo con los requisitos nucleares posteriores ha funcionado satisfactoriamente en general, aunque puede presentar problemas si se sobrecarga accidentalmente o se fabrica con una secuencia de fabricación no óptima.

Se ha utilizado ampliamente en aplicaciones internas de reactores nucleares, como resortes de retención de conjuntos de combustible, pernos, sujetadores de canal de combustible, pasadores de soporte de tubos guía de varillas de control, vigas para bombas de chorro y restricciones de carenado central debido a su alta resistencia, siendo uno de los pocos materiales calificados para su uso en ambientes nucleares. Sin embargo, ha habido casos de fallas inducidas por SCC que han llevado a la sustitución de piezas y a una investigación exhaustiva para reducir la susceptibilidad a la falla por SCC.

Se encontró que se han realizado investigaciones para mejorar el rendimiento de la aleación X-750, dando lugar a nuevas especificaciones para el tratamiento de la aleación con el propósito de garantizar una resistencia adecuada al SCC. A pesar de las mejoras, algunos proveedores de sistemas de suministro de vapor en reactores nucleares han optado por reemplazar la aleación X-750 con materiales alternativos en ciertos casos. Durante este proceso, se implementaron tratamientos térmicos específicos para tratar problemas de SCC, se tomaron medidas para reducir las altas tensiones superficiales y se adoptaron prácticas de fabricación más cuidadosas para mejorar la integridad estructural del material [55].

Experiencia en servicio

Durante el tiempo en servicio en aplicaciones nucleares, la aleación X-750 ha experimentado diversas fallas en componentes como resortes y bulones que han sido objeto de estudio e investigación por parte de expertos. El objetivo de estas investigaciones ha sido optimizar los parámetros de fabricación de la aleación para prolongar la vida útil de los componentes en ambientes de reactores nucleares como del tipo BWR (reactor de agua hirviente) y PWR.

A continuación, se describen algunas de las fallas más relevantes que se han presentado durante la experiencia en servicio de la aleación X-750 en estas aplicaciones. Estas fallas han llevado a mejoras en el tratamiento térmico, el diseño y la fabricación de los componentes para reducir la susceptibilidad al SCC y otras formas de fallas, asegurando así la seguridad y el rendimiento óptimo de los reactores nucleares [55].

1. Fallas por SCC en Pines de Soporte de Tubos Guía de Varillas de Control: Se han reportado fallas en los pines de aleación X-750 en reactores PWR de diseño Westinghouse en diferentes países debido a la susceptibilidad a la SCC en ambientes de reactores. Como respuesta a estas fallas, se realizaron cambios en el tratamiento térmico, diseño y detalles de fabricación para mejorar la resistencia al SCC. Sin embargo, incluso con un tratamiento térmico mejorado, la aleación X-750 aún puede experimentar SCC si los niveles de tensiones son suficientemente altos y se presentan daños en la superficie.
 - Tratamiento térmico inicial: Condición AH (Endurecimiento por envejecido) con alta susceptibilidad al SCC en ambientes de refrigerante de reactor.
 - Cambios posteriores al tratamiento térmico: Tratamiento de recocido de solución a alta temperatura (HTH) seguido de un solo paso de envejecimiento. Además, se implementaron mejoras en el diseño y la fabricación, como mecanizado final, roscado de tornillos y granallado después del tratamiento térmico final de endurecimiento por precipitación. Es importante tener en cuenta que algunas de estas mejoras podrían causar deformaciones plásticas si las tensiones locales máximas son demasiado altas.
2. Fallas por SCC en Vigas de Bombas de Reactores BWR: En estos reactores de diseño por General Electric, se han reportado fallas en las vigas de las bombas de aleación X-750 debido a una combinación de SCC y fatiga. Estas fallas ocurrieron en diferentes plantas y, en algunos casos, se debieron a un tratamiento térmico susceptible y niveles elevados de tensiones. En respuesta a estas fallas, se realizaron mejoras

en el tratamiento térmico y en el diseño para reducir la tensión en las piezas.

- Tratamiento térmico inicial: La aleación X-750 con un tratamiento térmico del tipo AH con condiciones de alta susceptibilidad al SCC, junto con tensiones máximas de 582 MPa debido a altas precargas aplicadas a la viga.
 - Cambios posteriores al tratamiento térmico: Se utilizó la aleación X-750 en una condición mejorada de tratamiento térmico de recocido de solución y envejecido (HTH), con precargas reducidas para disminuir la tensión máxima a aproximadamente 496 MPa.
3. Fallas de Resortes de Sujeción de Ensamble de Combustible: A comienzos de los años 80, se registraron varias fallas en los resortes de sujeción de ensamblajes de combustible en reactores BWR y PWR de diseño B&W, fabricados con la aleación X-750. Estas fallas se atribuyeron a una combinación de fatiga y SCC debido a condiciones complejas de tensiones, cambios microestructurales y daños superficiales. Después de implementar cambios en el diseño y los materiales en 1983, no se reportaron más fallas de este tipo.
- Tratamiento térmico inicial: Resortes tratados térmicamente con la condición N° 1 del AMS 5698, que incluye recocido de solución a 1150 °C, estiramiento en frío con una reducción del 16% en el área y envejecimiento por precipitación a 730 °C durante 16 horas.
 - Cambios posteriores al tratamiento térmico: Se implementaron cambios en el diseño y el material en 1983 para resolver el problema, pero no se especifican los detalles de los cambios realizados.
4. Fallas de Pernos de Sujeción del Barril del Núcleo: En la planta de Chooz-A, se produjeron fallas en los pernos de sujeción del barril del núcleo debido a SCC de la aleación X-750 después de aproximadamente 100,000 horas de servicio. Se determinó que el tratamiento térmico utilizado en los pernos fue un factor contribuyente en las fallas, y se implementaron mejoras en el tratamiento térmico y en los niveles de tensiones para resolver el problema.
- Tratamiento térmico inicial: Los pernos de aleación X-750 que fallaron recibieron un tratamiento térmico que incluía un recocido de solución a baja temperatura 955 °C y un tratamiento de envejecimiento de dos etapas, comenzando por 730 °C durante 8 horas, seguido de 620 °C durante 8 horas.
 - Cambios posteriores al tratamiento térmico: Los pernos defectuosos fueron reemplazados por pernos de aleación X-750

con un tratamiento térmico mejorado Tipo 3 de la norma B/SB-637 [60] y se redujeron las tensiones (434 MPa de tensión nominal inicial).

5. Fallas de Soportes de Varillas de Amarre del Núcleo en varios Reactores, se han reportado fallas de soportes de varillas de amarre del núcleo fabricados con la aleación X-750 debido a SCC y altos niveles de tensiones. Se realizaron modificaciones en el diseño de las piezas y se redujeron los niveles de tensiones para evitar futuras fallas.

Tratamientos termomecánicos y propiedades mecánicas

Los requerimientos de tratamientos térmicos recomendados para bulones y resortes de Inconel X-750 de acuerdo a la MTS A (1,2,3) 15,61 [52], se presentan en las Tablas 17 y 18 respectivamente. Estos tratamientos eran los que se aplicaban antes de la creación de la nueva especificación técnica. Por lo tanto, se realizó un análisis para determinar si los tratamientos termomecánicos originales han sido superados o mejorados. La principal preocupación es evitar una variedad de fallas, como fatiga, o especialmente aquellas causadas por SCC. Se buscó aplicar un nuevo tratamiento termomecánico recomendado que tratará estos problemas específicos, dada la incidencia de fallas reportadas con los tratamientos originales. Durante este análisis, se priorizó la búsqueda del tratamiento que ofreciera la mayor resistencia mecánica para los componentes, dentro de los disponibles por las normas ASTM, AMS, o ASME para la fabricación de resortes y bulones.

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

Tabla 16: Tratamiento térmico recomendado por la MTS A (1,2,3) 15,61 para la fabricación de pernos y bulones de Inconel X-750 [52].

| Tratamiento térmico | |
|--|---|
| Recocido | Endurecimiento por precipitación |
| <p>≥ 1150 °C</p> <p>Máximo 15 minutos</p> <p>Enfriar al aire o en agua</p> | <p>730 ± 15 °C</p> <p>Mantener por 16 h y enfriar al aire</p> |

Tabla 17: Tratamiento térmico recomendado por la MTS A (1,2,3) 15,61 para resortes de Inconel X-750 de diámetros entre 0.4 mm y 15mm [52].

Según lo analizado el tratamiento térmico adecuado para la fabricación de pernos y bulones es el ASME/ASTM B/SB-637 (Tabla 18) [55] [61] [54]. Consecuentemente el tratamiento térmico adecuado para la fabricación de resortes es el AMS 5699G (Tabla 19) [55] [62]. Ambos han sido sustituidos a partir de los informes de fallas reportados por los distintos fabricantes de estos componentes. Posteriormente al reemplazo de los tratamientos originales, no se han reportado fallas en los componentes, alargando su vida útil en el reactor.

| Tratamiento termomecánico | |
|--|---|
| Recocido | Endurecimiento por precipitación |
| <p>Reducción del espesor 20%</p> <p>1080 °C a 1120 °C</p> <p>Mantener durante 1 a 2 horas y enfriamiento rápido al agua o aceite</p> | <p>705 °C</p> <p>Mantener por 20 horas y enfriamiento al aire</p> |

Tabla 18: Tratamiento térmico HTH recomendado para la fabricación de pernos y bulones de Inconel X-750 de acuerdo a ASME/ASTM B/SB-637 Tipo 3 [55] [54] [60].

| Tratamiento termomecánico | |
|--|--|
| Recocido | Endurecimiento por precipitación |
| <p>1095 °C a 1205 °C hasta homogeneizar</p> <p>Hasta 6,35 mm de espesor debe reducirse en frío un 50% a 65%</p> <p>De 6,35 a 15,88 mm se debe reducir en frío no menos del 30%</p> | <p>650 °C ± 15 °C por 4 horas ± 15 minutos</p> <p>Enfriamiento al aire</p> |

Tabla 19: Tratamiento térmico para resortes de Inconel X-750 de acuerdo a la especificación AMS 5699G [61][54][62].

Las propiedades mecánicas del material sometido a los distintos tratamientos térmicos se detallan en la Tabla 20, según la normas ASME SB-637 [60] y AMS 5699 [62].

| Especificación | Resistencia mecánica [MPa] | Tensión de Fluencia [MPa] | Reducción de área % | Dureza |
|----------------------------------|----------------------------|---------------------------|---------------------|--------------------------|
| ASME/ ASTM B/SB-637 (HTH) Tipo 3 | 1105 | 690 | 20 | 267 - 363 HB 27 - 40 HRC |
| AMS 5699G | 1517 (0,3 a 6,35 mm) | - | - | - |
| | 1379 (6,35 a 10,62 mm) | | | |
| | 1241 (10,62 a 15,88 mm) | | | |

Tabla 20: Propiedades mecánicas correspondientes a las distintas especificaciones de la aleación X-750, según la normas ASME SB-637 [60] y AMS 5699 [62].

Limitaciones del empleo de la aleación X-750 en reactores nucleares

- **Procesamiento termomecánico adverso**

Este material presenta una alta susceptibilidad al IGSCC si fue fabricado siguiendo ciertas secuencias de procesamiento termomecánico que eran comunes en las décadas de 1960 y 1970. Esta vulnerabilidad se aplica tanto en entornos de reactores PWR como BWR. Por ejemplo, la condición AH, que involucra calentamiento a 980 °C, mantenimiento a 885 °C durante 24 horas y envejecimiento a 705 °C durante 20 horas con enfriamiento al aire, es representativa de un tratamiento térmico con alta susceptibilidad al IGSCC.

Este material se creó en una época en la que no se comprendía plenamente la importancia de mantener una composición y microestructura uniformes. Como resultado, existen pocas regulaciones que limiten los rangos de composición y los métodos de procesamiento más allá de lo establecido en las especificaciones de materiales estándar ASTM/ASME. Esta falta de regulación ha dado lugar a una amplia variación en las prácticas de fusión, las composiciones de aleación y los procesos de lingotado y forjado, lo que ha provocado una falta de uniformidad en los productos finales. Esta falta de uniformidad puede afectar la resistencia al agrietamiento por corrosión bajo tensión [55].

- **Altas tensiones y daño en la superficie**

El IGSCC puede presentarse incluso en las versiones más mejoradas de la aleación X-750 si las tensiones máximas se acercan o superan el límite elástico del material.

Es importante considerar los posibles daños en la superficie del material, como penetraciones intergranulares causadas por el mecanizado por electroerosión (EDM) o daños provocados por el tratamiento térmico de precipitación, como la oxidación superficial en los límites de grano. Por lo tanto, se deben limitar las tensiones máximas, teniendo en cuenta los factores de concentración de tensiones y las tensiones residuales. Se recomienda llevar a cabo el mecanizado final después del tratamiento térmico de precipitación y eliminar cualquier capa superficial dañada.

En la revisión del BWRVIP-84 (un informe de pautas de criterios de diseño para la reparación de componentes internos de BWR elaborado por el EPRI) de 2012, se permite el uso de EDM, siempre que se retire mecánicamente una cantidad mínima de material o la cantidad demostrada por el proveedor para asegurar que la superficie esté libre de grietas. El uso de la EDM con

hilo es una opción viable, ya que su menor aporte de calor evita la formación de microfisuras. Se ha aplicado la EDM con hilo en varios componentes en servicio de BWR, sin necesidad de mecanizado mecánico o pulido posterior, y hasta la fecha no se han registrado fallos en estos componentes [55].

- **Efectos de la irradiación y el tiempo a altas temperaturas**

En pruebas realizadas en reactores, se ha observado una degradación significativa en la resistencia al SCC en materiales de la aleación X-750 con tratamientos de alta temperatura y alta resistencia (HTH) cuando se exponen a altos flujos de neutrones. Además, el material experimenta IASCC, lo que significa que la irradiación disminuye la capacidad de resistir la corrosión bajo tensión en entornos corrosivos.

