



**República de Cuba
Ministerio de Educación Superior
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa**

Tesis en Opción al Título de Máster Electromecánica:

**“METALURGIA FÍSICA DE UNIONES SOLDADAS DE
ACEROS DISÍMILES (ASTM A240–A537) Y
COMPORTAMIENTO MECÁNICO ANTE CARGAS
MONOTÓNICA Y CÍCLICA”**

Investigador: Ing. García Fuentes Andrés
Tutores: Dr. Alberto Velázquez del Rosario
Dr. Ramón Martínez García
Dr. Manuel Rodríguez Pérez

**Caracas, Venezuela
25 de Junio de 2009**

RESUMEN

En el presente estudio se caracterizaron las propiedades mecánicas en uniones soldadas de aceros disímiles: un acero estructural ASTM A537 (I) soldado a tope con un acero inoxidable austenítico ASTM A240 (304L) mediante proceso de soldadura por arco eléctrico semiautomático con protección de gas inerte (GMAW: Gas Metal Arc Welding) empleando argón como gas de protección y un acero inoxidable austenítico ASTM A240 (308L) como material de aporte. Las muestras se ensayaron en la condición sin soldadura, con el objeto de caracterizar los materiales involucrados en la investigación y en condición soldada, sin ser sometidas a tratamiento térmico pre y post soldadura. Las muestras de material base y soldadas fueron caracterizadas mediante microscopía óptica, de igual forma y posterior a una inspección mediante ensayos no destructivos con líquidos penetrantes y ultrasonido, se efectuaron los siguientes ensayos mecánicos, tanto en los metales base como en la soldadura: perfil de microdureza Vickers, tracción, impacto Charpy, doblez guiado (de cara y de raíz) y fatiga axial. Los resultados indicaron un comportamiento mecánico adecuado de los aceros, soldados con el procedimiento GMAW, ante carga monotónica y cíclica, sin embargo, presentan altos valores de microdureza en la zona afectada por el calor, específicamente en la línea de fusión entre el cordón de soldadura y el acero inoxidable 304L. Se obtuvo un modelo teórico-experimental, a partir de valores de resistencia mecánica ante carga de fatiga axial, que permite pronosticar la durabilidad de recipientes y tuberías a presión soldadas de aceros ASTM A240 (304L)-ASTM A537 (I) utilizando como material de aportación electrodos del tipo ASTM A240 (308L), lo que permitió resolver el problema identificado, dar cumplimiento al objetivo planteado y verificar la hipótesis científica del trabajo. Finalmente, los resultados del Análisis Operativo de Varianza (ANOVA) para el modelo y el análisis de los correspondientes estadígrafos (t de Student y F de Fisher), indican que el coeficiente y el modelo propiamente dicho son estadísticamente significativos, lo que permite concluir que el modelo describe adecuadamente, con un nivel de confianza de 95 % y un grado de ajuste de 99,6 %.

ABSTRACT

The research shows the characterization of mechanical properties in dissimilar steel welded unions: a structural steel ASTM A537 (I) butt welded with austenitic stainless steel ASTM A240 (304L) through semiautomatic electrical arc welding process protected by inert gas (GMAW: Gas Metal Arc Welding); Argon is used as a protecting gas and austenitic stainless steel ASTM A240 (308L) as a supplier material. Samples were tested in not welded conditions so as to characterize the materials involved in the investigation, and they were also tested in welded conditions, not being submitted to pre and post welding thermal treatment. Welded-based material samples were characterized through optical microscopy, an inspection of non destructive tests with penetrating liquids and ultrasound was also conducted. The following mechanical tests were completed, not only on the base metals but on the welding as well: Vickers micro hardness profile, traction, charpy impact, bending test (face and root), and axial fatigue. Results showed a proper mechanical steel behavior, welded by GMAW procedure, under monotonic and cyclic loads, yet they showed high values of micro hardness in those areas affected by heat, specifically in the fusion line between the welding cord and the stainless steel 304L, as well as the cracks occurrence in the union interface among stainless steels, and inclusions between the structural steel and the stainless one. Finally, the results of the Operative Analysis of Variance (ANOVA) for the pattern and the analysis of the corresponding statisticians (t of Student and F of Fisher), indicate that the coefficient and the properly this pattern are statistically significant, what allows to conclude that the pattern describes appropriately, with a level of trust of 95% and a grade of adjustment of 99,6%.

ÍNDICE GENERAL		Pág.
INTRODUCCIÓN		1
CAPÍTULO I ESTADO DEL ARTE		
1.1. Aspectos metalúrgicos de la soldadura		12
1.2. Efectos de los transitorios térmicos		12
1.3. Procesos de soldadura por arco eléctrico		13
1.4. Cordón de Soldadura		14
1.5. Soldadura por electrodo consumible protegido		16
1.6. Aceros inoxidable		17
1.7. Clasificación de los aceros inoxidable		18
1.8. Aceros inoxidable austeníticos		19
1.9. Principales aplicaciones		19
1.10. El diagrama de SCHAEFFLER, DELONG y WRC		20
1.11. Dilución		22
1.12. Problemas comunes de la soldadura de aceros inoxidable y su solución		23
1.13. Propiedades mecánicas de los materiales		26
1.14. Detección de fallas en uniones soldadas		35
1.15. Artículos consultados		36
1.16. Conclusiones del Capítulo I		39
CAPÍTULO II MATERIALES Y MÉTODOS		
2.1. Materiales utilizados y condiciones de soldadura		40
2.2. Los parámetros de soldadura		40
2.3. Caracterización química		40
2.4. Caracterización microestructural		41
2.5. Caracterización mecánica		41
2.6. Análisis estadístico		43
2.7. Conclusiones del Capítulo II		43
CAPÍTULO III RESULTADOS Y DISCUSIÓN DEL TRABAJO		
3.1. Caracterización de la soldadura		44
3.2. Caracterización química		46
3.3. Caracterización microestructural		49

	Pág.
3.4. Caracterización mecánica	51
3.5. Modelación matemática	57
3.6. Conclusiones del Capítulo IV	58
CONCLUSIONES	59
RECOMENDACIONES	60
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61
ANEXOS	64
- ANEXO I. FIGURAS	65
- ANEXO II. TABLAS	70
- ANEXO III. NORMAS	76

INTRODUCCIÓN

Unir dos o más metales mediante soldadura es un proceso que se ha mantenido vigente durante años y desde sus inicios, ha evolucionado hasta convertirse en una herramienta de utilidad en la industria metalmecánica, empleada en la construcción de partes y reparaciones de piezas o elementos mecánicos. La soldadura es un método de trabajo que tiene por objeto unir metales, a través de técnicas razonablemente económicas, otorgando a la unión propiedades adecuadas al trabajo que desempeñará y compatibles con el metal base. (Askeland, 1998)

En general, los procesos de soldadura se pueden efectuar con el uso de calor, presión o mediante la combinación de ambos. La forma de realizar la unión, subdivide a la soldadura en: unión por fusión, unión por resistencia eléctrica, enlace en fase sólida o enlace en fase sólida - líquida. En el presente trabajo de investigación, se empleó la técnica de soldadura por arco eléctrico, específicamente soldadura semiautomático con protección de gas inerte (*GMAW: Gas Metal Arc Welding*) empleando argón como gas de protección, por lo que se otorgó especial atención a la soldadura por fusión, donde las partes a unir se funden juntas con la aplicación de calor y puede o no usar presión y material de aportación. (AWS Handbook, 2007)

De igual forma, en la industria es práctica usual la soldadura en sitio, o soldadura de campo; tanto en nuevas instalaciones, como en reparaciones, conexiones anexas y estructurales (A. L. Rivas, 2003), y de manera específica, en el campo industrial de producción, refinación y transporte de petróleo, procesos de gran presencia en la industria nacional venezolana y mundial, bien sea a través de la más importante productora y refinadora de hidrocarburos en Venezuela, Petróleos de Venezuela S.A. (PDVSA) o compañías nacionales e internacionales que prestan servicio a la industria petrolera (www.pdvsa.com).

Estas operaciones son realizadas mayormente mediante técnicas de soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido (*SMAW: Shield Metal Arc Welding*) empleando material de aportación de composición similar al material base. (AWS Handbook, 2007). En la soldadura de aceros inoxidables y específicamente en los austeníticos, es práctica generalizada mantener la temperatura del material base y la zona afectada por el calor lo más baja posible, esto se logra usando bajas intensidades de corriente, compatibles con adecuada penetración y fusión, arco de soldadura corto, secuencia de paso lento, cordones cortos, o simplemente esperando que la pieza se enfríe entre cordón y cordón. Es práctica corriente limitar la temperatura durante la soldadura a valores controlados (inferiores a los 100°C). Así mismo, puede ser requerido un calentamiento

post soldadura (alrededor de los 500°C) con el objeto de producir precipitación de carburos de Niobio (Nb) estabilizado o, en aleaciones de Níquel (Ni), de una manera controlada para evitar la precipitación en servicio, que produce fragilidad. Este último se realiza sólo en caso de ser necesario, mediante tratamiento térmico post soldadura (Código ASME Sección VIII, 2007).