Estos factores de irradiación y el tiempo a altas temperaturas también provocan cambios en la microestructura y propiedades mecánicas del material, lo que aumenta su susceptibilidad a la fractura. Por tanto, es esencial tener en cuenta estos cambios en aplicaciones específicas, tomando medidas como reducir los niveles de tensión para prevenir problemas de fractura. Se sugiere que optimizar la química del material podría ser beneficioso para aplicaciones con alta fluencia de neutrones, contrarrestando los efectos negativos de la irradiación.

A pesar de los desafíos presentados por la irradiación, se ha observado que ciertos componentes de la aleación X-750, como espaciadores de combustible y pernos de fijación de canales, han demostrado un rendimiento exitoso incluso en condiciones de alta fluencia de neutrones. Esto se debe a la relajación mejorada por la radiación, donde los defectos generados por esta, como vacancias y dislocaciones, actúan como centros de relajación del material, lo que beneficia su capacidad para soportar tensiones [55].

- **Microestructura**

La aleación X-750 tiene una microestructura compuesta por granos gruesos y equiaxiales con diámetros que oscilan entre 0,15 y 0,5 mm. Su resistencia y excelente capacidad de deformación se deben a una fina dispersión de precipitados γ' , principalmente compuestos de $\text{Ni}_3(\text{Ti}, \text{Al}, \text{Nb})$, que son coherentes con la matriz γ .

Además de la matriz, la aleación X-750 contiene tres fases secundarias importantes: carburos MC (Nb, Ti), carburos M_{23}C_6 (principalmente de cromo) y partículas γ' con estructura cristalina L1_2 . Los carburos MC son cúbicos y

estables hasta 1200 °C, mientras que los carburos $M_{23}C_6$ son FCC y se disuelven alrededor de los 870 °C.

Se reportó que las tasas máximas de corrosión general ocurren con tamaños de γ' de 30 nm a 40 nm, lo cual también corresponde a la máxima resistencia a la tracción y la mínima ductilidad del material. La resistencia a la corrosión mejora con tamaños de $\gamma' < 30$ nm [55].

Los carburos MC afectan indirectamente la resistencia a la corrosión de la aleación X-750, ya que reducen la cantidad de carbono disponible para formar los carburos $M_{23}C_6$. Estos carburos MC se forman a altas temperaturas, mientras que los $M_{23}C_6$ se forman a bajas temperaturas. Para controlar este proceso, se realiza un tratamiento de solubilización a temperaturas elevadas, superiores a 1065 °C, para disolver los carburos MC y proporcionar carbono en solución, que luego precipitará como carburos $M_{23}C_6$ durante el envejecimiento. La temperatura del tratamiento de solubilización determina la cantidad de carbono en solución y, a su vez, afecta la resistencia final a la corrosión bajo tensión de la aleación.

En estudios donde se disolvieron los carburos MC con un tratamiento de solubilización a alta temperatura y luego se envejecieron las probetas a 845 °C durante 24 horas y a 705 °C durante 20 horas, no se observó la formación de carburos $M_{23}C_6$, pero sí se presentaron fisuras inducidas por IGSCC. En pruebas similares con un solo tratamiento de envejecimiento, se obtuvo una buena resistencia al IGSCC. Por lo tanto, se encontró que un rango de temperaturas de solubilización entre 1065 °C y 1095 °C optimiza la resistencia al IGSCC sin aumentar el tamaño de grano a un nivel que afecte la resistencia a la fatiga de la aleación.

El contenido de carbono es crítico para la resistencia al SCC. Concentraciones extremadamente bajas de carbono son perjudiciales, ya que se necesita para formar una red de carburos en los límites de grano. Otros elementos, como el azufre y el fósforo, tienen poca evidencia de afectar la susceptibilidad al SCC, mientras que el boro tiende a segregarse en los límites de grano para formar borocarburos, lo que mejora la resistencia al SCC [55] [63].

3.1.4 Evaluación de material de reemplazo para un tanque sedimentador

Con base en la limitada información proporcionada para realizar la asesoría sobre el reemplazo del material del tanque sedimentador, se sugieren distintas alternativas adecuadas.

En primer lugar se recomendó que se deberían analizar mejoras en el diseño del tanque y de la instalación circundante con el fin de garantizar que se puedan realizar trabajos de mantenimiento durante toda la vida útil del componente y que no sean estos trabajos acciones que afecten a la capa protectora del tanque (ya que se mencionó que en esas circunstancias se dañaba la pintura del tanque sedimentador). Por lo tanto, se recomendó que se tendría que analizar la posibilidad de re adaptar el tanque para mejorar las condiciones de operación, limpieza y mantenimiento. Una de las opciones posibles podría ser disminuir el tamaño del tanque o elevarlo del suelo para mejorar la operatividad.

A su vez se recomendó utilizar un sistema de contención secundaria para mitigar riesgos asociados a posibles derrames y filtraciones. Por otro lado, desde NASA mencionaron que el principal problema es que el tanque está en el piso, lugar que es más propenso a sufrir salpicaduras de ácido debido a su ubicación.

En base a esta información se recomendó a NASA analizar la posibilidad de elevar el tanque para alargar la vida útil del componente. Considerando que mejoras del diseño pueden disminuir considerablemente los costos en la construcción del tanque, ya que se podría utilizar un tanque con las mismas características (materiales utilizados) que el original instalado, lo que generaría una mayor vida útil para el tanque nuevo en relación con el anterior.

Como alternativa a no optar por realizar cambios de diseño se pueden utilizar diferentes materiales para el tanque nuevo. A continuación se mencionan los distintos tipos de materiales seleccionados aptos para la fabricación y operación de un tanque sedimentador nuevo.

3.1.4.1 Acero Inoxidable 316

Este material es óptimo para instalaciones con ácido sulfúrico, ya que puede resistir concentraciones del ácido que van desde el 20% hasta más del 85% a temperatura ambiente. Por esta razón, resulta ideal para su uso en tanques y recipientes. Se ha reportado que, al reemplazar cañerías

originales de acero al carbono por acero inoxidable 316, no sufrieron daños por corrosión incluso después de muchos años de uso, lo que garantiza una instalación más segura y duradera.

A continuación se expone la composición química, propiedades mecánicas y se habla de la susceptibilidad al ataque corrosivo por ácido sulfúrico.

Composición química

A continuación, en la Tabla 21, se expone la composición química del acero inoxidable AISI 316Ti [9].

| Elemento | % en peso |
|-----------|-------------------|
| Níquel | 10,0 - 14,0 |
| Cromo | 16,0 - 18,0 |
| Molibdeno | 2,0 - 3,0 |
| Silicio | 1,00 máx. |
| Manganeso | 2,00 máx. |
| Carbono | 0,08 máx. |
| Fósforo | 0,045 máx. |
| Azufre | 0,03 máx. |
| Nitrógeno | 0,10 máx. |
| Titanio | 5 x %(C+N) - 0,70 |
| Hierro | Bal |

Tabla 21: Composición química del acero inoxidable AISI 316Ti [9].

Propiedades mecánicas

A continuación se exponen las propiedades mecánicas mínimas que debe cumplir el acero inoxidable AISI 316Ti según la norma ASTM A240 [9].

| | |
|-----------------------------|---------|
| Resistencia a la tracción | 515 MPa |
| Tensión de fluencia | 205 MPa |
| Elongación a rotura (51 mm) | 40 % |

Tabla 22: Propiedades mecánicas del acero inoxidable AISI 316Ti [9].

Corrosión por ácido sulfúrico

Este acero brinda un servicio útil a temperatura ambiente en ácido sulfúrico de concentraciones inferiores al 20% y superiores al 85%, dentro de este rango se expone a un ataque rápido por corrosión, como se puede

apreciar en la Figura 59, en la misma se representan en curvas la iso-corrosión en función de la temperatura y la concentración del ácido [64].

A altas temperaturas, la velocidad de corrosión aumenta significativamente, lo que puede hacer que el material pierda su efectividad debido a la rápida degradación. Por ejemplo, a temperaturas de 38 °C, y con una dilución del 60% de ácido sulfúrico, la tasa de corrosión puede alcanzar alrededor de 5 mm/año. Esta velocidad de corrosión se considera alta y podría comprometer la integridad del material en poco tiempo.

Para evitar la corrosión en concentraciones intermedias de ácido sulfúrico, es importante aplicar medidas preventivas. Una solución eficaz consiste en aplicar una capa de pintura o recubrimiento en la superficie del material. Esta capa protectora actuará como una barrera que previene la corrosión en esas concentraciones específicas de dilución del ácido sulfúrico que pueda sufrir en la superficie debido a proyecciones o descuidos en las purgas del sistema.

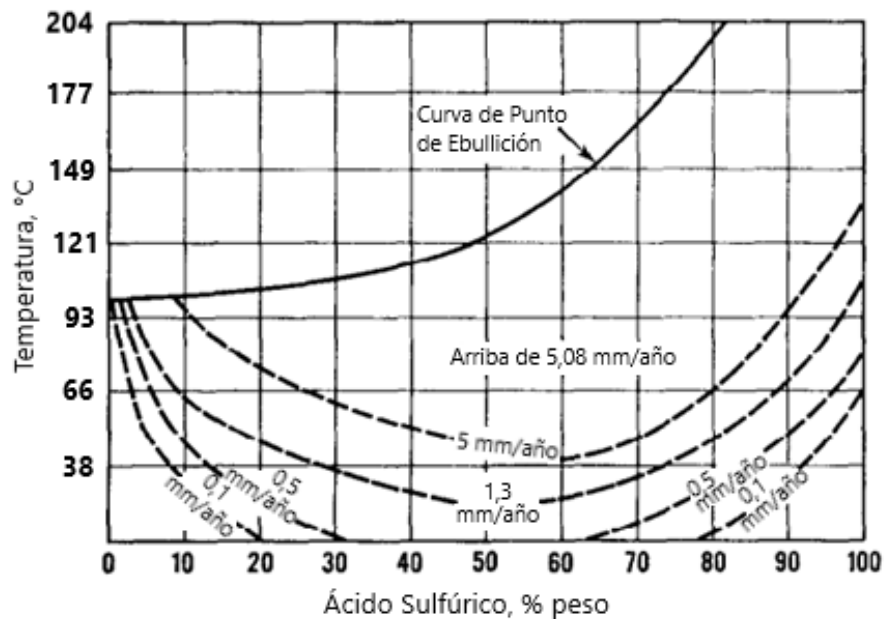


Figura 59: Iso-corrosión del Acero Inoxidable 316, por Ácido Sulfúrico a diferentes temperaturas y concentraciones [64].

3.1.4.3 Aleación 20

La Aleación 20 (UNS N08020) es una aleación austenítica con base de hierro que presenta una excelente resistencia a la corrosión en todo el rango de concentraciones de ácido sulfúrico [65].

Composición química y efecto de los aleantes

La composición química de la aleación 20 se presenta en la Tabla 23. Los elementos como el cromo, níquel, le dan una buena resistencia en medios oxidantes y reductores. Su alto contenido en níquel mejora las propiedades anticorrosivas. El molibdeno en las proporciones entre 2% y 3% permite obtener una buena resistencia al picado en medios de ácido sulfúrico. A su vez el cobre confiere una mayor resistencia a la corrosión en ácido sulfúrico, el mismo se encuentra en solución sólida y no representa un riesgo desde el punto de vista de la contaminación por cobre en la solución. El agregado de niobio para la estabilización que mejora su resistencia a la corrosión. Y el tantalio favorece la resistencia a la corrosión para que no se produzca sensibilización en el material [66].

| Elemento | % en peso |
|-------------------|--------------|
| Níquel | 32,0 - 38,0 |
| Cromo | 19,0 - 21,0 |
| Cobre | 3,0 - 4,0 |
| Molibdeno | 2,0 - 3,0 |
| Hierro | Bal |
| Carbón | 0,07 máx. |
| Niobio + Tantalio | 8 x %C - 1,0 |
| Manganeso | 2,0 máx. |
| Fósforo | 0,045 máx. |
| Azufre | 0,035 máx. |
| Silicio | 1,0 máx. |

Tabla 23: Composición química de la Aleación 20 [65].

Propiedades mecánicas

A continuación, en la Tabla 24, se expresan las propiedades mecánicas de la Aleación 20 [65].

| | |
|----------------------------|---------|
| Tensión de rotura | 620 MPa |
| Tensión de fluencia (0,2%) | 300 MPa |
| Elongación | 40 % |

Tabla 24: Propiedades mecánicas de la Aleación 20 a temperatura ambiente [65].

Corrosión por ácido sulfúrico

En la Figura 60, se exponen las curvas de tasas de iso-corrosión en función de la temperatura y la concentración de ácido sulfúrico. Estas curvas pueden desplazarse dependiendo de las condiciones específicas que se apliquen, los contaminantes en la solución generalmente tienen un efecto sobre la resistencia a la corrosión.

Los contaminantes pueden actuar como inhibidores, aceleradores o pueden no tener ningún efecto. Los inhibidores son generalmente agentes oxidantes tales como sulfato férrico, sulfato de cobre o ácido nítrico. La presencia de tan solo 0.02% (200 ppm) de sulfato férrico inhibe tan eficazmente la corrosión de la aleación 20 que las pérdidas pueden reducirse hasta 100 veces. Otros inhibidores muestran el mismo efecto pero no necesariamente en el mismo grado. El ácido clorhídrico y ciertos cloruros tienden a acelerar la velocidad de corrosión del ácido sulfúrico. Otros agentes reductores (no oxidantes) fuertes como el sulfuro de hidrógeno, el disulfuro de carbono o el dióxido de azufre también aumentarán la velocidad de corrosión en el ácido sulfúrico. El desairado de la solución también puede resultar en tasas de corrosión más altas en ácido sulfúrico [67]. Por lo que en las condiciones descritas por NASA, donde el ácido sulfúrico diluido en la superficie del tanque se expone al aire y, por lo tanto, al oxígeno, proporcionaría una mayor resistencia a la corrosión.