En el caso de soldaduras de aceros inoxidable unidos con aceros estructurales, comúnmente denominadas soldaduras disímiles, tanto en el cordón de soldadura como en la ZAC, en función de la composición química de la unión, se desarrolla una estructura martensítica de característica frágil, así como la posibilidad de fisuración, condiciones que afectarían las propiedades mecánicas de la unión y en especial, interviene notablemente en el inicio de la grieta ante cargas cíclicas. En consecuencia, se ve afectada la resistencia a la fatiga de la junta. De esta forma, y para evitar fallas prematuras, es práctica común someter a la junta a tratamientos térmicos pre y post soldadura que disuelvan la estructura martensítica. Para realizar dichos procesos de reparación, se requiere de paradas de planta, deseándose, en todo caso, que los tiempos sean el mínimo posible, ya que genera un impacto económico importante, produce pérdidas de producción y afecta notablemente el desempeño de los trabajadores. Por otra parte, algunos recipientes, intercambiadores y tramos de tubería son de difícil acceso, donde resulta complicado realizar tratamientos térmicos (ASM Handbook Metals, 2005)

En vías de evitar dichos tratamientos, disminuir considerablemente el tiempo de parada de planta, contribuir a la sustentabilidad económica del proceso y aumentar la vida útil de los materiales involucrados, a favor de la sustentabilidad ambiental del proceso, la presente investigación concentra sus esfuerzos en estudiar el fenómeno de iniciación y crecimiento de grietas en uniones soldadas sin tratamientos térmicos pre y post soldadura. Lo que representa un importante aporte al campo del conocimiento científico, por cuanto contribuye al establecimiento de los mecanismos de surgimiento y propagación de grietas de fatiga originadas por las fluctuaciones de las cargas mecánicas y térmicas; originadas durante las operaciones de llenado y vaciado de recipientes (cargas mecánicas), o por medio de la dilatación o contracción natural (cargas térmicas) debido a cambios significativos en la temperatura del contenido. (Dowling, 1999)

Por otra parte, la difícil situación confrontada en la industria petrolera mundial en los últimos años, agravada por los fluctuantes precios del crudo en el mercado y los problemas con la falta de piezas de repuesto, ha llevado a la dirección de los países petroleros a trazar nuevas estrategias, cuyo objetivo principal es el de adaptar sus industrias a las condiciones regionales. En este sentido, se hace necesario el autoabastecerse de equipos, materiales y piezas de repuesto fabricadas en empresas internas, con el propósito de disminuir las importaciones y brindar respuesta expedita a las necesidades locales. Científicos y técnicos, encaminan sus actividades

científicas hacia este campo, con el fin de hallar los métodos óptimos de elaboración de piezas y procesos tecnológicos y así lograr una mayor vida en servicio; disminuir costos de producción y evitar fallas en tiempo de operación, lo que eleva considerablemente los gastos producto de la sustitución y tiempos perdidos. (Martínez, 2006).

Dentro de las variables más significativas en los procedimientos de soldadura están; el valor de las temperaturas de precalentamiento debido a los costos de combustible para alcanzar determinados niveles de temperaturas en piezas de grandes dimensiones. En la medida que se logre reducir los niveles de temperatura de precalentamiento e incluso evitar los tratamientos de pre y post calentamiento, se reduce también la contaminación ambiental como resultado de una disminución en el uso de combustible y se mejora operativamente el proceso. Además, se busca afectar la resistencia mecánica de la unión soldada lo menos posible como resultado de estructuras de grano grueso que pueden aparecer en las zonas de sobrecalentamiento.

Para establecer el valor de las variables de un procedimiento de soldadura, es necesario determinar el efecto del aporte térmico del proceso, sobre el comportamiento de los ciclos térmicos en la ZAC de la unión soldada, de acuerdo a la temperatura de pre calentamiento, configuración geométrica de la superficie y propiedades termo físicas de los aceros involucrados.

En esta investigación se emplea el concepto de soldadura disímil entre materiales base (MB_1 y MB_2) y material de aportación (MA), utilizando un acero inoxidable austenítico ASTM A240 (308L) (ASTM A240/A240M, 2001), cuya composición química difiere de los materiales base, también diferentes entre sí; utilizando un acero estructural ASTM A537 (I) (ASTM A537/A537M-95, 2000), y un acero inoxidable austenítico ASTM A240 (304L) (ASTM A240/A240M, 2001). En todo caso, se pretende disminuir la formación de estructura martensítica durante la solidificación del material de aporte y con esto evitar la posibilidad de cualquier tipo de fisuración en el cordón de soldadura, sus líneas de fusión y la ZAC.

Se emplearon los diagramas de SCHAEFFLER, "DELONG" y WRC, diagramas desarrollados para estimar las condiciones de soldabilidad de los materiales estudiados, sobre la base de las composiciones del metal de aporte (MA) y el metal base (MB) (Rodríguez, 2007).

El propósito general del presente trabajo es el de evaluar la soldabilidad de los referidos aceros, con el fin de desarrollar un modelo que permita pronosticar la durabilidad de recipientes y tuberías a presión.

Se centró en los factores que afectan la calidad de la soldadura, tales como; defectos (grietas superficiales e internas, incrustaciones de escoria y socavaciones), microestructura, extensión de la zona afectada por el calor y propiedades mecánicas (perfil de dureza, tensión, impacto, comportamiento ante el ensayo de doblez guiado y fatiga axial).

Se limitó el alcance del estudio, a la determinación y análisis de las propiedades mecánicas de los materiales involucrados y la junta soldada, sin variar el proceso ni los parámetros, y sin la aplicación de tratamientos térmicos pre y post soldadura. (AWS Handbook, 2007).

La selección de materiales para ingeniería constituye un problema cardinal para el desarrollo de la humanidad. Este proceso requiere de una diversidad de decisiones importantes que determinan la efectividad y garantía del desarrollo social. En la selección de materiales, es importante considerar si estos pueden o no ser transformados de manera consistente en productos en correspondencia con el medio ambiente, generando el menor impacto ecológico al momento de su extracción de la naturaleza, considerando factores de procesamiento inicial, transporte a la industria y proceso final de manufactura. También debe tenerse especial cuidado en si las propiedades requeridas se pueden conseguir y mantener durante su uso industrial, si el material es compatible con otras partes del ensamblaje y si puede, fácil y económicamente, unirse a ellas. La vida útil de los mismos, su grado de retorno al medio ambiente, su capacidad de reciclaje, observar si durante los procesos de fabricación y procesamiento se pueden originar problemas ecológicos y finalmente, si dicho material puede convertirse de manera económica en un componente útil y con la forma requerida (Shigley, 2002).

Los cambios en temperatura alteran de manera notable las propiedades de los materiales. Todo material que haya sido endurecido mediante tratamiento térmico o por efecto de procesos de conformado o soldadura, puede perder súbitamente su resistencia al ser calentado en exceso. Las temperaturas elevadas modifican la estructura cristalina de los materiales, mientras que las bajas temperaturas pueden causar que un metal falle por fragilidad, aun cuando las cargas aplicadas sean bajas (Smith, 2004).

El diseño de materiales resistentes a temperaturas extremas resulta esencial para muchas tecnologías y la mayor parte de los metales reaccionan ante el oxígeno y otros gases particularmente a temperaturas elevadas; por lo que se hace común el empleo de aceros enriquecidos con elementos aleantes que favorezcan la resistencia a la corrosión (cromo y níquel), de manera que los líquidos corrosivos que atacan a los materiales y provocan fallas prematuras en estructuras, puedan ser transportados y almacenados en forma efectiva sin la presencia de derrames y fugas al ambiente. En fin, el hombre se encuentra ante el reto de seleccionar materiales y tecnologías para su procesamiento que impidan estas reacciones y que permitan la operación en ambientes extremos, favoreciendo el desarrollo sustentable y en armonía con el medio que lo rodea, de modo que se satisfagan los requisitos de sustentabilidad ecológica y ambiental. (Askeland, 1998)

El presente tema de investigación se relaciona con las aleaciones a base de hierro (Fe) y carbono (C), conocidos en la industria como aceros, cuando el contenido de C es inferior a 2%, y en forma precisa del procesamiento de los mismos; mediante uniones soldadas.

El tema abordado se concentra en el establecimiento de las regularidades que garantizan la adecuada soldabilidad de los materiales utilizados en la fabricación de recipientes y sistema de tuberías sometidos a presión, utilizados para el almacenamiento y transporte de petróleo y productos derivados de las refinadoras de hidrocarburos en el mundo y específicamente en Venezuela, por Petróleos de Venezuela S.A. (PDVSA). En dicho sector industrial es común la soldadura en sitio operaciones realizadas mayormente mediante técnicas de soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido (*SMAW: Shield Metal Arc Welding*) empleando material de aportación de composición similar al material base. (AWS Handbook, 2007)

Petróleos de Venezuela S.A. es la corporación estatal de la República Bolivariana de Venezuela que se encarga de la exploración, producción, manufactura, transporte y mercadeo de los hidrocarburos, de manera eficiente, rentable, segura, transparente y comprometida con la protección ambiental; con el fin último de motorizar el desarrollo armónico del país, afianzar el uso soberano de los recursos, potenciar el desarrollo endógeno y propiciar una existencia digna y provechosa para el pueblo venezolano, propietario de la riqueza del subsuelo nacional y único dueño de esta empresa operadora. (www.pdvsa.com)

En dichas actividades, el acero inoxidable ASTM A240 (304L) se utiliza en la fabricación de conexiones y accesorios de tuberías, tales como: codos, Te, reductores, collarines y bridas; mientras que con el acero estructural ASTM A537 (I) se fabrican, fundamentalmente, bases y estructuras que soportan tramos de tubería y recipientes de almacenamiento. Sobre la base de la experiencia acumulada y los resultados empíricos obtenidos, los aceros ASTM A240 (304L) y ASTM A537 (I) son soldados utilizando aceros del tipo ASTM A240 (308L), no existiendo un fundamento científico adecuado que sustente dicha práctica.

El uso de electrodos del tipo 308L como material de aporte proporciona la ventaja de que, por su bajo contenido de carbono, no se promueve la precipitación de carburos en la microestructura y por lo tanto, se evita la aplicación de tratamientos térmicos post-soldadura que disminuyen los costos de la operación. (ASM Specialty Handbook. Stainless Steel, 1994).

En las soldaduras disímiles tanto en el cordón de soldadura como en la zona afectada por el calor se puede desarrollar una estructura martensítica con características de fragilidad que depende de la composición química de la unión. La presencia de esta estructura martensítica incrementa la posibilidad de fisuración, condición que afecta las propiedades mecánicas de la unión y en especial, interviene notablemente en el inicio de la grieta ante cargas cíclicas. En consecuencia,

se ve afectada la resistencia a la fatiga de la junta. De esta forma, y para evitar fallas prematuras, es práctica común someter a la junta a tratamientos térmicos pre y post soldadura que disuelvan la estructura martensítica, pero que comúnmente encarecen los costos de manufactura. La utilización de juntas soldadas utilizando estos materiales (metales base y material de aporte) en la fabricación de ductos y recipientes obedece a la necesidad de disminuir la formación de estructura martensítica durante la solidificación del material de aporte y con esto evitar la posibilidad de cualquier tipo de fisuración en el cordón de soldadura, sus líneas de fusión y la zona afectada por el calor (ZAC). (ASM Handbook Metals, 2005).