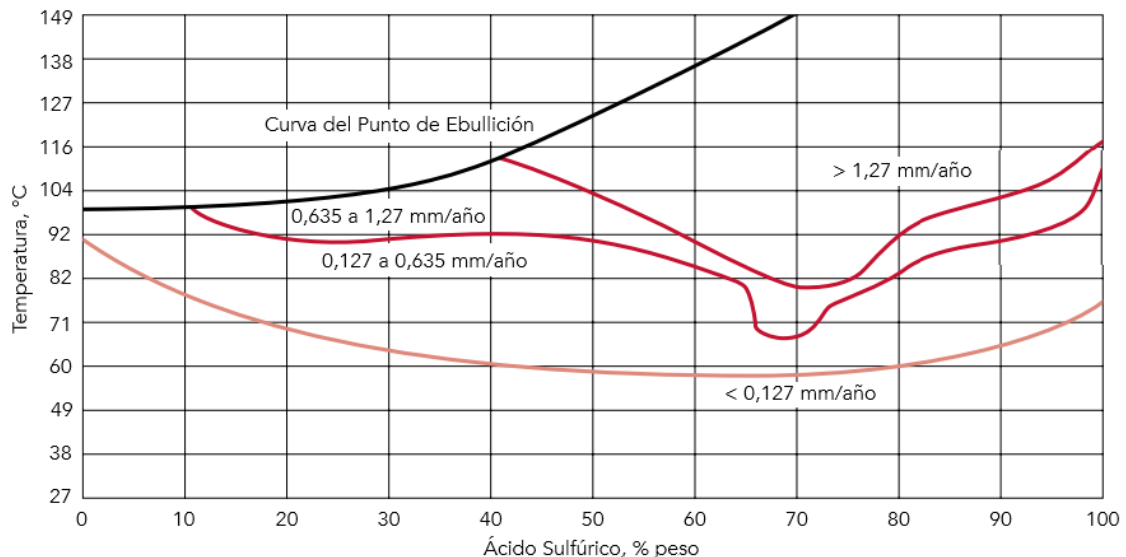


Figura 60: Iso-velocidades de corrosión en función de la temperatura y del porcentaje en peso de H_2SO_4 , para la Aleación 20 [66].

3.1.4.4 Polimérico

Se evaluó la viabilidad de construir el tanque utilizando materiales poliméricos como el polietileno (PE) o el polipropileno (PP), entre otros. Sin embargo, se encontraron investigaciones que desaconsejaban su uso en entornos corrosivos con concentraciones variables de ácido sulfúrico [68]. Estos estudios señalaron la presencia de procesos de envejecimiento en los termoplásticos bajo distintas condiciones de operación, especialmente la corrosión en este tipo de entorno. Además, dado que estos equipos a presión suelen ser empleados en condiciones complejas que combinan tensiones, oxígeno, altas temperaturas y medios corrosivos, se presenta un panorama aún más desafiante.

Estudios encontrados indican que el PP exhibía fracturas en un lapso extremadamente corto cuando se exponía a una alta concentración de ácido sulfúrico en combinación con tensiones de tracción [69]. De manera similar, otro estudio demostró que el policloruro de vinilo (PVC) también presentó fisuras en poco tiempo en un ensayo de tracción bajo altas concentraciones de ácido sulfúrico [70].

Adicionalmente, en una investigación descubrieron que las poliamidas, cuando son expuestas a condiciones húmedas, ácidos, álcalis o microorganismos, actúan como catalizadores en la hidrólisis del enlace amida. Esto provoca su ruptura, resultando en la fragmentación de la cadena polimérica [71].

Estos tipos de polímeros son frecuentemente empleados como revestimientos en industrias que operan en entornos corrosivos con ácido sulfúrico a distintas temperaturas. Sin embargo, han constatado que dicho revestimiento presenta deficiencias en su rendimiento a largo plazo. El estudio mencionado al comienzo señaló que el revestimiento de PE, sometido a distintas concentraciones de ácido sulfúrico durante intervalos variables, tanto a temperatura ambiente como a 70 °C, experimentó deterioro prolongado en situaciones de bajas concentraciones. Esto se tradujo en daños superficiales, posibles fugas del medio ácido y reducción de la resistencia.

En el estudio sugieren que este fenómeno puede estar relacionado con la recristalización inducida por concentraciones superiores al 50% de ácido sulfúrico, dado que se observaron alteraciones en la transparencia, así como un incremento en el punto de fusión (T_m), un aumento en la temperatura de descomposición y un fortalecimiento en la resistencia a la tracción. Con un aumento adicional en la concentración de ácido sulfúrico, detectaron un cambio en la estructura molecular a través de los espectros FTIR, con la aparición de grupos carbonilo y enlaces dobles continuos instaurados (C=C-

C=C) o enlaces triples. Estos cambios podrían ser resultado de procesos de deshidrogenación, oxidación o incluso ruptura de cadenas ocasionados por la alta concentración de ácido sulfúrico [68].

Un estudio adicional que analizó las propiedades mecánicas de PVC, PP y Polietileno de Alta Densidad (HDPE) en respuesta a la exposición al ácido sulfúrico reveló resultados significativos. El mismo observó que la resistencia a la tracción aumentó, mientras que la elongación en la ruptura disminuyó en comparación con las muestras no envejecidas, a medida que se incrementaba tanto el tiempo como la temperatura de exposición. Este fenómeno se lo atribuyen al aumento en la cristalinidad de los materiales y a un incremento en la densidad de reticulación provocado por la difusión del solvente en la matriz polimérica, además de factores térmicos y de exposición. Estos hallazgos demuestran una conexión directa entre la difusión del solvente, el aumento en el tiempo de exposición y la temperatura, y las propiedades mecánicas de los polímeros estudiados [72].

Cuando los polímeros se ven afectados por estos procesos, tienden a volverse más rígidos. Aunque esto podría interpretarse como una mejora en su capacidad para resistir tensiones sin deformarse significativamente, en realidad aumenta su vulnerabilidad a la fractura o fisuramiento cuando se someten a tensiones, debido a una distribución inhomogénea de la carga y una mayor concentración de tensiones en ciertas áreas del material. La reducción en la capacidad de elongación de los polímeros limita su flexibilidad. Esto significa que son menos capaces de deformarse sin romperse, lo que conlleva una disminución en su resistencia a los impactos.

Por otro lado, el fabricante de HMC Polymers indica que las resinas de PP se ven afectadas debido al Oleum (un producto que contiene ácido sulfúrico). Tanto el ácido sulfúrico al 98% a 100 °C como a 60 °C tienen un impacto significativo. Se advierte que bajo tensiones, podría ocurrir una falla en presencia de ácidos oxidantes fuertes a temperaturas inferiores a las mencionadas. Concentraciones al 98% provocan la formación de grietas en el PP. Además, han observado que la vida útil del PP a temperaturas elevadas se ve limitada por la degradación oxidativa.

Este informe revela que a una temperatura de 20 °C, el ácido no produce efectos adversos sobre el PP. Sin embargo, a una temperatura de 100 °C, el ácido afecta al polímero en todas sus concentraciones [73].

3.2 Resultados y Discusión

En esta sección se presentan los resultados obtenidos en los trabajos para NASA y la discusión de los mismos.

3.2.1 Evaluación de aptitud del material de insertos y discos para uso en el reactor nuclear Atucha II

En función del análisis basado en los datos proporcionados por el proveedor, revisión bibliográfica, especificaciones técnicas e interpretación de los códigos de construcción relacionados con el tema en cuestión, se realizó el análisis analítico utilizando métodos gráficos y cálculos aceptados por la comunidad internacional.

Los análisis gráficos, como el diagrama de Schaeffler, el diagrama de Delong, los diagramas de Suutala, el WRC-1992 y la ecuación de Aström, han arrojado resultados suficientes para determinar que el material en cuestión puede presentar hasta un 10% de ferrita delta, si el material en cuestión posee la máxima concentración de elementos alfégenos y mínima de elementos gamágenos. Contrariamente si el material presenta la mínima concentración de elementos alfégenos y máxima de gamágenos no presentaría de ningún modo la fase ferrítica delta, quedando muy lejos de que esto se logre debido a la alta influencia de los elementos gamágenos para solidificar en austenita.

Si se analizan los estudios teóricos realizados, la probabilidad que el material forme ferrita primaria como que forme austenita primaria es prácticamente la misma, lo cual genera una gran incertidumbre a la hora de realizar una evaluación sin conocer la composición exacta de los aceros involucrados.

Investigaciones consultadas han establecido un contenido mínimo de ferrita delta para evitar de daños por fisuración en caliente o sensibilización en estos materiales. Por ejemplo, la Comisión de Energía Atómica de Estados Unidos (AEC) [74] ha establecido que, para un procedimiento de calificación de soldadura, el metal depositado debe contener entre un 5% y un 12% de ferrita delta, y se deben utilizar los diagramas de Schaeffler o Delong para su control. También se requieren mediciones magnéticas para determinar el contenido de ferrita delta, controlar el calor aportado y realizar ensayos metalográficos para detectar fisuras. En los cordones soldados, se debe examinar el contenido de ferrita delta para verificar que

se cumpla con el rango de 3% a 12% de ferrita delta. Si no se cumplen los requisitos de ferrita delta en algún cordón, se deben realizar exámenes metalográficos para determinar la presencia de fisuras.

Además, se establece que cualquier material de soldadura que pueda sensibilizarse durante la soldadura o posteriormente debe ser del tipo L, a menos que contenga un mínimo del 5% de ferrita delta. Asimismo, cualquier material de soldadura expuesto a temperaturas de sensibilización debe someterse a ensayos de corrosión intergranular según ASTM A-262 [5], excepto si contiene más del 5% de ferrita delta o si es del tipo L y su permanencia en la zona de sensibilización (430-815 °C) es inferior a una hora [74].

Estas pautas establecidas por la AEC deberían formar parte del protocolo exigido para la fabricación de componentes de reemplazo en centrales nucleares, ya que garantizan la calidad, seguridad y vida útil del componente.

La investigación realizada por T Wegrzyn [75] determinó que para soldaduras que deben ser resistentes a la fractura durante la solidificación y la microfisuración, un contenido de ferrita delta de al menos 3-5% podría ser beneficioso. Sugiriendo que el contenido óptimo de ferrita delta en soldaduras está en el rango del 5% al 8% FN, aunque en algunos casos puede llegar hasta 11% FN. Determinando que un contenido de ferrita delta en el rango del 5% al 10% se considera beneficioso y facilita el proceso de soldadura en aceros inoxidable.

Otras investigaciones también mencionan que la cantidad necesaria de ferrita delta se sitúa entre el 6% y el 12%, ya que diferentes aleaciones con estas proporciones presentan una solidificación primaria de ferrita delta y son más resistentes a la formación de grietas en caliente en la zona de fusión. Se hace hincapié en que un rango del 5% al 10% proporciona una resistencia óptima a la formación de grietas en caliente [37].

El código ASME, en la Sección III, división 5, establece que la determinación de la ferrita delta debe realizarse en el material de soldadura, incluido el material insertable consumible, utilizando un instrumento de medición magnética o análisis químico en combinación con la figura WRC-1992. También se especifican estándares de aceptación para el contenido de ferrita delta, con un mínimo de 5% FN para temperaturas de diseño de hasta 425 °C y un rango de 3% FN a 10% FN para temperaturas de diseño superiores a 425 °C. Además, se establece que los resultados de la determinación de la ferrita delta deben incluirse en el Informe de Prueba de Material Certificado [17].

Por otro lado, analizando las micrografías enviadas por el proveedor KSB SE & Co a NASA se puede observar que no cumplen los valores requeridos, ya que son inferiores a los establecidos en la WS E 13.2 de la RE-L 5002 [36] y al recomendado en distintas fuentes bibliográficas. Además, se evidencia que el contenido de ferrita delta no es uniforme, ya que existen regiones con mayor y menor concentración. Es importante tener en cuenta que estas micrografías no son representativas de los 4 lotes.

Además el proveedor KSB SE & Co. no ha especificado el método utilizado en las micrografías para determinar el contenido de ferrita delta. En la micrografía de la Figura 52 se puede observar que el proveedor alega encontrar valores cercanos al 1% en sectores específicos de la probeta, lo cual es evidencia de que no se cumple con lo solicitado.

Debido a que el trabajo se llevó a cabo durante la pandemia, no fue posible acceder al material para llevarle a cabo los ensayos requeridos. En consecuencia, NASA solicitó al proveedor que llevara a cabo estos ensayos y proporcionara sus propios resultados. Sin embargo, el proveedor al no proporcionar información sobre la metodología utilizada para determinar la concentración de ferrita delta, no podemos asegurar fehacientemente que la cantidad cumple con los requisitos solicitados. Además, el proveedor admitió que está fuera del rango requerido según la especificación técnica, lo que hace que no sea posible aceptar el lote en cuestión ni los restantes.

3.2.2 Análisis comparativo de métodos para la elaboración de un nuevo procedimiento de transporte de materiales Clase C1

Resultados

A continuación, se detallan los resultados de cada sección: embalaje, transporte y almacenaje, para la redacción de la especificación técnica en base a la documentación y bibliografía consultada. Dicha especificación se elaboró con el propósito de establecer los criterios técnicos necesarios para el fin requerido, dejando a juicio del cliente la posibilidad de plantear requerimientos adicionales y las responsabilidades que correspondan a la integridad de los componentes en las distintas etapas establecidas.

3.2.2.1 Embalaje

Esta sección se formó a partir de dos capítulos inconexos de la especificación WS E 13.2 de la RE-L 5002 [36], incluyendo también las subsecciones del AVS E 10.2 [50]:

- Preservación: Aceros de baja aleación y no aleados; Aceros austeníticos y de alta aleación; Recubrimiento primario; Preparación de superficie; Recintos a prueba de vapor de agua; Uso de desecantes e indicadores de humedad; Materiales de embalaje.
- Paquete de envío: Estuches y cajones; Paquetes.
- Marcas o etiquetas de seguridad.
- Manipulación o manejo.

No se encontraron directrices de embalaje en el documento ASME III División 1 sección NB componentes Class 1 [51], ni en investigaciones o artículos académicos.

3.2.2.2 Transporte

Esta sección se formó a partir de dos capítulos inconexos de la especificación WS E 13.2 de la RE-L 5002 [36].

No se encontraron directrices de transporte en los documentos AVS E 10.2 [50], en el ASME III División 1 sección NB componentes Class 1 [51], ni en investigaciones o artículos académicos.