En la soldadura de aceros inoxidable austeníticos es práctica generalizada mantener la temperatura del material base y la zona afectada por el calor lo más baja posible, esto se logra usando bajas intensidades de corriente, compatibles con una adecuada penetración y fusión, arco de soldadura corto, secuencia de paso lento, cordones cortos, o simplemente esperando que la pieza se enfríe entre cordón y cordón. (ASM Specialty Handbook. Stainless Steel, 1994).

Para realizar dichos procesos de reparación, se requiere de paradas de planta, deseándose, en todo caso, que los tiempos sean el mínimo posible, ya que genera un impacto económico importante, produce pérdidas de producción y afecta notablemente el desempeño de los trabajadores. Por otra parte, algunos recipientes, intercambiadores y tramos de tubería son de difícil acceso, donde resulta complicado realizar tratamientos térmicos (Código ASME. Sección VIII, 2007).

De igual manera, la difícil situación confrontada en la industria petrolera mundial en los últimos años, agravada por los fluctuantes precios del crudo en el mercado y los problemas con la falta de piezas de repuesto, ha llevado a la dirección de los países petroleros a trazar nuevas estrategias, cuyo objetivo principal es el de adaptar sus industrias a las condiciones regionales. En este sentido, se hace necesario el autoabastecerse de equipos, materiales, piezas de repuesto fabricadas en empresas internas y tecnologías apropiadas con el objetivo de disminuir las importaciones y brindar respuesta expedita a las necesidades locales. (Martínez, 2006)

A pesar de que la soldadura de aceros disímiles es una práctica generalizada en PDVSA, existen problemas de agrietamiento de uniones soldadas sometidas a procesos de fatiga en instalaciones petroleras en operación, constituyendo este un foco originador de averías repentinas.

En consecuencia con los antecedentes anteriormente expuestos, se identifica la siguiente **Situación problémica:** “La rotura repentina de uniones soldadas de recipientes y tuberías a presión bajo cargas alternas fabricados de aceros disímiles ASTM A240 (304L)-ASTM A537 (I) utilizando como material de aporte electrodos del tipo ASTM A240 (308L)”.

Sobre la base de la situación problémica, se plantea el siguiente **problema:**

La inexistencia de un modelo que permita pronosticar la vida útil, en presencia de cargas de fatiga, de recipientes y tuberías a presión soldadas de aceros ASTM A240 (304L)-ASTM A537 (I) utilizando electrodos del tipo ASTM A240 (308L) como material de aportación.

Como **objeto de estudio**, se identifica: Las juntas soldadas de aceros ASTM A240 (304L)-ASTM A537 (I) utilizando electrodos ASTM A240 (308L) como material de aportación.

Como **campo de acción**, se establece: La resistencia mecánica de juntas soldadas de aceros ASTM A240 (304L)-ASTM A537 (I) utilizando electrodos ASTM A240 (308L) como material de aportación.

El **objetivo** trazado en el trabajo es: “Obtener y validar un modelo teórico-experimental que, a partir de valores de resistencia mecánica, permita pronosticar la durabilidad de recipientes y tuberías a presión soldadas de aceros ASTM A240 (304L)-ASTM A537 (I) utilizando como material de aportación electrodos del tipo ASTM A240 (308L)”.

En forma **específica**, los objetivos de la investigación se centraron en: Caracterizar las propiedades mecánicas de los materiales y la junta soldada; Analizar la influencia de los factores que afectan la calidad de la soldadura en el comportamiento mecánico de la junta sometida a carga alternativa; Evaluar la influencia del tipo de carga aplicada en el comportamiento mecánico de la unión soldada; y desarrollar un modelo teórico-experimental, a partir de valores de resistencia mecánica ante carga de fatiga axial.

Para el cumplimiento del objetivo planteado, se establece la siguiente **hipótesis científica**: “Existe una relación funcional entre la resistencia ante cargas de fatiga y el número de ciclos de juntas soldadas de aceros ASTM A240 (304L)-ASTM A537 (I) utilizando electrodos del tipo ASTM A240 (308L) como material de aportación, la cual permite pronosticar la durabilidad de recipientes y tuberías a presión en presencia de cargas monotónicas o cíclicas”.

Para dar solución al problema y los objetivos planteados y verificar la hipótesis científica establecida, se plantean las siguientes **tareas de trabajo**:

1. Recopilación y organización del conocimiento teórico-práctico sobre recipientes y tuberías sometidas a presión, desde el punto de vista de los materiales empleados, dimensiones y causas de falla mediante el establecimiento del estado del arte.
2. Elaboración junta soldada y fabricación de probetas.
3. Realización de los ensayos de la resistencia a la tensión, fatiga, dureza e impacto de los materiales base, material de aporte y juntas soldadas.
4. Análisis metalográfico de las muestras.
5. Procesamiento estadístico de los resultados

6. Análisis y discusión de los resultados

7. Valoración económica

Entre los **métodos científicos** empleados en esta investigación se pueden señalar los siguientes:

Métodos generales: Se utilizó el método hipotético-deductivo al elaborar la hipótesis y proponer nuevas líneas de trabajo a partir de los resultados parciales de la revisión bibliográfica. Se empleó además el método sistémico para enmarcar el tema de investigación en uno más amplio que contiene la interacción entre las propiedades de soldadura y el proceso propuesto sin la aplicación de tratamientos pre y post soldadura, para aplicar métodos computacionales de modelado y análisis y posteriormente descomponerlo en subsistemas que al unirlos brindan una solución al problema planteado.

Métodos lógicos: El método científico fundamental empleado en esta tesis es el analítico-sintético. Mediante el análisis se evaluaron las propiedades de soldadura relacionadas con la resistencia a la fatiga de las juntas evaluadas. Ello permitió descubrir consideraciones diferentes de cálculo de valor de variables de soldadura y conocer los aspectos aun no investigados dentro de las propiedades de soldadura en el caso particular de los materiales objeto de estudio, su forma y dimensiones, que intervienen en la calidad y economía de la tecnología a aplicar. El análisis permite también establecer las comparaciones entre los procedimientos propuestos para la reparación de guijos agrietados y el comportamiento de los diferentes valores de las variables que intervienen en el proceso de soldadura.

Métodos matemáticos: se obtuvieron los diagramas de dispersión, que expresan la correspondencia entre las tensiones y el número de ciclos, con su correspondiente análisis estadístico, así como la relación entre la resistencia a la tensión y la resistencia a la fatiga, conocida como relación de fatiga.

Métodos empíricos: Se utilizó el método coloquial para la presentación y discusión de los resultados en sesiones científicas. Además se empleó el método experimental para comprobar y fundamentar los estudios comparativos entre la afectación de los ciclos de temperatura y la resistencia a la fatiga.

Aportes del trabajo: De acuerdo con el planteamiento de objetivos, la justificación de la investigación se orienta tanto en forma teórica, metodológica, como desde el punto de vista práctico. Como **aporte teórico**, su resultado permite encontrar soluciones concretas en materia de ubicación de inicio y crecimiento de grietas y ciclos de vida para uniones soldadas de materiales disímiles. Como aporte metodológico, su resultado permite generar procedimientos para pronosticar la durabilidad de uniones soldadas de materiales disímiles, inicio y crecimiento de grietas, así como agrupar la información existente en cada área del conocimiento.

Como **aporte práctico**, su resultado permite identificar el diseño óptimo de soldadura de materiales disímiles sometidos a cargas de fatiga conduce a comparar las propiedades del material con o sin soldadura cuando se somete a este tipo de carga.

Como **aporte científico** al conocimiento, el resultado permite obtener y validar científicamente un modelo para el pronóstico de la durabilidad de recipientes y tuberías a presión soldadas de aceros ASTM A240 (304L)-ASTM A537 (I) utilizando electrodos del tipo ASTM A240 (308L) como MA. Sin embargo, la justificación fundamental de la investigación y la importancia de destinar tiempo y recursos económicos a este tema se basa en la sustentabilidad ecológica y el uso racional de los recursos naturales incorporados a las actividades productivas, ya que al aumentar la vida útil de los equipos se mejora la tasa de utilización de los recursos naturales renovables y no renovables y con esto aumentará el tiempo previsto para su agotamiento.

Viabilidad de la investigación: Estudiar el fenómeno de iniciación y crecimiento de grietas en uniones soldadas de recipientes y tuberías a presión sometidos a cargas de fatiga presentes en la industria venezolana e internacional, representa una importante aporte al campo del conocimiento científico, por cuanto contribuye al establecimiento de los mecanismos de surgimiento y propagación de grietas de fatiga originadas por las fluctuaciones de cargas, tanto mecánicas como térmicas, originadas durante las operaciones de llenado y vaciado (cargas mecánicas), o por medio de la dilatación o contracción natural del recipiente debido a cambios significativos en la temperatura del contenido (cargas térmicas). Independientemente de las características de los materiales utilizados en la fabricación de recipientes y tuberías, los materiales de aporte de soldadura y la tecnologías de soldadura que se empleen, los resultados de la investigación pueden ser generalizables a recipientes de almacenamiento de combustibles y en general a recipientes sometidos a presión y tuberías de transporte, no sólo en Venezuela, sino también en el resto del mundo, por lo que se vislumbran amplias perspectivas de intercambio de experiencias, tecnologías, habilidades prácticas e investigativas e información y documentación científico – técnica especializada respecto al tema en desarrollo. La explicación científica del agrietamiento ante cargas de fatiga significa, además, una singular respuesta a problemas de averías y fugas presentadas y la minimización de las pérdidas económicas que se derivan (sustentabilidad económica), y la mitigación de los consiguientes impactos ecológicos – ambientales negativos que se generan por los escapes de gases y la contaminación del subsuelo (desarrollo sustentable).

Disponibilidad de recursos financieros, humanos, materiales y equipos: Considerando la disponibilidad de equipamiento, medios y técnicas de análisis y la necesidad de dar solución a problemas técnicos presentados en recipientes y tuberías, de gran presencia en la Industria, y a través de la más importante productora y refinadora de hidrocarburos en Venezuela (Petróleos de

Venezuela S.A. PDVSA), se propone la presente tesis de investigación para estudiar las causas y mecanismos de surgimiento y propagación de grietas en uniones soldadas de recipientes y tuberías a presión, sometidos a cargas de fatiga. Este constituye uno de los temas de investigación priorizados en las líneas de investigación desarrolladas por el Departamento de Mecánica del IUT.-RC “Dr. Federico Rivero Palacio” ubicado en el Km. 8 Carretera Panamericana, vía los Teques, Caracas, Venezuela.

Aportes a partir de la implementación de los resultados del trabajo:

Lo Económico: implica una disminución en el costo de fabricación por concepto de materiales, tiempo, mano de obra, energía y combustible con respecto a los procesos utilizados hasta ahora.

Lo Comercial: desde este punto de vista el trabajo puede tener un gran impacto, al ofrecer a la industria la posibilidad de establecer un taller especializado en la fabricación y reparaciones de campo en recipientes y tuberías sometidas a presión.

Lo Social: mejora las condiciones de trabajo de los soldadores.

Lo Ambiental: disminuye la contaminación ambiental.

El valor práctico del trabajo: este se deriva en la aplicación del valor de las propiedades de las juntas soldadas para materiales disímiles.

Publicaciones: resultados preliminares de esta investigación han sido publicados mediante la modalidad de presentación oral en los siguientes eventos científicos;

- **LVIII Convención anual de AsoVAC**, Noviembre 2008, Instalaciones del IUT Yaracuy, Ciudad de San Felipe, Venezuela.
- **14 Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura (CCIA)**, Diciembre 2008, Palacio de Convenciones, La Habana, Cuba.

De igual forma, se desprende el artículo titulado: “METALURGIA FÍSICA DE UNIONES SOLDADAS DE ACEROS DISÍMILES (ASTM A240–A537) Y COMPORTAMIENTO MECÁNICO ANTE CARGAS MONOTÓNICA Y CÍCLICA” enviado a la **revista Minería y Geología editada por el ISMM de Moa**, Cuba y en espera de su aceptación para su publicación.

CAPÍTULO I

ESTADO DEL ARTE

En el proceso de unión de dos metales mediante soldadura por fusión, la solidificación tiene un rol de gran importancia. Una porción de los metales a unir se funde y, en muchos casos, se agrega un metal fundido adicional. La zona donde se tiene metal líquido se conoce como zona de fusión. Cuando la zona de fusión solidifica, las piezas originales de metal quedan unidas entre sí. La estructura y las propiedades de la zona de fusión dependen de las variables involucradas en el proceso de fundición de los metales. La adición de agentes inoculantes a la zona de fusión reduce el tamaño de grano, mientras que velocidades rápidas de enfriamiento, o tiempos cortos de solidificación, promueven una microestructura más fina y mejores propiedades. Los factores que incrementan la velocidad de enfriamiento son; un mayor espesor del material, zonas de fusión más pequeñas, temperatura inicial del metal baja y ciertos procesos de soldadura, como la oxiacetilénica, donde se emplea una fuente de calor de relativa baja intensidad y en consecuencia los tiempos de soldadura son largos y el metal sólido circundante no es un enfriador térmico efectivo. Sin embargo, los procesos de soldadura por arco eléctrico proporcionan una fuente de calor más intensa, minimizando así el calentamiento del metal circundante y proporcionando un enfriamiento más rápido. (Askeland, 1998).

Cuando se suelda un metal, el material adyacente a la soldadura se calienta por encima de las temperaturas de recristalización y crecimiento de grano. Esta región se denomina Zona Afectada por el Calor (ZAC). La estructura y propiedades de esta zona se ven afectadas drásticamente por el calor del proceso de soldadura. (Anexo I, Fig. A1)

Etimológicamente, soldar significa consolidar; la soldadura ideal sería aquella que produjera una continuidad absoluta entre las partes unidas, de forma que fuera indiscernible la frontera entre ellas. En la práctica se puede definir la soldadura como la operación que permite unir partes en una sola pieza, asegurando la continuidad entre ellas mediante calentamiento y/o presión con o sin el empleo de un material de aportación que disponga de características físicas comparables con el procedimiento específico utilizado. La soldadura se considera realizada cuando se verifica la interpenetración granular entre las partes, directa o mediante el material de aportación. La soldadura con fusión se caracteriza por la presencia de una fase líquida, sea del material base, del material de aportación o de ambos. Dentro de este tipo de soldadura, se distinguen la que la fusión se realiza con gases combustibles y la que utiliza como fuente de energía el arco eléctrico. En este último grupo se puede diferenciar entre los procedimientos al arco con protección de

fundente en los que se emplea un polvo similar al utilizado como revestimiento protector en electrodo, los procedimientos al arco con protección de gas y los procedimientos al arco sin protección de tiempo corto (AWS Handbook, 2007).

1.1. Aspectos metalúrgicos de la soldadura: a escala macroscópica, la continuidad implica la ausencia de toda materia no metálica interpuesta entre los elementos unidos, lo que diferencia la soldadura de otros tipos de unión como el remachado o el pegado. Esto no implica homogeneidad en la composición ya que, en ocasiones, el material de aporte es diferente del material base, conocido como soldadura de materiales disímiles. Es a escala microscópica donde se aprecia mejor lo que define la continuidad, ya que los átomos de las partes se agrupan, mediante la soldadura, en una estructura cristalina continua. Pueden distinguirse tres pasos que corresponden a otros tantos mecanismos básicos en dicho proceso.

El primero de ellos sucede en fase sólida y consiste en un acercamiento de los átomos tan íntimo que permite el salto de un grano a otro, de forma que las fuerzas de atracción convierten el acercamiento en definitivo. Ejemplos de ello se dan en la soldadura por ultrasonidos o por presión en frío. También tiene lugar en la soldadura por resistencia o por fricción, de modo que si el acercamiento está provocado por deformación en frío, la estructura cristalina se deforma y permanece así después del proceso, mientras que si la deformación se produce a una temperatura suficientemente alta, la estructura sufre un fenómeno de recristalización que determina la orientación común en ambos lados de la intercara de soldadura. El segundo mecanismo es de difusión atómica. Si los materiales en contacto permanecen en estado sólido, la difusión se realiza, a través de la intercara en uno y otro sentido, con una actividad que depende de la temperatura y la presión entre partes. Si alguna de las partes a unir está fundida, la difusión se realiza desde esta parte a la sólida, creando una aleación a lo largo de la intercara. El tercer mecanismo ocurre cuando solidifica un líquido sobre un sólido que le ha dado origen. La continuidad viene determinada por el fenómeno de epitaxis, que consiste en que los cristales nucleados en la intercara se orientan de acuerdo a la estructura cristalina del sólido.

1.2. Efectos de los transitorios térmicos: para conocer las propiedades que tendrá un material que haya sido sometido a una unión por soldadura, es necesario estudiar sus diagramas de enfriamiento continuo, puesto que los componentes metalográficos finales dependerán de la velocidad de enfriamiento y de sus particularidades. En definitiva, es necesario analizar la temperatura máxima que se alcanzará, el tiempo de permanencia a dicha temperatura, la zona afectada por ese estado térmico y, dado que suele realizarse un ciclo de calentamiento-enfriamiento relativamente rápido, estudiar el tiempo y temperatura equivalentes de transformación en estado cuasi-estacionario. (Martínez, 2006).

Cuando un material presenta dos transformaciones de fase, además de su paso de sólido a líquido, los componentes metalúrgicos de la estructura correspondiente a un enfriamiento posterior a rebasar la temperatura crítica de transformación de fase, dependen de dos variables, siempre y cuando no se realice el proceso bajo una tensión o presión diferente de la atmosférica la velocidad o ciclo de enfriamiento y el tiempo de permanencia por encima de la temperatura de transformación. Cuando se realiza un tratamiento térmico, la temperatura de mantenimiento se calcula de forma que toda la masa del material se transforme de forma homogénea y el producto final pueda ser considerado uniforme estructuralmente. Cuando sucede así, los componentes finales dependen del tiempo de mantenimiento por encima de la temperatura de transformación, pero la variación porcentual de los mismos no suele ser importante. Sin embargo, cuando se somete el material a un ciclo de calentamiento-enfriamiento relativamente rápido y, sobre todo, a un ciclo cuyo tiempo de mantenimiento a la temperatura máxima es corto comparado con el tiempo del transitorio, tal como sucede en un ciclo de soldadura, reviste suma importancia calcular la equivalencia que tiene el tiempo de calentamiento-enfriamiento en términos de mantenimiento a temperaturas de transformación. (Askeland, 1998)

1.3. Procesos de soldadura por arco eléctrico: para realizar una soldadura por arco eléctrico se induce una diferencia de potencial entre el electrodo y la pieza a soldar, con lo cual ioniza el aire entre ellos y pasa a ser conductor, de modo que se cierra el circuito y se crea el arco eléctrico. El calor del arco funde parcialmente el material de base y funde el material de aporte, el cual se deposita y crea el cordón de soldadura. Es utilizada comúnmente debido a la facilidad de transportación y a la economía de dicho proceso. Los elementos involucrados son los siguientes:

Electrodo: son varillas metálicas preparadas para servir como polo del circuito; en su extremo se genera el arco. En algunos casos, sirven también como material fundente y generalmente va recubierta de distintos materiales, en función de la pieza a soldar y del procedimiento empleado.

Plasma: compuesto por electrones que transportan la corriente y que van del polo (-) al (+), iones metálicos que van del polo (-) al (+), átomos gaseosos que se van ionizando y estabilizando conforme pierden o ganan electrones, y productos de la fusión como vapores que ayudan a formar la atmósfera protectora. Esta zona alcanza la mayor temperatura del proceso.

Llama: es la zona que envuelve al plasma y presenta menor temperatura que éste, formada por átomos que se disocian y recombinan desprendiendo calor por la combustión del revestimiento del electrodo. Otorga al arco eléctrico su forma cónica.

Baño de fusión: la acción calorífica del arco provoca la fusión del material; parte de éste se mezcla con el material de aportación, y provoca la soldadura de las piezas al solidificar.

Cráter: surco producido por el calentamiento del metal. Su forma y profundidad están dadas por el poder de penetración del electrodo.

1.4. Cordón de soldadura: está constituido por el MB y el MA del electrodo y se pueden diferenciar dos partes: la escoria, compuesta por impurezas que son segregadas durante la solidificación y que posteriormente son eliminadas, y el sobre espesor, formado por la parte útil del material de aportación y parte del metal base, que es lo que compone la soldadura en sí.