3.2.2.3 Almacenaje

Esta sección se formó de acuerdo a lo establecido en el AVS E 10.2 [50].

Adicionalmente se incluyó considerar las secciones: preservación, marcas y manipulación definidas en 3.2.2.1 Embalaje.

No se encontraron directrices de almacenaje en los documentos WS E 13.2 de la RE-L 5002 [36], en el ASME III División 1 sección NB componentes Class 1 [51], ni en investigaciones o artículos académicos.

Discusión

En respuesta a la solicitud de NASA de crear una nueva especificación técnica que tratará aspectos como el embalaje, transporte y almacenamiento de materiales de Clase C1, se llevó a cabo un análisis de los documentos WS E 13.2 de la RE-L 5002 [36], AVS E 10.2 [50] y ASME III División 1 sección NB componentes Class 1 [51]. Mediante este análisis, se identificaron los puntos relevantes en la RE-L 5002 y el AVS E 10.2, los cuales se incorporaron en la especificación técnica final. Sin embargo, se destacó la necesidad de investigaciones adicionales y de tratar los aspectos no cubiertos por la especificación.

La falta de información sobre ciertos aspectos, como el transporte según el ASME III División 1 sección NB componentes Class 1, resalta la importancia de realizar más investigaciones en estas áreas específicas. Estas investigaciones podrían proporcionar una base más sólida para el desarrollo de procedimientos de transporte y almacenamientos más efectivos y seguros para materiales Clase C1.

Además, la ausencia de directrices claras en áreas como el almacenamiento según el WS E 13.2 de la RE-L 5002, sugiere la necesidad de atender estas áreas de incertidumbre para garantizar la seguridad y eficacia en todas las etapas del proceso.

Por otro lado, es esencial considerar la incertidumbre que puede surgir al otorgar al cliente la capacidad de modificar aspectos críticos relacionados con el transporte, embalaje o almacenaje. Aunque la flexibilidad puede ser ventajosa para adaptarse a necesidades específicas, plantea interrogantes sobre la coherencia y uniformidad de los estándares de seguridad. Esta incertidumbre destaca la necesidad de establecer criterios claros y transparentes para la toma de decisiones en la modificación de la especificación técnica. Es fundamental garantizar que estas decisiones se basen en un análisis riguroso y en la evaluación de los posibles impactos en la integridad y seguridad de los materiales Clase C1 en todas las etapas del proceso.

3.2.3 Redacción de especificación técnica de aleaciones base níquel para componentes internos del reactor

Resultados

Desarrollo de la especificación técnica

A continuación, se detallan los requisitos mínimos establecidos en la nueva especificación técnica.

Materiales

- Bulones: Para la fabricación de bulones se utilizará el material NiCr₁₅Fe₇TiAl (DIN 2.4669) de acuerdo a la KTA 3204 [76].
- Resortes: Para la fabricación de resortes se utilizarán los materiales NiCr₁₅Fe₇TiAl (DIN 2.4669) UNS N07750 de acuerdo a ASME SB 637 [60] y NiCr₁₉Fe₁₉Nb₅Mo₃ (DIN 2.4668) de acuerdo a la KTA 3204 [76].

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

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.

El método de fabricación deberá ser acordado entre el Propietario y Fabricante previo al comienzo de los trabajos.

Condición superficial

Todas las áreas de acoplamiento deberán estar libres de desniveles que puedan perjudicar la calidad de la información esperada del examen. Se eliminarán las muescas, escamas sueltas, salpicaduras de soldadura, ranuras de mecanizado perturbadoras y otras imperfecciones que perjudiquen el acoplamiento.

La rugosidad de las superficies no especificadas en planos no debe exceder el valor: $R_a = 4 \mu\text{m}$ para piezas mecanizadas y $10 \mu\text{m}$ para superficies sin procesos adicionales.

Se deberá utilizar el punto 5 de la sección 6.1 de la RE-L 5002/E rev. C [36].

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.

Composición química

La composición química que deben cumplir los componentes fabricados de Inconel 718 y X-750 se presentan en las Tablas 25 y 26 respectivamente. Se deberá hacer un análisis de composición química por cada colada utilizando el procedimiento de ASTM 1473 [77].

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

Tabla 25: Composición química para la fabricación de los componentes de Inconel 718 [60][76].

| Componente | Resortes UNS N07750 ASME II-B SB-637/637 M | Bulones X-750 MTS A (1,2,3) 15,61 - 2 |
|-------------------|---|---|
| Elemento | % en peso | % en peso |
| Carbono | Máx. 0,08 | Máx. 0.08 |
| Manganeso | Máx. 1,00 | Máx. 0.35 |
| Silicio | Máx. 0,50 | Máx. 0.35 |
| Azufre | Máx. 0,01 | Máx. 0.010 |
| Fósforo | Máx. 0,008 | Máx. 0.015 |
| Cromo | 14,00 – 17,00 | 14.00 - 17.00 |
| Níquel | Min 70,00 | Min 70.00 |
| Cobalto | Máx. 1,00 | |
| 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 26: Composición química para la fabricación de resortes y bulones de Inconel X-750 [60][52].

* La concentración de cobalto no debe superar el 0,2% para componentes en contacto con el agua refrigerante.

Microestructura

Para la medición del tamaño de grano se debe emplear la norma ASTM E112 [78]. 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 [79].

Para los resortes que utilicen Inconel 718 y X-750, 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 [76][36].

Se recomienda mantener un control de la fase γ' en el material X-750 con el fin de asegurar que no supere los 30 nm [55].

Ensayos

Los ensayos y exámenes que deben pasar los componentes de acuerdo a las normas ASME SB 637 [60] y KTA 3204 [76] son los siguientes:

- Composición química
- Ensayo de tracción a temperatura ambiente y a 350 °C
- Ensayo de fatiga
- 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
- Identificación de materiales

- **Ensayos mecánicos**

En los ensayos para evaluar las propiedades mecánicas se deberá realizar un ensayo por cada lote. Siendo un lote un conjunto de componentes de una misma colada con igual tratamiento térmico y geometría.

- **Ensayo de dureza**

Se deberá realizar un mínimo de tres ensayos por lote de bulones de acuerdo a la norma ASTM E 92 [80]. 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:

- HR: 32 - 42
- HB: 305 - 400
- HV: 320 – 420

- **Ensayo de fatiga**

El ensayo de fatiga de debe realizar de acuerdo a la norma ASTM E 139 [81].

- **Ensayo de tracción**

Los ensayos de tracción deben ser realizados de acuerdo a la norma ASTM E8 [82]. 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 [76]. Los valores a ser determinados deben garantizar los que se presentan en las Tablas 27 y 28.

| Parámetros | Diámetro o espesor [mm] | R _{p0,2} [MPa] | R _m [MPa] | A % | Z % |
|------------|-------------------------|-------------------------|----------------------|------|------|
| X-750 | <60 | ≥ 790 | ≥ 1170 | ≥ 18 | ≥ 18 |
| | 60 -160 | ≥ 790 | ≥ 1170 | ≥ 15 | ≥ 15 |
| 718 | <60 | ≥ 1000 | ≥ 1240 | ≥ 12 | ≥ 15 |
| | 60 -160 | ≥ 1000 | ≥ 1200 | ≥ 6 | ≥ 8 |

Tabla 27: Valores que deben garantizarse en el ensayo de tracción longitudinal a los materiales Inconel 718 y X-750, con recocido de solubilización y endurecimiento por precipitación, de acuerdo a la norma KTA 3204 a temperatura ambiente [76].

| Parámetros | Diámetro o espesor [mm] | R _{p0,2} [MPa] | R _m [MPa] | A % | Z % |
|------------|-------------------------|-------------------------|----------------------|------|------|
| X-750 | <160 | ≥ 700 | ≥ 1050 | ≥ 16 | ≥ 16 |
| 718 | <60 | ≥ 830 | ≥ 960 | ≥ 12 | ≥ 15 |
| | 60 -160 | ≥ 800 | ≥ 930 | ≥ 6 | ≥ 8 |

Tabla 28: Valores que deben garantizarse en el ensayo de tracción longitudinal a los materiales Inconel X-750 y 718, con recocido de solubilización y endurecimiento por precipitación, de acuerdo a la norma KTA 3204 a temperatura de 350 °C [76].

- **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 RE-L 5002 [36] con respecto al tratamiento de superficies. En los lugares donde se pueda dar una evaluación ambigua se deberá realizar un ensayo de líquidos penetrantes [36].

- **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 RE-L 5002 [36] o según lo establecido en KTA 3204 [76].

- **Tintas penetrantes**

La rugosidad media, R_a , según se define en la RE-L 5002 de las superficies mecanizadas, no debe superar los 100 μm [36]. 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.

Para resortes helicoidales ubicados dentro del recipiente a presión, la KTA 3204 [76] establece que la superficie del 10% de los resortes deberá ser examinada por este método.

- **Determinación de la 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 380 / A 380M [16] 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.

- **Inspección visual**

Para resortes helicoidales ubicados dentro del recipiente a presión, la norma KTA 3204 [76] establece una inspección visual al 100% de los resortes.

Tratamientos termomecánicos

Los tratamientos termomecánicos recomendados para los pernos, bulones y resortes de Inconel X-750, así como para los resortes de Inconel 718, se basan en investigaciones previas (ver subsección 3.1.3.1 tratamientos termomecánicos). En las Tablas 29 y 30 se encuentran detallados dichos requerimientos para la aleación X-750 y en la Tabla 31 para la aleación 718.

| |
|----------------------------------|
| Tratamiento termomecánico |
|----------------------------------|

| Recocido | Endurecimiento por precipitación |
|---|--|
| Reducción del espesor 20% 1080 °C a 1120 °C Mantener durante 1 a 2 horas y enfriamiento rápido al agua o aceite | 705 °C Mantener por 20 horas y enfriamiento al aire |

Tabla 29: Tratamiento térmico recomendado para la fabricación de pernos y bulones de Inconel X-750 de acuerdo a ASME/ASTM B/SB-637 Tipo 3 [55][54][60].

| Tratamiento termomecánico | |
|---|---|
| Recocido | Endurecimiento por precipitación |
| 1095 °C a 1205 °C hasta homogeneizar Hasta 6,35 mm de espesor debe reducirse en frío un 50% a 65% De 6,35 a 15,88 mm se debe reducir en frío no menos del 30% | 650 °C ± 15 °C por 4 horas ± 15 minutos Enfriamiento al aire |

Tabla 30: Tratamiento térmico para alambres para resortes de Inconel X-750 de acuerdo a la especificación AMS 5699G [54][61][62].

| Tratamiento termomecánico | |
|---|---|
| Recocido | Endurecimiento por precipitación en 2 etapas |
| Entre 980 - 1010 °C Durante 1 horas ± 5 min | 720 ± 15 °C Mantener por 8 horas |
| 8-12-15% (*) de reducción de área por deformación en frío | Enfriar a 60 ± 10 °C/h hasta 620 ± 15 °C Mantener 10 horas y enfriar al aire |

Tabla 31: Tratamiento térmico para alambres para resortes de Inconel 718 de diámetros entre 0.4 mm y 15mm.

(*) Valor más alto para la dirección longitudinal, valor medio para la dirección transversal larga de las piezas forjadas y valor más bajo para la dirección transversal de las barras [55][76].

Resumen de los resultados de la especificación técnica

A continuación, se presenta un resumen en forma de tabla que resalta las modificaciones y adiciones realizadas a la normativa vigente para la fabricación de resortes y bulones utilizando los materiales Inconel X-750 y 718.

Dado que no se contaba con una especificación técnica del Inconel 718, se optó por integrarlo en la especificación técnica del Inconel X-750. Esta elección se fundamentó en la semejanza de su composición química, propiedades mecánicas finales y el propósito previsto para el material. En la tabla siguiente (Tabla 32), se detallan los cambios y añadidos aplicados, especificando aquellos requisitos que han sido modificados o incorporados de manera específica.

| Sección | Modificaciones y nuevas directrices | Fundamento de las decisiones |
|---------------------|---|---|
| Materiales | Adición de Inconel 718 para la fabricación de resortes. | Ampliar el alcance de la especificación. El mismo presenta mejor comportamiento frente a la relajación por irradiación y al IASCC. |
| Composición química | Modificación de la concentración de cobalto para Inconel 718 y X-750. | Cumplimiento de la KTA 3204. |
| Microestructura | Establecimiento del marco normativo. | Para la medición y determinación del tamaño de grano. |
| | Nuevo requerimiento. Tamaño de grano ASTM N° 5 o menor para resortes de Inconel 718 y X-750. | El tamaño de grano afecta directamente a la susceptibilidad al SCC. |
| | Nuevo requerimiento. Control de la fase γ' en el Inconel X-750. | Mejoramiento en la resistencia a la corrosión con tamaños de la fase γ' < 30 nm. |
| Ensayos | Se modificaron las normas de los ensayos de: contaminación ferrítica, dureza y ensayos de tracción. | Las pautas de ensayo conforme a las normativas ASTM fueron ajustadas con el objetivo de |

| | | |
|-----------------------------|---|---|
| | | asegurar la calidad de los componentes fabricados. |
| | Se establecieron los ensayos y las normas para evaluar: medición del tamaño de la microestructura, ensayo de fatiga, ultrasonido, tintas penetrantes e inspección visual. | Se agregaron ensayos bajo las normas ASTM y KTA para garantizar la calidad de los componentes fabricados. |
| | Se modificaron y agregaron valores mínimos que se deben cumplir en los ensayos de dureza y tracción, tanto a temperatura ambiente como a 350°C. | Se definen los valores con el objetivo de corroborar que el material cumple con las propiedades mecánicas que establece la norma. |
| Tratamientos termomecánicos | Se modificaron los tratamientos termomecánicos para el Inconel X-750. | La modificación de los tratamientos termomecánicos del X-750 se debió a la mejora en sus propiedades frente al SCC. |
| | Se establecieron tratamientos termomecánicos para el Inconel 718. | Se estableció el tratamiento termomecánico más adecuado para mitigar el SCC. |

Tabla 32: Resumen de las modificaciones y nuevas recomendaciones de la especificación técnica.