La más notable característica de la soldadura con electrodo revestido (**SMAW**) *Shield Metal Arc Welding*, es que el arco eléctrico se produce entre la pieza y un electrodo metálico recubierto. El recubrimiento protege el interior del electrodo hasta el momento de la fusión. Con el calor del arco, el extremo del electrodo funde y se quema el recubrimiento, de modo que se obtiene la atmósfera adecuada para que se produzca la transferencia de metal. (Anexo I, Fig. A2)

Estas gotas de metal fundido caen recubiertas de escoria fundida procedente de la fusión del recubrimiento del arco. La escoria flota en la superficie y forma, por encima del cordón de soldadura, una capa protectora del metal fundido. Como los electrodos aportan el flujo de metal fundido, será necesario reponerlos cuando se desgasten. Están compuestos de dos piezas: el alma y el revestimiento. El alma o varilla es alambre (de diámetro original 5.5 mm) que se comercializa en rollos continuos constituye la composición química del material de aportación. Luego de obtener el material, se decapa mecánicamente (a fin de eliminar el óxido y aumentar la pureza) y posteriormente es trefilado para reducir su diámetro a la medida requerida.

El revestimiento se produce mediante la combinación de una gran variedad de elementos (minerales varios, celulosa, mármol, aleaciones, etc.) convenientemente seleccionada y probada. La composición y clasificación de cada tipo de electrodo está regulada por la *American Welding Society* (AWS), organismo de referencia mundial en el ámbito de la soldadura.

Este tipo de soldadura puede ser efectuado bajo corriente continua (CC) como corriente alterna (CA). En corriente continua el arco es más estable y fácil de encender y las salpicaduras son poco frecuentes; en cambio, el método es poco eficaz con soldaduras de piezas gruesas. La corriente alterna posibilita el uso de electrodos de mayor diámetro, con lo que el rendimiento a mayor escala también aumenta. En cualquier caso, las intensidades de corriente oscilan entre 10 y 500 amperios. (AWS Handbook, 2007).

El factor principal que hace de este proceso de soldadura un método útil es su simplicidad y, por tanto, su bajo costo. A pesar de la gran variedad de procesos de soldadura disponibles en la actualidad, la soldadura con electrodo revestido no ha sido desplazada de la industria. La sencillez hace de ella un procedimiento práctico; todo lo que necesita un soldador para trabajar es

una fuente de alimentación, cables, un porta electrodo y electrodos. El soldador no necesita estar junto a la fuente y no hay necesidad de utilizar gases comprimidos como protección.

El procedimiento es excelente para trabajos, reparación, fabricación y construcción, además de versátil y económico. Su campo de aplicaciones es amplio y casi todos los trabajos de pequeña y mediana soldadura de taller se efectúan con electrodo revestido, se pueden soldar metales de casi cualquier espesor y se pueden hacer uniones de cualquier tipo. Sin embargo, el procedimiento de soldadura con electrodo revestido no se presta para su automatización o semiautomatización; su aplicación es esencialmente manual, lo que significa que la calidad de la soldadura depende en gran medida de las habilidades y destrezas del soldador. La longitud de los electrodos es relativamente corta: de 230 a 700 mm. Por tanto, es un proceso para soldadura a pequeña escala. El soldador tiene que interrumpir el trabajo a intervalos regulares para cambiar el electrodo y debe limpiar el punto de inicio antes de empezar a usar un electrodo nuevo. Sin embargo, aun con este tiempo muerto y de preparación, un soldador eficiente puede ser muy productivo.

Otro proceso de soldadura es la denominada **soldadura TIG (*Tungsten Inert Gas*)**, se caracteriza por el empleo de un electrodo no consumible de tungsteno, aleado en ocasiones con torio o zirconio en porcentajes no superiores a un 2%. Dada la elevada resistencia a la temperatura del tungsteno (funde a 3.410 °C), acompañada de la protección del gas, la punta del electrodo apenas se desgasta tras un uso prolongado. Los gases más utilizados para la protección del arco en esta soldadura son el argón y el helio, o mezclas de ambos. La gran ventaja de este método de soldadura es la obtención de cordones más resistentes, más dúctiles y menos sensibles a la corrosión que en el resto de procedimientos, ya que el gas protector impide el contacto entre el oxígeno de la atmósfera y el baño de fusión. Además, dicho gas simplifica notablemente el proceso de soldadura de metales ferrosos y no ferrosos, por no requerir el empleo de desoxidantes, con las deformaciones o inclusiones de escoria que pueden implicar.

Otra ventaja de la soldadura por arco en atmósfera inerte es la que permite obtener soldaduras limpias y uniformes debido a la escasez de humos y proyecciones; la movilidad del gas que rodea al arco transparente permite al soldador ver claramente lo que está haciendo en todo momento, lo que repercute favorablemente en la calidad de la soldadura. El cordón obtenido es por tanto de un buen acabado superficial, que puede mejorarse con sencillas operaciones de acabado, lo que incide favorablemente en los costes de producción. Además, la deformación que se produce en las inmediaciones del cordón de soldadura es menor.

Como inconvenientes está la necesidad de proporcionar un flujo continuo de gas, con la subsiguiente instalación de tuberías, bombonas, etc., y el encarecimiento de los equipos asociados. Además, este método de soldadura requiere mano de obra muy especializada, lo que

también aumenta los costos. Por tanto, no es uno de los métodos más utilizados sino que se reserva para uniones con necesidades especiales de acabado superficial y precisión. De todas formas, hoy día se emplea la soldadura TIG sobre todo en aceros inoxidable y especiales ya que a pesar del mayor costo, al acabado obtenido es mejor. (Anexo I, Figs. A3 y A4)

1.5. Soldadura por electrodo consumible protegido: este método resulta similar al TIG, con la salvedad de que en los dos tipos de soldadura por electrodo consumible protegido, MIG (*Metal Inert Gas*) y MAG (*Metal Active Gas*), *Gas Metal Arc Welding (GMAW)* el electrodo es el alimento del cordón de soldadura. El arco eléctrico está protegido, como en el caso anterior, por un flujo continuo de gas que garantiza una unión limpia y en buenas condiciones. En la soldadura MIG, como su nombre lo indica, el gas es inerte y no participa en modo alguno en la reacción de soldadura. Su función es proteger la zona crítica de la soldadura de oxidaciones e impurezas exteriores. Se emplean usualmente los mismos gases que en el caso de electrodo no consumible, argón, menos frecuentemente helio, y mezcla de ambos. (Anexo I, Fig. A5)

En la soldadura MAG, en cambio, el gas utilizado participa de forma activa en la soldadura. Su zona de influencia puede ser oxidante o reductora, ya se utilicen gases como el dióxido de carbono (CO₂) o el argón mezclado con oxígeno. El problema de usar CO₂ en la soldadura es que la unión resultante, debido al O₂ liberado, resulta porosa. Además, sólo se puede usar para soldar aceros, por lo que su uso queda restringido a las ocasiones en las que es necesario soldar grandes cantidades de material y en las que la porosidad resultante no es problema a tener en cuenta.

El punto común de los dos procedimientos es el empleo de un electrodo consumible continuo. Dicho electrodo, en forma de alambre, es a la vez el material a partir del cual se generará el cordón de soldadura (material de aportación), y llega hasta la zona de aplicación por el mismo camino que el gas o la alimentación. Dependiendo de cada caso, el ajuste de la velocidad del alambre conllevará un mayor o menor flujo de fundente en la zona a soldar. En general, en este proceso se trabaja con corriente continua (electrodo positivo, base negativa), y en raras ocasiones con corriente alterna. Las intensidades de corriente fluctúan entre 20 y 500 amperios con corriente continua y polaridad directa, 5 y 60 con polaridad inversa, y 40 y 300 amperios con corriente alterna. El uso de los métodos de soldadura GMAW es cada vez más frecuente en el sector industrial. En la actualidad, es uno de los métodos más utilizados en soldaduras de fábrica. Ello se debe, entre otras cosas, a su elevada productividad y a la facilidad de automatización, lo que le ha valido abrirse un hueco en la industria automovilística. La flexibilidad es la característica más sobresaliente del método GMAW, ya que permite soldar aceros de baja aleación, aceros inoxidable, aluminio y cobre, en espesores a partir de los 0,5 mm y en todas las posiciones. La protección por gas garantiza un cordón de soldadura continuo y uniforme, además

de libre de impurezas y escorias. Además, la soldadura GMAW es un método limpio y compatible con todas las medidas de protección para el medio ambiente. En contra, su mayor problema es la necesidad de aporte tanto de gas como de electrodo, lo que multiplica las posibilidades de fallo del aparato, además del lógico encarecimiento del proceso. (AWS Handbook 2007).

1.6. Aceros Inoxidables: son aquellas aleaciones a base de Fe menor al 50%, con un porcentaje de Cr entre 11% y 30% (Anexo I, Fig. A6). Estos aceros poseen características de inoxidables por la formación de una capa invisible de óxido, compacta y muy adherente en la superficie de los mismos; la cual protege al material de una oxidación continua. Esta película deja la superficie inerte a las reacciones químicas, característica principal de resistencia a la corrosión de los aceros inoxidables. Otros elementos, como Ni, Mo, Cu, Ti, Al, Si, S, le son añadidos para obtener características particulares. El C se encuentra normalmente en un rango de 0,03% a 1,0% en peso. Los aceros inoxidables pueden ser clasificados en cinco familias, de las cuales cuatro se basan en las características cristalográficas y microestructurales de las aleaciones, como lo son; ferríticos, martensíticos, austeníticos y dúplex. La quinta familia se basa en el tratamiento térmico utilizado para controlar la microestructura en aleaciones endurecidas por precipitación.

La selección de los aceros inoxidables puede realizarse de acuerdo con sus características:

- Resistencia a la corrosión y a la oxidación a temperaturas elevadas.
- Propiedades mecánicas del acero.
- Características de los procesos de transformación a que será sometido.
- Costo total (reposición y mantenimiento)
- Disponibilidad del acero.

Además de su resistencia a la corrosión natural, presentan gran resistencia mecánica, de al menos dos veces la del acero al carbono, son resistentes a temperaturas elevadas y a temperaturas criogénicas. Son fáciles de transformar en gran variedad de productos y tiene una apariencia estética, que puede variarse sometiendo el acero a diferentes tratamientos superficiales para obtener acabado a espejo, satinado, coloreado, texturizado, etc. Los aceros inoxidables no son indestructibles, sin embargo con una selección cuidadosa, sometidos a procesos de transformación adecuados y realizando limpieza periódica, algún integrante de la familia de los aceros inoxidables resistirá las condiciones corrosivas y de servicio más severas.

1.7. Clasificación de los aceros inoxidables:

- **Ferríticos:** 12 a 30 % Cr y bajo C.
- **Martensíticos:** 12 a 17 % Cr, 0.1 a 1 % C.
- **Austeníticos:** 17 a 25 % Cr y 8 a 20 % Ni.

- **Aleaciones Dúplex:** 23 a 30 % Cr, 2.5 a 7 % Ni, adiciones de Ti y Mo.
- **Aleaciones endurecibles por precipitación,** pueden tener base austenita o martensita, con adiciones de Cu, Ti, Al, Mo, Nb ó N. (ASM Handbook Metals, 2005)

La Metalurgia Física de los aceros inoxidable se puede analizar mejor a partir de los diagramas de fases binarios: Fe-Ni, Fe-Cr, Cr-Ni y del diagrama ternario: Fe-Cr-Ni.

Los aceros inoxidable empleados en esta investigación son del tipo austeníticos, por lo que sólo se resume información específica de esta familia.

1.8. Aceros Inoxidable Austeníticos: son los más utilizados por su amplia variedad de propiedades, se obtienen agregando Ni a la aleación, por lo que la estructura cristalina del material se transforma en austenita y de aquí adquieren el nombre. El contenido de Cr varía de 16 a 28%, el de Ni de 3.5 a 22% y el de Mo 1.5 a 6%. Los tipos más comunes son el AISI-SAE 304, 304L, 308, 308L, 316, 316L, 310 y 317 y sus propiedades básicas son: Excelente resistencia a la corrosión, excelente factor de higiene - limpieza, fáciles de transformar, excelente soldabilidad, no se endurecen por tratamiento térmico, se pueden utilizar tanto a temperaturas criogénicas como a elevadas temperaturas. Constituyen la familia más amplia de aceros inoxidable en términos del número de aleaciones y su diversidad en uso. A pesar de no poder ser endurecidos por tratamientos térmicos, estos aceros pueden ser sustancialmente endurecidos por trabajo en frío. Poseen una estructura cristalina cúbica centrada en las caras (CCC), al igual que el Fe a altas temperaturas (de 900 °C a 1400 °C). Las aleaciones austeníticas no son magnéticas. Poseen excelente ductilidad, maquinabilidad y dureza. El Ni es el elemento principal utilizado para estabilizar la austenita; tanto el C como el N son empleados ya que son altamente solubles en la estructura CCC. Estos aceros pueden agruparse en aleaciones Cr-Ni y en aleaciones Cr-Mn-N dependiendo del porcentaje de elementos contenidos en los mismos. Ejemplos de este tipo de acero son el AISI-SAE 304 y el AISI-SAE 316. La Fisuración Inducida por Hidrógeno (FIH) no es un problema de estos aceros debido a su baja resistencia mecánica (baja dureza), sólo cuando están deformados plásticamente en frío puede presentarse FIH. Podría tenerse en cuenta para el caso de soldaduras de aceros disímiles cuando haya aceros Ferríticos en la junta soldada.

En general no se obtienen beneficios con el precalentamiento (PC) de la soldadura de estos aceros sino más bien un deterioro de la resistencia a la corrosión intergranular como consecuencia de la precipitación de carburos de Cromo en borde de grano. Además el precalentamiento aumenta el riesgo de fisuración en caliente y a la distorsión por su mayor coeficiente de dilatación con respecto a un acero Ferrítico, en este sentido, quedó descartado el precalentamiento de la junta.

1.9. Las principales aplicaciones de estos aceros son los utensilios y equipo para uso doméstico, hospitalario y en la industria alimentaria. Mientras que, a nivel industrial, algunos ejemplos de

productos fabricados con aceros inoxidable son los equipos de procesos químicos y petroquímicos, equipos de proceso de alimentos y bebidas, equipos farmacéuticos, cámaras de combustión, sistemas de escape y filtros automotrices, vagones de ferrocarril, aplicaciones arquitectónicas y estructurales, mobiliario urbano, paneles de aislamiento térmico, intercambiadores de calor, tanques y recipientes, barriles de cerveza, instrumentos quirúrgicos,

En la industria química y petroquímica, los aceros inoxidable ofrecen elevada resistencia a la corrosión y excelentes propiedades mecánicas así como un bajo costo de mantenimiento. En la industria de alimentos y bebidas y en la industria farmacéutica, proveen excelentes condiciones de higiene además de su resistencia a la corrosión y duración a largo plazo. (Anexo I, Fig. A7)

En resumen, ofrecen resistencia a la corrosión, adecuada relación resistencia mecánica-peso, propiedades higiénicas, resistencia a temperaturas elevadas y criogénicas y valor a largo plazo. Son totalmente reciclables y amigables con el medio ambiente. Contribuyen, de manera indirecta, a satisfacer las necesidades humanas básicas tales como alimentación, salud, construcción, medio ambiente, transporte y energía. Tienen mejor resistencia a la corrosión, a medida que el ambiente es más corrosivo (por temperatura o por ácidos más fuertes).

Un problema que debe tenerse presente con los aceros austeníticos es su baja resistencia a la corrosión bajo tensión, en ambientes con iones cloruro, aún en la presencia de trazas de iones cloruros. Las tensiones residuales existentes en el material promueven la corrosión bajo tensión.

En la **Soldadura de los Aceros Inoxidables Austeníticos** es práctica generalizada mantener la temperatura del material base (y la zona afectada por el calor) lo más baja posible, esto se logra empleando bajas intensidades de corriente (compatibles con una adecuada penetración y fusión), arco corto, secuencia de paso peregrino, cordones cortos, o simplemente esperando que la pieza se enfríe entre cordón y cordón. Es usual limitar la temperatura a valores donde el material pueda tocarse con la mano (70 °C). Como excepción y rara vez puede ser requerido un calentamiento a 500°C con el objeto de producir precipitación de carburos (de Nb) en aceros inoxidable AISI 347 estabilizado al Nb (Niobio) o en aleaciones de Ni de una manera controlada para evitar la precipitación en servicio produciendo fragilidad. Este último tratamiento se realiza si es necesario mediante un tratamiento térmico post soldadura. Es indudable que constituyen la más importante aplicación en los procesos industriales, y desde luego, cuando interviene en la construcción el proceso de soldadura. Por esta razón la soldadura de estos aceros, en sus diferentes tipos, como en uniones disímiles con aceros al carbono y en procesos de recargue o aceros chapeados; se considera fundamental en el proceso de elaboración y construcción de gran número de industrias.

Los puntos fundamentales a tener en cuenta en su soldadura pueden resumirse en las consideraciones expuestas a continuación:

- Existen diferencias en composición y principalmente en el contenido de C, lo que producirá diferentes cantidades de carburo precipitado en la ZAC, como consecuencia del ciclo térmico a que encontrará sometida la unión soldada.
- Algunos contiene Se o S para facilitar su mecanizado, lo que incrementa el riesgo de fisuración en caliente del baño de fusión.
- En los aceros de alta aleación bajo un determinado ciclo térmico ocurre la precipitación de la fase sigma (σ).

En general los aceros inoxidable austeníticos presentan una soldabilidad más satisfactoria que los ferríticos y martensíticos, con uniones de gran tenacidad, aunque no se dé tratamiento después de la soldadura. Es de destacar, sin embargo, su coeficiente de dilatación térmica 50% mayor que en los aceros al carbono, mientras que su conductividad es únicamente una tercera parte, lo que se implica soldaduras en fuertes distorsiones. Ciertos aceros Inoxidables Austeníticos llamados “Metaestables” tienen la propiedad de desarrollar mayor dureza y resistencia que los llamados “Estables” cuando son deformados por trabajado mecánico en frío ya que la deformación plástica es el disparador de la transformación de Austenita en Martensita. Estos aceros tienen también problemas asociados a las altas temperaturas ya sea en servicio o en fabricación (soldadura). Ellos son: sensitización, corrosión intergranular, fisuración en caliente y formación de fase sigma.

Si se desea estimar sobre la base de las composiciones del metal de aporte y el metal base, se pueden utilizar diversos diagramas desarrollados para este fin.

1.10. El diagrama de SCHAEFFLER: el más viejo de estos diagramas es el de Schaeffler, realizado en 1948. El mismo interrelaciona la composición química del metal con la estructura metalográfica y posee una importancia vital en la determinación de las condiciones de soldabilidad de los materiales estudiados. Esta interrelación agrupa a los elementos de aleación, en dos grandes grupos:

- Los que favorecen la formación de la fase ferrítica (alfágenos).
- Los que favorecen la formación de la fase austenítica (gammágeno).

Procede de su antecesor, el diagrama de **MAURER** que muestra las estructuras que va a presentar un acero al Cr- Ni de acuerdo a los porcentajes verdaderos de Cr y Ni. Antón Schaeffler lo mejoró en el sentido de tener en cuenta las propiedades Alfágenas de los elementos de aleación con el equivalente en Cr y las propiedades Gammágenas con el equivalente en Ni por intermedio de coeficientes de equivalencia. Muestra claramente el dominio de las fases Ferrítica,

Martensítica y Austenítica propias de los Aceros Inoxidables cuando son enfriados a las velocidades de soldadura. Cuando es necesario soldar aceros inoxidable, dos son las condiciones necesarias: que la composición química de la soldadura sea similar a la del material base con el objeto de resistir a la corrosión, que la estructura tenga las características mecánicas apropiadas.

La segunda condición depende en qué punto del diagrama se ubique el metal de soldadura que es una mezcla de los metales base y de aporte, que pueden ser distintos (soldaduras disímiles).