Discusión

Aleación 718

La evaluación llevada a cabo en la revisión bibliográfica (subsección 3.1.3) ha permitido identificar dos tipos de tratamientos térmicos recomendados para la fabricación de resortes: el AMS 5597 y el ASME SB 637 [60]. Estos tratamientos también son respaldados por el EPRI [55]. Sin embargo, debido a las fallas reportadas en el servicio debido al agrietamiento por SCC, tanto el reconocido fabricante Special Metals [53] como distintos fabricantes en el manual del EPRI [55] sugieren la modificación del tratamiento térmico ASME SB 637, restringiendo su rango de temperatura de recocido. Esta limitación de temperaturas le otorgó al material mejores propiedades, y desde entonces no se han reportado más fallas.

Ambos coinciden en la necesidad de imponer una limitación estricta en el tamaño de grano, que debe ser igual o menor a ASTM N°5 [53] [55], con el objetivo de prevenir problemas relacionados con el agrietamiento por corrosión bajo tensión y, en consecuencia, garantizar una resistencia adecuada a la fatiga.

Se establecieron los ensayos necesarios para evaluar sus propiedades mecánicas y posibles defectos de fabricación.

Limitar la concentración de cobalto ayuda a reducir el riesgo de liberación de radiación al entorno. Esto se debe a que, en caso de que la aleación entre en contacto con agua, iones de cobalto radiactivo, debido a su capacidad para absorber neutrones, podrían ser liberados al entorno.

Aleación X-750

Tras analizar la experiencia en servicio del material en condiciones internas en diversos reactores nucleares, se llevaron a cabo estudios para mejorar la resistencia del material al SCC. Estas mejoras se basaron en las recomendaciones de entidades expertas como la NRC (Comisión de Regulación Nuclear de Estados Unidos), el EPRI y el fabricante del material Special Metals.

Como resultado de estas investigaciones, se determinó que para la fabricación de pernos y bulones con Inconel X-750, era más adecuado reemplazar el tratamiento termomecánico por el tratamiento térmico ASME/ASTM B/SB-637 [55] [61] [54] [30]. Del mismo modo, para mejorar la calidad y el rendimiento de los resortes, se decidió reemplazar el tratamiento térmico anteriormente utilizado (AMS 5698 N°1) por el AMS 5699G [62]. Este cambio fue impulsado por las fallas observadas en los resortes de sujeción de ensamblajes de combustible, que se debieron a una combinación de fatiga y SCC [55] [61].

Similar a lo observado en la aleación 718, se ha informado que limitar el tamaño de grano a ASTM N°5 beneficia la prevención de problemas de agrietamiento por SCC y mejora la resistencia a la fatiga. También se recomienda mantener un tamaño de fase γ' por debajo de los 30 nm, ya que esto contribuye a una mayor resistencia a la corrosión [55].

Al igual que para el 718 se establecieron ensayos y otros fueron modificados para una evaluación más integral del material asegurando sus propiedades.

La limitación del cobalto también es importante en esta aleación para evitar la liberación de radiactividad al entorno.

3.2.4 Evaluación de material de reemplazo para un tanque sedimentador

Al analizar las tasas de corrosión de los materiales propuestos, se puede concluir lo siguiente: a una temperatura ambiente de aproximadamente 25 °C y con exposición a ácido sulfúrico diluido al 50%, se espera que el Acero AISI 316Ti experimente una velocidad de corrosión de alrededor de 1,3 mm/año. Por otro lado, la Aleación 20 exhibirá tasas de corrosión inferiores a 0,127 mm/año.

Si la concentración del ácido se mantiene constante pero la temperatura se eleva a 60 °C, la Aleación 20 mantendrá tasas de corrosión que no exceden los 0,127 mm/año. Sin embargo, en estas condiciones, el Acero Inoxidable AISI 316Ti mostrará una tasa de corrosión superior a 5 mm/año, lo cual resulta inaceptable para la instalación [64] [66].

Es importante tener en cuenta que una tasa superior a 1 mm/año se considera como crítica y suficiente como para considerar un cambio de material. Estas condiciones descritas son representativas de situaciones comunes, como aquellas descritas en las que el ácido se diluye y entra en contacto con la superficie del material debido a los procesos de purga diarios.

Por otro lado, se descartó el uso de un tanque polimérico debido a los resultados de los estudios evaluados. Estos estudios indican que cuando las temperaturas superan los 60 °C y se manejan concentraciones elevadas de ácido sulfúrico, el material polimérico se degrada, lo que puede provocar la formación de grietas, como lo informa HMC Polymers en relación al polipropileno [73].

Otro estudio considerado fue el llevado a cabo por Chongyang Liu y su equipo [68], en el que se investigó el comportamiento del polietileno bajo la influencia de ácido sulfúrico a diferentes concentraciones y temperaturas, tanto a temperatura ambiente como a 70 °C. Los resultados revelaron que el polietileno mostró un deterioro prolongado en condiciones de bajas concentraciones de ácido sulfúrico. Por lo tanto, se desaconseja el uso de este material para la fabricación de un nuevo tanque, y se deben tomar precauciones adicionales si se utiliza como recubrimiento.

3.3 Conclusiones parciales

3.3.1 Evaluación de aptitud del material de insertos y discos para uso en el reactor nuclear Atucha II

Basándonos en los hallazgos proporcionados por el proveedor, en los análisis analíticos realizados, en la bibliografía y en los códigos de construcción, se desaconseja enfáticamente la aceptación de los lotes JPW, EHZ, JMG y KFW de los componentes de insertos y discos de acero inoxidable DIN 1.4550 suministrados por KSB SE & Co. Esto se debe a varios factores críticos que comprometen su idoneidad y confiabilidad para su uso en un entorno de alta exigencia como el reactor nuclear de Atucha II.

En primer lugar, los materiales proporcionados no cumplen con los requisitos establecidos en la normativa WS E 13.2 de la RE-L 5002 [36] en términos de contenido mínimo de ferrita delta. El proveedor aseguró un porcentaje de ferrita delta entre 1% y 3%, mientras que el rango exigido es de 4% a 8%. Además, se observa que la distribución de ferrita delta en los materiales no es homogénea, con regiones que presentan una fracción en volumen variable. Esta falta de consistencia en la calidad del material plantea serias preocupaciones sobre su uniformidad y confiabilidad en condiciones de servicio rigurosas.

Es importante resaltar que el incumplimiento en el contenido de ferrita delta tiene consecuencias directas en la resistencia del material a la fisuración en caliente durante el proceso de soldadura. Siendo este un punto crítico a considerar, es relevante destacar que la metalografía proporcionada por el proveedor en la Figura 55 no muestra evidencia de fisuras o microfisuras causadas por la fisuración en caliente al someter el material al proceso de soldadura. No obstante, la falta de información detallada sobre el método utilizado por el proveedor para determinar el contenido de ferrita delta en las micrografías genera incertidumbre en cuanto a la metodología empleada y la confiabilidad de los resultados presentados.

Además, es crucial considerar la posible sensibilización del material durante el proceso de soldadura. Aunque el material posea menos del 5% de ferrita delta y no sea del tipo L, dado el corto tiempo de permanencia en la zona de sensibilización durante la soldadura, es poco probable que alcance el umbral de 1 hora establecido para la realización del ensayo de corrosión intergranular ASTM A-262 [5], según las recomendaciones de la AEC [74]. Sin embargo, si el tiempo de permanencia fuera mayor a 1 hora,

se recomienda realizar el ensayo para garantizar la seguridad del material y su resistencia a la corrosión.

Por otro lado se sabe que la temperatura del circuito de refrigeración se mantiene alrededor de los 300 °C, por lo que no existe el riesgo de precipitación de carburos $M_{23}C_6$ ya que estos precipitan entre 600 °C y 800 °C, los cuales desencadenarían en corrosión intergranular. Dado que no se puede garantizar que las válvulas del sistema de refrigeración no sufrirán sensibilización durante la soldadura, es fundamental realizar pruebas de corrosión intergranular para evaluar su resistencia.

Otro aspecto preocupante es la falta de información detallada sobre la criticidad de los componentes y cómo las tensiones aplicadas en servicio podrían afectar la propagación de posibles microfisuras generadas en las soldaduras. Esto podría reducir la vida útil de los componentes, lo que implica reparaciones y posibles paradas imprevistas que comprometerían la operatividad segura del reactor.

Tras realizar un estudio analítico utilizando métodos como lo son el diagrama de Schaeffler, el de Delong, los de Suutala, el WRC-1992 y la ecuación de Aström para evaluar el material, se ha determinado que el material en cuestión puede presentar dos escenarios totalmente opuestos. Si se considera una concentración máxima de elementos alfégenos y mínima de gamágenos, se han obtenido valores que oscilan entre el 4% y el 10% de ferrita delta primaria. Mientras que si se tiene una concentración mínima de elementos alfégenos y máxima de gamágenos, se puede obtener un material totalmente austenítico, lejos de formar algo de ferrita delta en su estructura. Estos análisis han arrojado una gran incertidumbre, ya que el material puede ser totalmente austenítico, o puede tener la concentración de ferrita delta primaria en el rango establecido por la especificación técnica. De todas formas los valores medios a dichos análisis se aproximan a un valor de 0% de ferrita delta. Lo cual no cumple con los requisitos establecidos ni con los criterios aceptables para su aplicación en un reactor nuclear.

En base a todas estas consideraciones, resulta evidente que no se recomienda aceptar los lotes de materiales suministrados debido a su incumplimiento de requisitos, inconsistencia en la calidad y falta de información precisa y transparente. Para garantizar la seguridad y confiabilidad en un entorno tan crítico como un reactor nuclear, es imperativo realizar una evaluación exhaustiva y buscar alternativas que cumplan con los estándares requeridos antes de tomar cualquier decisión de aceptación.

Finalmente, se sugiere considerar la viabilidad de sustituir el material actual por otro que satisfaga tanto el análisis analítico de ferrita delta

efectuado como las propiedades mecánicas necesarias para garantizar su óptimo desempeño en las condiciones de operación dentro del reactor nuclear.

3.3.2 Análisis comparativo de métodos para la elaboración de un nuevo procedimiento de transporte de materiales Clase C1

En respuesta a la solicitud de NASA de contar con una especificación técnica actualizada para el embalaje, transporte, preservación y almacenaje de materiales Clase C1, se realizaron análisis y comparaciones de los documentos existentes, como la WS E 13.2 de la RE-L 5002 [36] y el AVS E 10.2 [50], también se estudió el ASME III División 1 sección NB componentes Class 1 [51] e investigaciones y artículos académicos con el objetivo de desarrollar una especificación técnica (ET) que cumpliera con los requisitos mínimos para garantizar la integridad de los componentes.

Se identificaron componentes con características especiales que requieren requisitos adicionales en términos de uso, degradación, terminación superficial, ensayos, entre otros aspectos. Se dejó a criterio del cliente establecer criterios adicionales que superen los estándares establecidos en la ET, brindando flexibilidad en función de las necesidades específicas. Así como también que establezcan las responsabilidades que correspondan con garantizar que los componentes se mantengan íntegros durante las diferentes fases definidas.

La nueva especificación técnica desarrollada se presenta como una solución actualizada, que trata los desafíos y requisitos relacionados con el transporte de materiales Clase C1. Su aplicación proporcionará mayor seguridad, protección y preservación de los materiales durante todo el proceso de embalaje, transporte y almacenaje.

3.3.3 Redacción de especificación técnica de aleaciones base níquel para componentes internos del reactor

La revisión bibliográfica en códigos de construcción como ASME, ASTM, KTA, y la consulta de publicaciones del EPRI, NuScale, Special Metals, la Comisión Nuclear de Estados Unidos (NRC) y otras fuentes especializadas

ha proporcionado una base sólida de conocimiento para establecer criterios de diseño y mejorar los procesos de fabricación.

El enfoque en las aleaciones 718 y X-750 es de particular importancia debido a su amplia utilización en aplicaciones críticas dentro de reactores nucleares, como resortes y bulones, donde la resistencia mecánica, resistencia a la relajación y al SCC son características fundamentales para garantizar la seguridad y rendimiento a largo plazo.

La implementación de tratamientos térmicos adecuados, cuidadosamente establecidos con base en los resultados de investigaciones previas y en las normas establecidas, es esencial para optimizar la microestructura, las propiedades mecánicas y la resistencia a la corrosión bajo tensión de estos materiales. La microestructura de las aleaciones X-750 y 718, con sus carburos y precipitados finamente dispersos, juegan un papel fundamental en su desempeño, y se ha demostrado que un rango específico de temperaturas de solubilización garantiza la resistencia adecuada a la corrosión bajo tensión sin comprometer la resistencia a la fatiga.

La aleación 718 ha sido incorporada recientemente en la central nuclear Atucha I, a pesar de no estar contemplada en las especificaciones iniciales del reactor. El interés en su inclusión radica en su mayor resistencia a la relajación en comparación con el material X-750, esta información fue proporcionada por NASA, aunque no se halló bibliográficamente valores de relajación de tensión en ambientes de reactores. Esta decisión ha despertado un gran interés para la optimización de los materiales, con el objetivo de lograr un mayor rendimiento, eficiencia y vida útil en el reactor.

Es importante destacar que, a pesar de los avances y mejoras realizadas en estas aleaciones, se han identificado limitaciones y desafíos asociados con la irradiación, altas tensiones y posibles daños superficiales que deberán ser tratados para maximizar la resistencia y la durabilidad de los componentes internos críticos.

3.3.4 Evaluación de material de reemplazo para un tanque sedimentador

En respuesta a la solicitud de NASA, se han evaluado diversas soluciones que varían en costos según el nivel de criticidad determinado por el cliente.

En primer lugar, se ha recomendado la construcción de un tanque de menor diámetro u otras dimensiones, manteniendo el material original y su protección polimérica. Esto permitiría elevarlo desde el suelo y simplificaría

las labores de limpieza. Esta alternativa puede llevarse a cabo con costos reducidos, ya que el material en cuestión es un acero al carbono con recubrimiento de polietileno para salvaguardarlo de posibles salpicaduras. No obstante, se señala que esta protección no garantiza la resistencia del material al ácido sulfúrico a largo plazo, lo que podría ocasionar daños futuros y corrosión en el acero al carbono. Por lo tanto, esta solución presenta ciertas limitaciones.