En el eje vertical, llamado equivalente en Níquel están los elementos de aleación Gammágenos, C, Ni y Mn. Ya que su influencia no es igual están afectados por un factor. En el eje horizontal se muestra el equivalente en Cr donde están los elementos Alfágenos Cr, Mo, Si y Nb cada uno con el factor correspondiente. Las cuales se calculan con las siguientes ecuaciones:

$$\text{Cromo equivalente} = \%Cr + \%Mo + 1,5x \% Si + 0,5x \% Nb$$

$$\text{Níquel Equivalente} = (\% Ni + 30x \% C) + 0,5x \% Mn$$

En el caso de aceros al carbono es necesario considerar la descarburación que se produce durante la Soldadura que alcanza valores de alrededor del 50%, por lo que en la fórmula del Ni Equivalente se reemplaza el coeficiente 30x %C por 15x %C.

El área de especial interés es la zona bifásica, de Ferrita más Austenita donde la exactitud de este diagrama es de aproximadamente 4% de ferrita. Ya que la ferrita es magnética y la Austenita no, la cantidad de ferrita en una soldadura puede verificarse midiendo su atracción magnética, la que es directamente proporcional a la cantidad presente. Aunque no totalmente, el Diagrama de Schaeffler, es lo suficientemente exacto para indicar la presencia del porcentaje máximo o mínimo deseado de ferrita. El trabajo original de Antón Schaeffler fue realizado con soldadura manual con electrodos revestidos donde se asumía que los depósitos contenían alrededor de 0,06% de N, un potente estabilizador de Austenita. (Anexo I, Fig. A8)

A pesar de su largo uso es hoy anticuado por no considerar el efecto del N y por la falta de exactitud del porcentaje de ferrita del metal depositado entre los ajustes dados por el diagrama. Así pues, con el incremento del uso de otros procesos de soldadura como GMAW, Arco Sumergido, Sistemas auto protegidos se incorporan del aire atmosférico al metal fundido diferentes cantidades de N haciendo necesario incluir al N como un elemento más con el factor correspondiente.

En estos casos es preferible utilizar una revisión del diagrama de Schaeffler, llamado diagrama de **DELONG** (Anexo I, Fig. A9) a la hora de tener en cuenta la influencia del N₂ de igual poder que el C. La Ferrita se distribuye uniformemente en la matriz austenítica, la medición por medios magnéticos de la misma corresponde a un área y es el promedio de la misma. El diagrama de DELONG fue desarrollado en 1973 con el uso de la estimación del nivel de ferrita a través del

número de ferrita (Nf). Sin embargo la mayor diferencia; lo constituye la incorporación del N en el Ni Equivalente, **Níquel Equivalente = (% Ni + 30x % C + 30x % N) + 0,5x % Mn**

El Nf para bajos niveles puede ser considerado el % de ferrita. La determinación del N₂ presenta algunas dificultades al requerir un análisis de este gas. En ausencia de este dato se recomienda emplear valores aproximados en función del proceso de soldadura (Anexo II, Tabla A2)

El Nf puede ser medido directamente en el metal depositado por las propiedades magnéticas de la ferrita, muchos instrumentos para este fin son producidos comercialmente. Dicha cantidad no depende únicamente de la composición química, existen otros factores que influyen en la misma, entre estos factores se pueden citar:

La operación del proceso (longitud de arco, contaminación atmosférica, etc.)

- La velocidad de enfriamiento.
- La forma del depósito y el solape del cordón.
- Los parámetros de soldadura.

Por todo lo anterior, no es extraño que puedan detectarse variaciones significativas en el contenido de ferrita de una soldadura a otra y dentro de ella, entre la raíz y la última capa de la misma. Por ejemplo, en la soldadura de tuberías se ha encontrado aproximadamente la mitad de las uniones examinadas diferían en 2 como mínimo, de los valores obtenidos durante la calificación del procedimiento. Es por ello que en las aplicaciones donde el contenido de ferrita en el metal depositado sea crítico, el procedimiento de soldadura debe controlarse rigurosamente. (ASM Specialty Handbook. Stainless Steel, 1994)

Esto más que otra cosa significa control de la dilución.

1.11. Dilución: no es más que el grado de participación del metal de aporte en el metal depositado. La forma de expresar la dilución está dada por el coeficiente de dilución. (Anexo I, Fig. A10) Este coeficiente expresa el grado de participación del metal de aporte en el metal base en las capas depositadas durante la soldadura. (Rodríguez, 2007)

Es importante conocer el coeficiente de dilución, pues permite determinar con alto grado de aproximación las características desde el punto de vista de composición química de los depósitos.

$$\%Ex = D - \%Ex Mb + (1-D)*\%EMa$$

Donde; %Ex: % del elemento en la zona fundida %ExMa: % del elemento en el MA

%ExMb: % del elemento en el MB D: coeficiente de dilución

Este coeficiente de dilución se encuentra afectado por los siguientes factores:

- Corrientes y polaridad
- Oscilación del electrodo
- Longitud de arco
- Espaciamiento entre cordones
- Velocidad de traslación

Corriente de soldadura: a medida que aumenta, también lo hace la presión del arco, generando más violencia en el arco sobre el metal base y facilitando una mayor mezcla.

La polaridad de la corriente: para proceso SMAW, la corriente continua con polaridad normal proporciona mayor dilución debido a una mayor penetración que con polaridad invertida. La corriente alterna determina una dilución intermedia. Para proceso SAW esto es contrario.

La longitud de arco: su aumento conlleva a una disminución de la dilución debido a que el metal llega a la fusión a una temperatura más alta, por lo que parte del calor se utiliza en el calentamiento del mismo y no en calentar el metal base.

El espaciamiento de los cordones: este también influye, por ejemplo, el solapamiento hasta un 50 % puede reducir la dilución de un 30% a un 10% debido a que se está depositando no sólo sobre el material base sino sobre otro de naturaleza diferente.

La oscilación del electrodo: hacia los costados reduce la dilución, ya que disminuye la cantidad de calor concentrado en un punto. Al igual que al aumentar la velocidad de traslación del arco.

El más reciente diagrama es el **WRC-1988**, el cual es considerado el más exacto hasta el presente. En este el Ni equivalente y el Cr equivalente difieren de los utilizados en el de SHAEFFLER y en el DELONG. El número de ferrita puede ser estimado trazando a través del diagrama líneas horizontales para el Ni equivalente y líneas verticales para el Cr equivalente. El número de ferrita se indica en el punto de interrupción de ambas líneas. Las predicciones realizadas por los diagramas WRC y DELONG para grados comunes del acero 308 son similares, pero en el WRC generalmente es más preciso para los grados menos comunes de alto manganeso austeníticos o dúplex austeníticos-ferríticos. (Anexo I, Fig. A11)

1.12. Problemas comunes de la soldadura de aceros inoxidable y su solución: cuando se sueldan aceros al carbono, la consideración principal es la resistencia mecánica de la unión soldada, el material de aporte puede ser de cualquier composición química mientras conserve las propiedades mecánicas del material base. La apariencia y resistencia a la corrosión de la junta son consideraciones secundarias. Todos los aceros inoxidable austeníticos, tienen en general propiedades mecánicas comparables, y por lo tanto de consideración secundaria con respecto a la resistencia a la corrosión y apariencia. Mientras que la resistencia de una junta representa los valores promedio de un volumen importante de material, la corrosión puede tener lugar en áreas tan pequeñas como una picadura donde la causa puede ser la contaminación, cantidad de impurezas en el material, etc. La mayoría de los defectos en los aceros inoxidable son el resultado de no seguir procedimientos apropiados y comprobados y no por que sean diferentes de los más familiares aceros al carbono.

Usar productos de calidad: la materia prima, chapa, caños o tubos, y materiales de aporte deben conformar ciertos niveles de calidad especificados ya sea por AWS, ASME, o alguna otra norma. Las soldaduras deben ser ensayadas por tinte penetrante y/o ultrasonido para asegurar una junta

sana. Un cuidadoso procedimiento de Soldadura es esencial para minimizar las indicaciones de defectos, los que deberán ser removidos. La reparación de una soldadura eleva el costo alrededor de tres veces, la primera vez se paga por hacer la soldadura defectuosa, la segunda se paga por removerla con amolado o mecanizado y la tercera por realizarla, esta vez correctamente.

Diseño de junta: es esencial un diseño de junta apropiado, una junta muy angosta dificulta el acceso del electrodo o material de aporte e impide una correcta remoción de la escoria. Por el contrario una junta muy ancha requiere mucho material de aporte y eso aumenta el costo de la soldadura. Un ángulo de 60° es considerado correcto excepto para secciones gruesas que se utiliza en la junta tipo U. La separación de los bordes en la raíz debe ser igual al ϕ del electrodo.

Forma y disposición de los cordones de soldadura: deben evitarse los cordones cuya sección sea demasiado puntiaguda o demasiada plana. Esto produce poca penetración e inclusiones los que serán revelados por radiografía. Las inclusiones de escoria en algunas áreas causan que la soldadura falle en el ensayo de doblado. El paso de la onda o ancho del cordón no deberá ser de más de 2,5 veces el diámetro del electrodo. De igual forma, la intensidad de corriente y el voltaje deben ser los apropiados y deben estar especificados en el procedimiento de soldadura.

Fácil remoción de la escoria: las juntas deben diseñarse con suficiente espacio para poder remover la escoria fácilmente. La escoria de electrodos AC - DC rútilicos usualmente se rompe en trozos grandes, en cambio los electrodos básicos se rompen en partículas pequeñas difíciles de eliminar. Por ello se prefieren soldaduras con perfiles lisos, sin anfractuosidades lo que hace del trabajo de cepillado más fácil. Se suelen utilizar puntas agudas y cepillos de acero inoxidable.

Humedad: la fuente más obvia es el agua, suele producir porosidad produciendo el rechazo de la unión soldada. El agua utilizada para enfriar la soldadura de inoxidable rara vez produce problemas por que el soldador se asegura que esté seco antes de seguir con la soldadura. Una fuente de humedad menos obvia que debe ser considerada son guantes húmedos o transpirados, trapos húmedos, derrames de bebidas sobre la soldadura, mangueras que pierden agua, mangueras de aire utilizadas para remover la escoria. En condiciones de mucha humedad, hay condensaciones de agua en el tanque del compresor, en el sistema de provisión de aire comprimido o en la manguera y el soldador inadvertidamente puede pulverizar agua sobre la junta. También hay que prevenir cuando hay grandes variaciones de temperatura ambiente que produzcan condensación. La humedad, sobre todo en la noche, puede ser un problema, si esta es alta puede producirse condensación en las paredes del bisel especialmente si la chapa o cañería es introducida en un ambiente más calido desde el exterior frío. Si la humedad no es removida calentando con una antorcha o con sopleteo con aire seco antes de soldar se producirá dificultad en la remoción de la escoria y porosidad.