En caso de que la reducción de tamaño y elevación no sean viables, se han propuesto tres tipos de materiales inoxidable. Dos de estos materiales presentan una excelente resistencia a la corrosión en todas las concentraciones de ácido sulfúrico. Sin embargo, es importante mencionar que estas aleaciones tienden a ser costosas, lo que resultaría en un aumento significativo en el costo de fabricación del tanque.

El primer acero inoxidable a considerar es el tipo AISI 316Ti, que ya ha sido empleado por NASA como reemplazo en tuberías originales y ha demostrado un excelente rendimiento en servicio. No obstante, es necesario tener en cuenta que estos componentes no están expuestos al ácido sulfúrico diluido proyectado desde el exterior, lo que hace que el material no sea idóneo para soportar estas condiciones. El apartado de resultados 4.4.5 indica que, en situaciones de ácido diluido y temperaturas normales de operación, se observan tasas de corrosión superiores a 1 mm/año, lo cual no es aceptable para esta aplicación.

Continuando con el análisis de los resultados, tanto el Durimet 20 como la Aleación 20 presentan tasas de corrosión inferiores al 0,13 mm/año en condiciones de ácido sulfúrico diluido y temperaturas normales de operación. Estas tasas de corrosión son adecuadas para garantizar la integridad del componente a lo largo de su vida útil.

Por otro lado, se ha descartado la opción de un tanque polimérico debido a varias circunstancias. Investigaciones previas han demostrado que los polímeros expuestos a concentraciones de ácido sulfúrico a temperaturas elevadas experimentan recristalización, ruptura de cadenas y otros efectos que debilitan el material, tanto en términos estructurales como de recubrimiento. Además, no se dispone de información precisa sobre las temperaturas y presiones a las que se someterá el tanque, lo que hace que no sea seguro utilizar un tanque de plástico en condiciones de alta presión. Se ha observado que estos polímeros presentan degradación a una temperatura normal de operación, como los 60 °C.

A raíz del estudio realizado, se ha excluido la posibilidad de utilizar materiales poliméricos para la fabricación del tanque. Asimismo, la reproducción de un tanque con las mismas características y materiales que

el original no es una solución viable, ya que los problemas existentes se repetirían. El empleo del acero inoxidable tipo 316 podría resultar beneficioso desde diferentes perspectivas, siempre y cuando se le aplique un recubrimiento de pintura y se eleve el tanque para asegurar la remoción adecuada de cualquier ácido salpicado sobre dicha protección polimérica.

Concluyendo el análisis, se recomienda enfáticamente la elección de los materiales Durimet 20 y Aleación 20, debido a su comprobada capacidad para resistir eficazmente todas las concentraciones de ácido sulfúrico.

4. Conclusiones finales

A continuación se desarrollan las conclusiones finales de los trabajos realizados para el proyecto CAREM25 y para Nucleoeléctrica Argentina S.A.

4.1 Conclusiones de la Inspección de Fabricación y Asesoramiento Técnico al Proyecto CAREM25

Para la revisión de los registros y la validación de los tubos del generador de vapor en el proyecto CAREM25. Se confirmó la conformidad con los requisitos especificados y se documentaron los resultados en un informe detallado de inspección. Se identificó una situación relacionada con la certificación vencida de un técnico, lo que puede afectar la precisión de ciertos resultados.

En la calificación del procedimiento de soldadura, el estudio ha proporcionado un análisis de los procedimientos de soldadura adecuados para las uniones que vinculan la obra civil de los soportes de las piletas de contención del proyecto CAREM25. Mediante el uso del diagrama de Schaeffler, y conociendo con precisión la composición química del acero en cuestión, podría ser un buen indicador para estimar analíticamente si el material presentará tendencia a la sensitización. La consideración de tratamientos térmicos post-soldadura, ha establecido que es factible realizar estas uniones, sin riesgo de sufrir daños, con el debido control de la dilución de los materiales, el cumplimiento riguroso de los parámetros de soldadura y los requisitos de ensayos. Pero es esencial destacar que mantener la dilución dentro de los rangos recomendados es sustancial para garantizar la integridad y la durabilidad de las uniones soldadas, minimizando los posibles daños que pueda sufrir el componente en el proceso de soldadura. Además,

se subraya la importancia de llevar a cabo ensayos específicos para evaluar la presencia de corrosión intergranular y la precipitación de carburos de cromo, como el ASTM A262 Práctica A.

En base a los resultados obtenidos de las inspecciones realizadas en el proyecto CAREM25, se han identificado varios desafíos y áreas de mejora significativas. Estos hallazgos resaltan la importancia crítica de mantener estándares rigurosos de calidad y cumplimiento de procedimientos en todas las etapas de fabricación y montaje. Se observaron deficiencias, como la falta de cumplimiento de parámetros de soldadura y deficiencias en la documentación, lo cual subraya la necesidad de una supervisión. Además, se enfatiza la relevancia de realizar ensayos no destructivos y prácticas de validación, como la construcción de Mockups, para garantizar la eficacia de los procesos de reparación propuestos. Es esencial mantener una constante evaluación de la calidad de las uniones soldadas para prevenir posibles fallos prematuros y asegurar la integridad estructural de los componentes del proyecto. Se recomienda una revisión de los procedimientos y una mayor atención a los estándares establecidos, así como una respuesta proactiva ante los problemas identificados.

Tras un análisis de los métodos disponibles para tratar las irregularidades en la superficie del Módulo 1 del CAREM, se determina que la técnica de recargue de material mediante el proceso de SMAW se presenta como la elección más apropiada y justificada. Esta conclusión se sustenta en varios aspectos fundamentales. En primer lugar, se consideró la concordancia entre las propiedades mecánicas del material de recargue y las del material base. Asimismo, se considera la importancia de la selección adecuada de parámetros de soldadura y prácticas de soldadura apropiadas para controlar las tensiones residuales y minimizar el riesgo de fisuración. Además, el historial de éxito en variedad de aplicaciones garantiza la conformidad con las normativas y estándares nucleares. Por último, se reconoce la eficiencia operativa del proceso SMAW en términos de costos y tiempo, lo que contribuye a la viabilidad y rentabilidad del proyecto.

4.2 Conclusiones del Asesoramiento Técnico a Nucleoeléctrica Argentina S.A. (NASA)

La evaluación del acero inoxidable DIN 1.4550 para la fabricación de insertos y discos suministrados por KSB SE & Co para su uso en el reactor nuclear Atucha II, reveló que no cumplen con los requisitos mínimos de contenido de ferrita delta según los estándares establecidos, lo cual plantea

preocupaciones sobre su idoneidad y confiabilidad en condiciones de servicio. La heterogeneidad en la microestructura del material, evidenciada por la distribución no uniforme de ferrita delta, y la falta de transparencia en la metodología utilizada para determinar el contenido de ferrita delta en las micrografías, generan incertidumbre adicional sobre la confiabilidad de los resultados presentados. Además, se observa una discrepancia entre los valores reportados y los establecidos en la especificación técnica de compra, lo que indica una inadecuación del material para su uso en aplicaciones críticas como un reactor nuclear. Por lo tanto, se recomienda realizar un análisis exhaustivo de la composición de la colada como paso previo a los estudios analíticos que predicen la microestructura, con el fin de garantizar una evaluación más precisa y confiable del material. En consecuencia, se desaconseja enfáticamente la aceptación de los lotes de los materiales analizados, y se sugiere considerar la viabilidad de sustituir el material actual por otro que cumpla con los estándares requeridos para garantizar la seguridad y confiabilidad en un entorno tan crítico como un reactor nuclear.

En el trabajo de los materiales clase C1, el análisis de las normativas existentes y la investigación complementaria logró una especificación que trata aspectos clave, como embalaje, transporte, preservación y almacenaje. La identificación de desafíos en la claridad y uniformidad de los estándares señala la importancia de futuras investigaciones. Es esencial que se profundice en estas áreas específicas, ya que en el ASME III División 1 sección NB componentes Class 1 no se tienen en cuenta estos aspectos, ni se han hallado investigaciones al respecto. Se subraya la necesidad continua de evaluar y actualizar las normativas y procedimientos, garantizando así un manejo seguro y eficiente de los materiales Clase C1 en el ámbito nuclear.

La investigación de materiales base níquel para internos del reactor ha conducido a importantes modificaciones y adiciones en la especificación técnica para la fabricación de resortes y bulones en aplicaciones nucleares utilizando las aleaciones Inconel X-750 y 718. La inclusión del Inconel 718 ha ampliado el alcance de la especificación, mejorando la resistencia a la relajación por irradiación y al IASCC en dichos componentes. Se han realizado ajustes en la composición química para cumplir con estándares específicos, mientras que nuevas directrices se han establecido para la microestructura, incluyendo el control del tamaño de grano y la fase γ' , con el fin de mejorar la resistencia a la corrosión y la susceptibilidad al SCC. Los ensayos han sido modificados y ampliados para garantizar la calidad de los componentes, mientras que los tratamientos termomecánicos se han modificado o refinado para mitigar desafíos relacionados con la irradiación y mejorar la resistencia al SCC.

En la investigación del tanque sedimentador, se evaluaron diversas alternativas para el reemplazo del material, teniendo en cuenta factores como la resistencia a la corrosión, los costos y la viabilidad técnica. Tras un análisis de las propiedades de los materiales disponibles, se concluye que la Aleación 20 y el Durimet 20 son las opciones más adecuadas debido a su excelente resistencia a la corrosión en todas las concentraciones de ácido sulfúrico a temperatura ambiente e incluso a altas temperaturas. Además, se subraya la importancia de considerar mejoras en el diseño del tanque, tales como la reducción de tamaño o su elevación desde el suelo, para mejorar la operatividad y facilitar las labores de mantenimiento. Se recomienda la aplicación de recubrimientos protectores para garantizar la durabilidad del tanque, a pesar de la eventual degradación de los materiales poliméricos. Se descartó el uso de polímeros debido a su vulnerabilidad a la degradación en condiciones de alta temperatura y concentración de ácido. Aunque el acero inoxidable tipo AISI 316Ti ofrece cierta resistencia, su desempeño en ácido diluido y temperaturas normales de operación resulta insuficiente para esta aplicación.

5. Anexo

5.1 Códigos, normas y especificaciones técnicas citadas

- ASME BPVC Section II Part B SB-637 / SB-637M: Standard Specification for Precipitation-Hardening Nickel Alloy Bars, Forgings, and Forging Stock for High-Temperature Service [60].

Norma técnica donde se especifican los requisitos para la aleación de níquel X-750, estableciendo las propiedades mecánicas, químicas y metalúrgicas requeridas para la fabricación de componentes para reactores nucleares.

- ASME BPVS Section II Part D, Properties (Customary). 2017 [23].

Sección de ASME donde se establecen las propiedades mecánicas de materiales fabricados según códigos distintos al ASME.

- ASME BPVC Section III Division 2, Code for Concrete Containments. 2017 [17].

Sección de ASME que presenta las normas para los materiales, diseño, fabricación, construcción, examen, ensayo y preparación de informes relacionados con las contenciones de hormigón armado.

- ASME BPVC Section IX, Qualification Standard for Welding, Brazing, and Fusing Procedures; Welders; Brazers; and Welding, Brazing, and Fusing Operators. 2017 [3].

El alcance de este código comprende las normas relacionadas con la calificación de procedimientos de soldadura y fusión requeridos por otras secciones del BPVC (Código de Calderas y Recipientes a Presión) para la fabricación de componentes utilizados en la industria nuclear.

- ASTM A 380M. Standard Practice for Cleaning, Descaling, and Passivation of Stainless Steel Parts, Equipment, and Systems 2017 [16].

Esta norma se aplica en la fabricación de componentes de acero inoxidable con el objetivo de garantizar que las superficies estén completamente libres de contaminación ferrítica, es decir, se busca evitar la presencia de cualquier tipo de contaminante de origen ferrítico en dichas superficies.

- ASTM A262. American Society for Testing and Materials. 2015 [5].

Especificación estándar de prácticas para detectar la susceptibilidad al ataque intergranular en aceros inoxidable austeníticos.

- ASME BPVC Section IIA-2 Ferrous Material Specifications (SA-451 to End). 2017 [21].

Especificación estándar para placas de acero aleado, templado y revenido de alta resistencia utilizada en la fabricación de recipientes a presión soldados.

- ASTM A 36. American Society for Testing and Materials. 2015 [11].

Especificación estándar para acero al carbono de calidad estructural utilizado en la construcción de estructuras generales.

- ASTM E 8 Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. 2016 [82].

Norma técnica que especifica el método estándar para realizar ensayos de tracción uniaxial en materiales metálicos.

- ASTM E 92. Standard Test Methods for Vickers Hardness and Knoop Hardness of Metallic Materials. 2017 [80].

Norma técnica que especifica el método de prueba estándar para determinar la dureza por la prueba de microindentación de Vickers.

- ASTM E 112 Standard Test Methods for Determining Average Grain Size. 2000 [78].

Esta norma técnica establece las pautas para la determinación del tamaño de grano de materiales metálicos mediante el análisis metalográfico.

- ASTM E 139. Standard Test Methods for Conducting Creep, Creep-rupture, and Stress-rupture Tests of Metallic Materials. 2010 [81].

Norma técnica que especifica los métodos de prueba estándar para ensayos de fluencia, ruptura por fluencia y ruptura por carga constante.

- ASTM E 1181- Standard Test Methods for Characterizing Duplex Grain Sizes. 2002 [79].

Esta norma se utiliza para establecer el procedimiento específico que debe seguirse cuando se observa una variación de tamaño de grano en una micrografía de un material.

- ASTM E 1473 Standard Test Methods for Chemical Analysis of Nickel, Cobalt, and High Temperature Alloys [77].

Esta norma establece pruebas y evaluaciones precisas de la composición química para la aleación 718.

- AVS E 10.2 Rev.15C – “Preservation, Shipping Package, Markings, Handling, Storage” [50].

Especificación aplicada a corto plazo a la conservación, embalaje, transporte, marcado, manipulación y almacenamiento de componentes de importación para Atucha II.

- EPRI - Electric Power Research Institute, Materials Handbook for Nuclear Plant Pressure. 2015 [55].

Manual o guía de referencia destinado a proporcionar información detallada sobre materiales y componentes críticos utilizados en plantas nucleares.

- ET-CAREM25M-13-r1 Especificación Técnica para los tubos de los generadores de vapor [4].

La especificación técnica del generador de vapor del reactor CAREM25 establece los requisitos y las técnicas aplicables a los tubos utilizados en dicho generador. Esta especificación define los estándares y directrices para el diseño, fabricación, inspección y pruebas de los tubos, con el objetivo de garantizar su rendimiento óptimo y la seguridad en el funcionamiento del reactor.

- KTA 3204. Reactor pressure vessel internals. (2017-11) [76].

Normativa que establece directrices y requisitos para el diseño y construcción de los componentes internos del recipiente a presión en reactores nucleares.

- MTS A (1,2,3) - 15.61 – 2 Material Test Sheet; Cup-springs and spherical springs of precipitation hardenable Nickel-base alloy (Inconel X-750) (1982) [52].

Especificación de material que establece las directrices y requisitos fundamentales para la fabricación de componentes en base a la aleación X-750 destinados a los internos del reactor Atucha II.

- SIEMENS AG. Specification No.: RE-L 5002/E. Latest current version. "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 Accessories" [36].

Especificación técnica que establece los lineamientos para las condiciones de diseño, fabricación, transporte, ensayos y otros aspectos relacionados con los componentes utilizados en la central nuclear de Atucha II.

- WS E 14.2 / 15 A – A precipitation-hardenable, nickel-based alloy of composition NiCr₁₅Fe₇TiAl (Inconel X-750) for nuclear power plant components within the component group RPV internals [83].

Especificación de material de aleación X-750 para fabricación de componentes internos del recipiente de presión de vapor para Atucha II.

5.2 Ensayos para la determinación de corrosión intergranular

En la subsección 2.1.2 se hace referencia a la norma ASTM A 262 [5], la cual establece prácticas estándar para evaluar la susceptibilidad al ataque intergranular en aceros inoxidable austeníticos. Esta norma contempla un total de 5 prácticas, pero en este caso se mencionarán únicamente las prácticas A y E, ya que son las que se utilizan específicamente en la tesis.

- ASTM A 262 Práctica A: Esta práctica de ensayo con ácido oxálico se utiliza para la evaluación cualitativa de la susceptibilidad al ataque intergranular en materiales de acero inoxidable austenítico. No se utiliza como método cuantitativo ni para el rechazo del material. El procedimiento implica la preparación de una muestra representativa del material, que incluye el corte adecuado con sierra y el pulido de la superficie a ensayar. A continuación, se introduce la muestra en una solución de ácido oxálico bajo circulación de corriente. Posteriormente, se examina la superficie de la muestra utilizando un microscopio metalúrgico y se evalúa la presencia de fases de carburos de cromo de acuerdo con la microestructura correspondiente [5].
- ASTM A 262 Práctica E: Esta práctica utiliza una solución de cobre-sulfato de cobre-ácido sulfúrico al 16% para determinar la susceptibilidad al ataque intergranular en aceros inoxidable austeníticos, específicamente asociado a la precipitación de carburos ricos en cromo. Sin embargo, no detecta la susceptibilidad

relacionada con la fase sigma. Es importante tener en cuenta que la presencia o ausencia de corrosión intergranular en este ensayo no necesariamente refleja el comportamiento del material en otros entornos corrosivos, y no proporciona una base para predecir la resistencia a otras formas de corrosión. Esta práctica se utiliza para evaluar el tratamiento térmico aplicado al material y también puede evaluar la eficacia de los elementos estabilizantes añadidos, como el niobio (Nb) y el titanio (Ti), entre otros. Este ensayo a diferencia del anterior (práctica A) si puede ser utilizado para el rechazo de un material.

El ensayo se realiza utilizando una muestra de acero inoxidable austenítico que se coloca junto con granallas de cobre. Esta combinación se expone a una solución en ebullición de sulfato de cobre acidificado durante un período de 15 horas, como lo especifica la norma. Sin embargo, para ciertas categorías de aceros inoxidables austeníticos con bajo contenido de carbono y aceros estabilizados, se requiere un tratamiento térmico de sensibilización a temperaturas de 650 a 675 °C antes de la prueba. Este tratamiento térmico tiene como objetivo evaluar la susceptibilidad del material a la corrosión intergranular inducida por la precipitación de carburos ricos en cromo. Después de la exposición a la solución en ebullición y el tratamiento térmico, la muestra se somete a una prueba de flexión. La aparición de agrietamiento o cuarteamiento intergranular en la muestra es un indicativo de su susceptibilidad al ataque intergranular [5].

5.3 Diagrama de Schaeffler con regiones susceptibles a distintos daños en función de la composición

El siguiente diagrama de Schaeffler, obtenido de manera empírica, permite predecir la estructura resultante del metal de soldadura, en función de la composición de los materiales base y de aporte, obtenido en la unión de aceros inoxidables disímiles, o de aceros inoxidables con aceros al carbono, con o sin aleación.

Adicionalmente se indican problemas (sombreado en color en Figura 61) que presentan determinadas estructuras al soldar dependiendo de su ubicación en el diagrama, que pueden evitarse al seleccionar adecuadamente el metal de aporte y el procedimiento de soldadura.

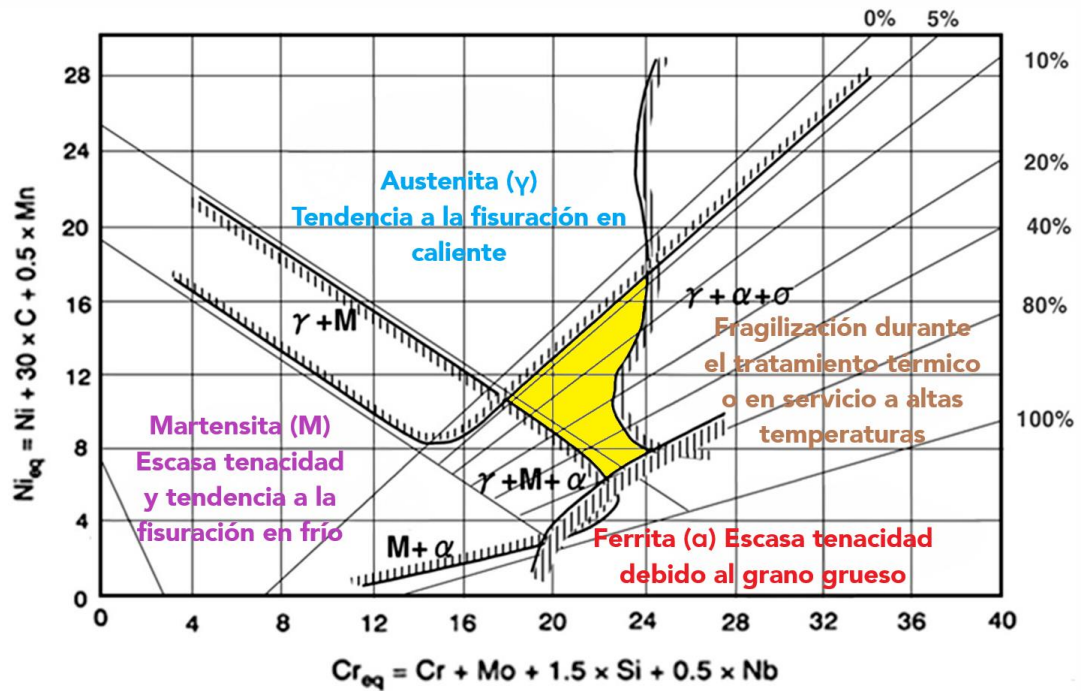


Figura 61: Diagrama de Schaeffler coloreado con las regiones susceptibles a daños por tratamientos térmicos [13][14].

- A: Austenita γ .
- F: Ferrita α .
- M: Martensita.
- 5-80%: Porcentaje en masa de ferrita en austenita.

Zonas de riesgo:

- Celeste: Fisuración en caliente por encima de los 1250 °C.
- Violeta: Fragilización por temple por debajo de los 400 °C.
- Marrón: Fragilidad por transformación de fase alfa a sigma ($\alpha \rightarrow \sigma$) entre 500 – 900 °C.
- Rojo: Fragilización por crecimiento de granos (α) por encima de los 1150 °C.
- Amarillo: Zona ideal, no susceptibles a los daños mencionados.

5.4 Glosario

AEC: Comisión de Energía Atómica de Estados Unidos.

AF: Austenita-Ferrita.

AH: Aged Hardened. Endurecimiento por envejecido.

AISI: American Iron and Steel Institute. Instituto Americano del Hierro y del Acero.

AMS: Aerospace Materials Specifications. Especificaciones de Materiales Aeroespaciales.

ASME: American Society of Mechanical Engineers. Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos.

ASTM: American Society for Testing and Materials. Sociedad Americana de Ensayos y Materiales.

B&W: Babcock & Wilcox Company.

BWR: Boiling Water Reactor. Reactor de Agua en Ebullición.

C1: Componentes sujetos a altas temperaturas, y todo componente que forma parte del sistema de refrigeración del núcleo.

CNA I: Central Nuclear Atucha I.

CNA II: Central Nuclear Atucha II.

CNEA: Comisión Nacional de Energía Atómica.

CONUAR: Combustibles Nucleares Argentinos Sociedad Anónima.

DL-EPR: Double Loop Electron Paramagnetic Resonance. Resonancia Paramagnética Electrónica de Doble Bucle.

EDM: Electrical Discharge Machining. Electroerosión por Descarga Eléctrica.

EIS: Electrochemical Impedance Spectroscopy. Espectroscopia de impedancia electroquímica.

END: Ensayos No Destructivos.

EPR: Caucho de etileno-propileno.

EPRI: Electric Power Research Institute. Instituto de Investigación de la Energía Eléctrica.

EPTR: Caucho de terpolímero de etileno propileno.

ESAB: Electric Welding and Cutting Ltd.

ET: Especificación Técnica.

FA: Ferrita-Austenita.

FCC: Face Centered Cubic. Cúbica Centrada en las Caras.

FN: Número de Ferrita.

FTIR: Fourier Transform Infrared Spectroscopy. Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier.

GAEN: Gerencia de Área Energía Nuclear.

GIIMC: Grupo de Inspección e Ingeniería de Materiales y Componentes.

GMAW: Gas Metal Arc Welding. Soldadura por arco metálico con gas.

GTAW: Gas Tungsten Arc Welding. Soldadura por arco de gas tungsteno.

HD: History Docket. Historial.

HDPE: High-Density Polyethylene. Polietileno de alta densidad.

HTH: High-Temperature Heat Treated. Tratado Térmicamente a Alta Temperatura.

IASCC: Irradiation Assisted Stress Corrosion Cracking. Fisuración por Corrosión bajo Tensión Asistida por Irradiación.

IGSCC: Intergranular Stress Corrosion Cracking. Fisuración por Corrosión bajo Tensión Intergranular.

IRAM: Instituto Argentino de Normalización y Certificación.

KTA: Nuclear Safety Standards Commission. Comisión sobre Normas de Seguridad Nuclear.

LWR: Light Water Reactor. Reactor de Agua Liviana.

MPY: Mil Per Year. Milésimas de pulgada por año.

NASA: Nucleoeléctrica Argentina Sociedad Anónima.

NBR: Nitrile Butadiene Rubber. Caucho Nitrilo-Butadieno.

NRC: Nuclear Regulatory Commission. Comisión de Regulación Nuclear de Estados Unidos.

OIEA: Organización Internacional de Energía Atómica.

P1: Acero al Carbono.

P8: Acero Austenítico.

PE: Polietileno.

PFC: Programa de Fabricación y Control.

PP: Polipropileno.

PVC: Policloruro de vinilo.

PWR: Pressurized Water Reactor. Reactor de agua a presión.

PWSCC: Primary Water Stress Corrosion Cracking. Fisuración por Corrosión bajo Tensión del Agua Primaria.

QA: Quality Assurance. Garantía de calidad.

QW: Qualification Welding. Calificación Soldadura.

Rz: Profundidad media de rugosidad según DIN 4768.

Sa: Grado de limpieza de superficie según estándar ISO 8501-1.

SBR: Caucho de estireno-butadieno.

SCC: Stress Corrosion Cracking. Fisuración por Corrosión Bajo Tensión.

SMR: Small Modular Reactor. Reactor Nuclear Pequeño.

SMAW: Shielded Metal Arc Welding. Soldadura de arco con electrodo revestido.

TCI: Anillo interno al Módulo 10.

TCE: Anillo externo al Módulo 10.

TEM: Transmission Electron Microscopy. Microscopía electrónica de transmisión.

Tm: Temperatura de transición vítrea.

UNS: Unified Numbering System. Sistema de Numeración Unificado.

VCI: Volatile Corrosion Inhibitor. Inhibidor de corrosión volátil.

WPS: Welding Procedure Specification. Especificación del procedimiento de soldadura.

WPQ: Welder Performance Qualification. Calificación del rendimiento del soldador.

WR: Welding record. Registro de soldadura.

WRC: Welding Research Council. Consejo de Investigación sobre Soldadura.

ZAC: Zona Afectada por el Calor.

6. Referencias

- [1] CNEA, «Nuclea - Repositorio Digital Institucional,» Enero 2023. [En línea]. Available: <https://nuclea.cnea.gob.ar/server/api/core/bitstreams/18834bfd-dd20-4314-8432-e597ee40c21b/content>. [Último acceso: Abril 2023].
- [2] ENULA, «Energía Nuclear Latinoamericana,» 12 Julio 2022. [En línea]. Available: <https://enula.org/2022/07/carem-uno-de-los-proyectos-de-plantas-de-energia-nuclear-mas-avanzados-del-mundo/>. [Último acceso: Abril 2023].
- [3] American Society of Mechanical Engineers, ASME Section IX, Qualification Standard for Welding, Brazing, and Fusing Procedures; Welders; Brazers; and Welding, Brazing, and Fusing Operator, 2017.
- [4] ET-CAREM25M-13-r1 Especificación Técnica para los tubos de los generadores de vapor, 2017.
- [5] American Society for Testing and Materials, ASTM A262, 2021.
- [6] R. W. Revie and H. H. Uhlig, Corrosion and Corrosion Control - An Introduction to Corrosion Science and Engineering, New Jersey: Wiley-Interscience, 2008.
- [7] J. C. Lippold and D. J. Kotecki, "Austenitic Stainless Steel - Chapter 6," in *Welding metallurgy and weldability of stainless steel*, Danvers Massachusetts, Wiley-Interscience, 2005, pp. 154-222.
- [8] R. M. Carranza, G. Duffo y S. Farina, Nada es para siempre - Química de la degradación de los materiales, Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Artes gráficas Rioplatense S.A., 2010.
- [9] American Society for Testing and Materials, "ASTM A240/A240M," West Conshohocken Pensilvania, 2011.
- [10] IRAM, U 500-503 Aceros al carbono para uso estructural, 2003.
- [11] American Society for Testing and Materials, ASTM A36, 2015.
- [12] The Lincoln Electric Company, Excalibur® 309/309L-15,-16,-17, Cleveland.
- [13] R. O. Lopez, H. A. Corrales y H. Parra, «Soldabilidad en Aceros Inoxidables y Aceros Disímiles,» *Scientia et Technica - Universidad Tecnológica de Pereira Colombia*, n° No 34, pp. 273-278, Año XIII, Mayo de 2007.

- [14] S. D. Brandi and C. G. Schön, "A Thermodynamic Study of a Constitutional Diagram for Duplex Stainless Steels," *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*, vol. 38, no. 2, pp. 268-275, 2017.
- [15] B. R. Raul and W. D. Sheldon, "Interlaboratory Testing to Assess Repeatability and Reproducibility of the Double Loop Electro Potentiokinetic Reactivation (DL EPR) Tests for Type 304H Stainless Steels," *Corrosion Journal*, vol. 76, pp. 742 - 749, 2020.
- [16] American Society for Testing and Materials, ASTM A 380M Standard Practice for Cleaning, Descaling, and Passivation of Stainless Steel Parts, Equipment, and Systems, 2017.
- [17] American Society of Mechanical Engineers, ASME BPVC Section III Division 2, Code for Concrete Containments, 2017.
- [18] British Standards, EN 10025-2:2005 Hot rolled products of structural steels. Part 2: Technical delivery conditions for non-alloy structural steels, 2005.
- [19] K. Weman, *Welding Processes Handbook*, Boca Raton FL: Woodhead Publishing Ltd, 2003.
- [20] B. Friedrich-Wilhelm, L. Andreas and W. T. Wenz, "18.4 Build-up Welding Techniques," in *Modern Surface Technology*, Weinheim, Wiley-VCH, 2006, pp. 268-296.
- [21] American Society of Mechanical Engineers, ASME BPVC Section IIA-2 Ferrous Material Specifications (SA-451 to End), 2017.
- [22] Inweld Corporation, «Inweld AWS A5.5 E8018-B2,» [En línea]. Available: <https://www.inweldcorporation.com/downloads/8018-B2%20Data%20Sheet.pdf>. [Último acceso: 2021].
- [23] American Society of Mechanical Engineers, ASME BPVC Section II Part D, Properties (Customary), 2017.
- [24] American Society of Mechanical Engineers, "ASME Section II Part C Specifications for Welding Rods, Electrodes, and Filler Metals," 2017.
- [25] Comisión Nacional de Energía Atómica, "IN-EN_GMAT-GIIMC-069 - Informe de Inspección FAE," 2021.
- [26] EPRI, *Guidelines for PWR Steam Generator Tubing Specifications and Repair Vol. 2*, Palo Alto, California, 1999.

- [27] Z. Śloderbach and J. Pająk, "Determination of ranges of components of heat affected zone including changes of structure," in *Archives of Metallurgy and Materials*, 2015, pp. 2605-2616.
- [28] Nickel Development Institute, «Pay Attention to Dissimilar-Metal Welds,» 1991. [En línea]. [Último acceso: 2021].
- [29] A. A. Omar, "Effects of welding parameters on hard zone formation at dissimilar metal welds," *Welding Research Supplement*, pp. 86-93, 1998.
- [30] R. L. Klueh and J. F. King, "Austenitic Stainless Steel-Ferritic Steel Weld Joint Failures," *Welding Research Supplement*, pp. 302-311, 1982.
- [31] C. R. Das, V. Ramasubbu, A. K. Bhaduri and S. K. Ray, "Repair welding of cracked turbine shroud using matching composition consumables," *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 10, no. 1, pp. 110-112, 2005.
- [32] Comisión Nacional de Energía Atómica, "W1088-1-100-014, PR1088- Módulos para Liner de contención de CAREM 25," 2021.
- [33] C.-L. Chang and Y.-H. Chen, "Weld contour measurement of fillet welds by the reverse engineering technique," *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 27, no. 1, pp. 1-6, 2008.
- [34] M. F. Mat, A. F. Musah, A. G. Tham and S. A. Sulaiman, "Evaluation of rail head surface repair using SMAW process with pre heating condition," *Jurnal Teknologi*, pp. 79-83, 2015.
- [35] P. Zhao, B. Yu, P. Wang, Y. Liu and X. Song, "Influence of Repair Welding on the Fatigue Behavior of S355J2 T-Joints," *MDPI - Materials*, no. 16, 3682, pp. 1-17, 2023.
- [36] Siemens AG, Specification No.: REL-L 5002/E. Latest current version. "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 Accessories".
- [37] W. F. Savage and J. C. Lippold, "Solidification of Austenitic Stainless Steel Weldments: Part III—The Effect of Solidification Behavior on Hot Cracking Susceptibility," *Welding Research Supplement*, pp. 388-396, 1982.
- [38] U.S. Nuclear Regulatory Commission Office of Nuclear Regulatory, "Research Regulatory Guide 1.31 Rev. 4 - Control of Ferrite Content in Stainless Steel Weld Metal," 2013.

- [39] J. A. Brooks, A. W. Thompson and J. C. Williams, "A fundamental study of the beneficial effects of delta ferrite in reducing weld cracking," *Welding Research Supplement*, pp. 71-83, 1984.
- [40] A. M. Galloway, N. A. McPherson and T. N. Baker, "An evaluation of weld metal nitrogen retention and properties in 316LN austenitic stainless steel," *Materials: Design and Applications*, vol. 225, pp. 1-9, 2010.
- [41] B. Melat, Z. Sabina, C. Greti and Z. Remus, "Modelling the correlation between ferrite number weld microstructure of cryogenics and duplex stainless steels and chemical composition by neural networks," *International Journal of Modern Manufacturing Technologies*, vol. 6, no. 1, pp. 26-34, 2014.
- [42] American Welding Society, "AWS A5.4-92: Specification for Stainless Steel Electrodes for Shielded Metal Arc Welding," 1998.
- [43] B. M. A. Valiente, "Predictive and Measurement Methods for Delta Ferrite Determination in Stainless Steels," *Welding Research*, vol. 91, pp. 113-121, 2012.
- [44] D. L. Olson, "Prediction of Austenitic Weld Metal Microstructure and Properties," *Welding Research Supplement*, pp. 281-295, 1985.
- [45] N. Suutala, "Effect of Solidification Conditions on the Solidification Mode in Austenitic Stainless Steels," *Metallurgical Transactions*, vol. 14A, pp. 191-197, 1983.
- [46] V. J. M. and D. S. A., "Microstructural analysis of austenitic stainless steel laser welds and their modification during laser welding," in *Trends in Welding Research*, Ohio, 1982.
- [47] J. C. Lippold, "Centerline Cracking in Deep Penetration Electron Beam Welds in Type 304L Stainless Steel," *Welding Research Supplement*, vol. 64, pp. 127-136, 1985.
- [48] H. Aström, " Prediction of FN from chemical analysis," *ELGA technical memo*, p. 6, 1998.
- [49] K. Heidi, "Results Report Schweißbarkeitstest/Ensayo de soldabilidad," KSB SE & Co. KGaA, Pegnitz, 2021.
- [50] Kraftwerk Union Aktiengesellschaft, AVS E 10.2 Rev.15C Preservation, Shipping Package, Markings, Handling, Storage.
- [51] American Society of Mechanical Engineers, ASME III Division 1 subsection NB Class 1 components, 2017.

- [52] KWU - Kraftwerk Union, MTS A (1,2,3) - 15.61 - 2 Material Test Sheet; Cup-springs and spherical springs of precipitation hardenable Nickel-base alloy (Inconel X-750), 1982.
- [53] Special Metals, «Inconel® Alloy 718,» 2007. [En línea]. Available: <https://www.specialmetals.com/documents/technical-bulletins/inconel/inconel-alloy-718.pdf>. [Último acceso: 2021].
- [54] Special Metals, «Inconel® Alloy X-750,» 2004. [En línea]. Available: <https://www.specialmetals.com/documents/technical-bulletins/inconel/inconel-alloy-x-750.pdf>. [Último acceso: 2021].
- [55] EPRI - Electric Power Research Institute, Materials Handbook for Nuclear Plant Pressure Boundary Applications, 2015.
- [56] J. N. Dupont, J. C. Lippold and S. D. Kiser, *Welding Metallurgy and Weldability of Nickel-Base Alloys*, New Jersey: Wiley, 2009.
- [57] M. Wang, M. Song, G. S. Was and L. Nelson, "Stress Corrosion Cracking Behavior of Alloy 718 Subjected to Various Thermal Mechanical Treatments in Primary Water," in *15th International Congress on Nuclear Engineering, 2018*, pp. 293-305, Michigan, 2018.
- [58] EPRI - Electric Power Research Institute, Determination of Susceptibility of Alloy 718 to Intergranular Stress Corrosion Cracking, Columbus, Ohio, 1994.
- [59] Z. Wang, D. Zhou, Q. Deng, G. Chen and W. Xie, "The Microstructure and Mechanical Properties of Inconel 718 Fine Grain Ring Forging," in *7th International Symposium on Superalloy 718 and Derivates - The Mineral, Metals & Materials Society*, Pittsburgh, 2010.
- [60] American Society of Mechanical Engineers, ASME II-B SB-637 / SB-637M: Standard Specification for Precipitation-Hardening Nickel Alloy Bars, Forgings, and Forging Stock for High-Temperature Service, New York, 2017.
- [61] NuScale, Response to Request for Additional Information Docket No. 52-048, Rockville, 2017.
- [62] Aerospace Material Specification, AMS 5699, 2013.
- [63] C. Marsh, *Tesis para el grado de Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica: The Mechanical Properties And Deformation Behavior Of Heat Treated Versus As-Received Inconel X-750*, University of South Carolina - South Carolina, 2018.

- [64] INCO - The International Nickel Company, Inc., Corrosion resistance of the austenitic chromium-nickel stainless steels in chemical environments, New York, 1963.
- [65] Special Metals, «Incoloy® Alloy 020,» 2004. [En línea]. Available: <https://www.specialmetals.com/documents/technical-bulletins/incoloy/incoloy-alloy-020.pdf>. [Último acceso: 2021].
- [66] NeoNickel, «Alloy Performance Guide,» [En línea]. Available: https://www.neonickel.com/wp-content/uploads/2014/09/alloy_performance_guide1.pdf. [Último acceso: 2021].
- [67] Flowserve, «Durimet 20 Bulletin A/1m,» 2011. [En línea]. Available: <https://www.yumpu.com/en/document/read/20901042/durimet-20-flowserve-corporation>. [Último acceso: 2021].
- [68] C. Liu, C. Tang and S. Wang, "Aging of polyethylene thermoplastic liner exposed to sulfuric acid corrosive environments," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1885, pp. 1 - 7, 2021.
- [69] S. Okuda and T. Iguchi, "On the chemical creep of Polypropylene," in *11th Congress on Materials Research*, 1968.
- [70] R. Wu, W. Wang, J. Zhang and X. Xiang, "Preliminary study of the rule of creep failure of PVC in concentrated sulphuric acid," *Journal of Zhejiang University of Technology*, vol. 2, pp. 13-20, 1987.
- [71] Z. Wong, "Penetration and protection of corrosion resistance materials," *Chemical World*, vol. 7, pp. 51 - 52, 1983.
- [72] L. Sara, M. Ilias, L. Abdelkhalek, C. M'Hamed, C. Abdellah and D. Ahmed, "Resistance of different materials used in sewers systems: Polyvinyl chloride (PVC), polypropylene (PP) and High density polyethylene (HDPE), to sulfuric acid and sodium sulfate attack," *Ijera*, vol. 4, pp. 670-678, 2014.
- [73] HMC Polymers, «Polypropylene Chemical Resistance Guide,» 2012. [En línea]. Available: <https://www.hmcpolymers.com/storage/download/hmc-pp-chemical-resistance.pdf>. [Último acceso: 2021].
- [74] J. Villate, "Consideraciones metalúrgicas sobre el efecto de la ferrita delta en la soldadura de aceros inoxidable austeníticos," *DYNA*, vol. 2, pp. 41-45, Febrero 1976.
- [75] T. Wegrzyn, "Delta ferrite in stainless steel weld metals," in *Welding International*, Gliwice, 2009, pp. 690-694.

- [76] Nuclear Safety Standards Commission, KTA 3204, Salzgitter, 2017.
- [77] American Society of Mechanical Engineers, ASTM E 1473 Standard Test Methods for Chemical Analysis of Nickel, Cobalt, and HighTemperature Alloys, 2022.
- [78] American Society for Testing and Materials, ASTM E 112 Standard Test Methods for Determining Average Grain Size, 2000.
- [79] American Society for Testing and Materials, ASTM E 1181 Standard Test Methods for Characterizing Duplex Grain Sizes, 2002.
- [80] American Society for Testing and Materials, ASTM E 92 Standard Test Methods for Vickers Hardness and Knoop Hardness of Metallic Materials, 2017.
- [81] 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.
- [82] American Society for Testing and Materials, ASTM E8/E8M-16a Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, 2016.
- [83] Kraftwerk Union, Material Specification WS E 14.2/15A, 1979.
- [84] M. G. Fontana, Corrosion Engineering, Ohio: McGraw-Hill Book Company, 1987.