Fuentes de carbono: las fuentes de contaminación con C en los talleres de soldadura son: pinturas, lacas, compuestos, y el siempre tan peligrosamente cerca de la soldadura, lápiz para escribir sobre metal de base grasa o cera. Las identificaciones o instrucciones escritas con tales lápices deben removerse antes de soldar para evitar contaminación de la soldadura.

Limpieza: es importante la remoción de la escoria para evitar que quede atrapada entre las capas de soldaduras multipasadas. También lo es la limpieza del cordón una vez finalizada la soldadura y antes que esta abandone el taller. Una fuente común de contaminación son las diminutas partículas de acero al C esparcidas por el aire por los discos de amolar en áreas adyacentes. Las soldaduras de aceros inoxidable que contienen ferrita se tornan electromagnéticas a causa de la polarización de la soldadura por efecto de la corriente continua del proceso de soldadura. Para obtener una radiografía clara es necesario que la superficie de la soldadura este libre de irregularidades. Debe removerse toda traza de suciedad, grasa o materia extraña por intermedio de decapado, desengrasado, mecanizado o amolado. Debe usarse exclusivamente cepillos de acero inoxidable para evitar contaminación.

La fisuración en los aceros inoxidable puede ser causada por varios factores, incluyendo: cráteres sin llenar, arco demasiado largo al comenzar y terminar la soldadura, sobrecalentamiento de la pieza a soldar, excesivamente velocidad de avance, diseño de junta incorrecto, elección de electrodo incorrecto. No se requiere una penetración profunda, ya que en el caso de aceros inoxidable estos están limpios y lisos y no se requiere una gran fuerza del arco para producir buena penetración. Sólo se necesita una suficiente penetración para sellar la raíz y el espacio entre la última pasada y el bisel. Fisuras descubiertas por rayos x deben evaluarse individualmente. El seguimiento del procedimiento de soldadura apropiado produce cordones lisos y densos donde la escoria puede removerse totalmente con facilidad, dejando una superficie limpia para recibir la pasada siguiente. (Welding Handbook, 2007)

1.13. Propiedades mecánicas de los materiales: la resistencia de un material depende de su capacidad para soportar una carga sin deformación excesiva o de falla. Esta propiedad es inherente al material mismo y debe determinarse por experimentación. Se han desarrollado varios tipos de pruebas para evaluar la resistencia del material bajo cargas estáticas, cíclicas, de duración prolongada o producidas por impacto. En el curso de los años cada una de estas pruebas se ha estandarizado, de modo que pueden compararse los resultados obtenidos por diferentes laboratorios. Entre las pruebas más importantes están las pruebas de tracción y de compresión, las cuales se utilizan principalmente para determinar la relación entre el esfuerzo normal promedio y la deformación unitaria en muchos materiales utilizados en ingeniería, sean de metal, cerámica, polímeros o compuestos. (Smith, 2004)

El ensayo de tracción es una de las pruebas más usadas para valorar las propiedades mecánicas de los materiales, permite determinar características mecánicas importantes, que pasan a ser criterios de calidad necesarios para los cálculos de construcción. Dentro de las normas nacionales e internacionales más relevantes en materia de ensayo de tracción se encuentran:

- UNE EN-10 002 (marzo 97)
- ASTM E 8 – 01
- Covenin 77.040.10
- *ASM Handbook, Volume 8, Mechanical Testing*

El ensayo de impacto: otra propiedad importante en el estudio del material y las uniones soldadas es la tenacidad a la entalla, la cual es la aptitud de un material para resistir sollicitaciones del tipo choque y se mide determinando la energía absorbida por la rotura del material. La prueba consiste en romper, de un solo golpe, con un mazo de caída pendular, una probeta de forma y dimensiones específicas, apoyada en sus extremos, mediante la aplicación de la carga aplicada instantáneamente con su valor máximo. El valor de la tenacidad de entalle viene dado por la relación entre el trabajo en kilogramos absorbido por la rotura de la probeta y el área en centímetros cuadrados de la sección recta de la probeta en el plano de la muesca. Las normas que rigen las dimensiones estándar son las siguientes

- UNE 7056
- ASTM E23-02
- Normas Covenin 77.040.10
- *ASM Handbook, Volume 8, Mechanical Testing*

Prueba o ensayo de microdureza Vickers: en esta prueba, el instrumento utiliza un marcador piramidal de diamante de base cuadrada con ángulo de inclinación de 136° entre caras opuestas. El intervalo de carga se encuentra entre 1 kg y 120 kg, y funciona en forma similar a la escala de Brinell, tal que los valores son reportados en términos de carga y área de la impresión. Como resultado de la forma del penetrador, la impresión sobre la superficie de la muestra resulta un cuadrado, donde su diagonal es medida mediante un microscopio equipado con un micrómetro ocular que contiene filos móviles. La impresión es pequeña y por ello o se usa un microscopio o debe pulirse la superficie antes de realizar la prueba y el indentador debe estar a 90° de la superficie. Dentro de las normas nacionales e internacionales más relevantes en materia de ensayo de dureza se encuentran:

- ASTM E92-82 (1997) e3
- Normas Covenin 77.040.10
- *ASM Handbook, Volume 8, Mechanical Testing*

El fenómeno de fatiga: en ingeniería y, en especial, en ciencia y tecnología de materiales, la fatiga de materiales se refiere al fenómeno por el cual la rotura de los materiales bajo cargas dinámicas cíclicas (fuerzas repetidas aplicadas sobre el material) se produce ante cargas inferiores a las cargas estáticas que producirían la rotura. Un ejemplo de ello se tiene en un alambre: flexionándolo repetidamente se rompe con facilidad, pero la fuerza que hay que hacer para romperlo en una sola flexión es muy grande. La fatiga es una forma de rotura que ocurre en estructuras sometidas a tensiones dinámicas y fluctuantes (puentes, automóviles, aviones, etc.). Su principal peligro es que puede ocurrir a una tensión menor que la resistencia a tracción o el límite elástico para una carga estática, y aparecer sin previo aviso, causando roturas catastróficas. Es un fenómeno importante, ya que es la primera causa de rotura de los materiales metálicos (aproximadamente el 90%), aunque también está presente en polímeros y en cerámicas.

La rotura por fatiga tiene aspecto frágil, aun en metales dúctiles, puesto que no hay apenas deformación plástica asociada a la rotura. El proceso consiste en un inicio y posterior propagación de fisuras, que crecen desde un tamaño inicial microscópico hasta un tamaño macroscópico capaz de comprometer la integridad estructural del material. La superficie de fractura es perpendicular a la dirección del esfuerzo. Aunque es un fenómeno que, sin definición formal, era reconocido desde la antigüedad, este comportamiento no fue de interés real hasta la revolución industrial, cuando, a mediados del siglo XIX comenzaron a producirse roturas en los ejes de las ruedas de los trenes, que pugnaban, por aquel entonces, por imponerse como medio de locomoción. Por otra parte, para estudiar el fenómeno de fatiga en los materiales, se hace referencia a las observaciones de metales que han estado sometidas a esfuerzos repetitivos o cíclicos los cuales fallan con esfuerzos mucho más pequeños que aquellas sometidas a la aplicación de un único esfuerzo estático. Estas fallas, que suceden bajo esfuerzos repetitivos o cíclicos, son denominados fallos de fatiga. Ejemplos de partes de máquinas expuestas comúnmente a fallas de fatiga son las partes en movimiento tales como árboles de los motores, barras conectoras y engranajes. Algunas estimaciones de fallos en máquinas atribuyen alrededor de un 80 por 100 a la acción directa de fallas de fatiga. Un fallo de fatiga generalmente se origina en un punto de concentración del esfuerzo, como puede ser el borde de un filo, o en una inclusión metalúrgica o imperfección. Una vez generada, la fractura se propaga a través de la parte que está bajo los esfuerzos cíclicos o repetitivos. Durante esta etapa del proceso de fatiga se crean las marcas de playa, apreciados con facilidad en macrografías de fallas por fatiga. La sección restante, al ser tan pequeña, no puede soportar la carga durante más tiempo y se produce la fractura completa. Cambios estructurales básicos que se presentan en metales dúctiles durante el proceso de fatiga: cuando se somete una muestra de un metal dúctil homogéneo a esfuerzos cíclicos, se producen los siguientes cambios estructurales durante el proceso:

1. Iniciación de la fractura. Aparecen los primeros síntomas del daño ocasionado por fatiga.
2. Crecimiento de la banda de deslizamiento de la fractura. La iniciación de la fractura se debe a que la deformación plástica no es un proceso completamente reversible. La deformación plástica en una dirección, alternativamente en un sentido y después en sentido opuesto, origina arrugas superficiales y ranuras llamadas extrusiones en banda deslizante e intrusiones en banda deslizante que se crean en la superficie de la muestra de metal, además del daño dentro del metal a lo largo de bandas de deslizamiento persistentes. Las irregularidades superficiales y el daño a lo largo de las bandas de deslizamiento persistentes dan fracturas que se forman en o cerca de la superficie, las cuales se propagan dentro de la muestra a lo largo de planos sometidos a altos esfuerzos cortantes. Esto se llama fase I del crecimiento de la fractura por fatiga en que la velocidad de crecimiento de la fractura.
3. Crecimiento de la fractura en planos de alto esfuerzo de tracción. Durante la fase I la fractura puede crecer en un metal policristalino solamente unos diámetros granulares antes de que cambie su dirección para ser perpendicular a la dirección del esfuerzo de máxima tensión en la muestra de metal. En esta fase II del crecimiento de la fractura, una fractura bien definida se propaga a una escala relativamente rápida y se crean estrías por fatiga a medida que la fractura avanza a través de la sección transversal de la muestra de metal. Estas estrías son útiles en los análisis de fallos por fatiga para la determinación del origen y la dirección de propagación de las fracturas por fatiga.
4. Fallo dúctil terminal. Finalmente, cuando la fractura cubre un área suficiente para que el metal restante en la sección transversal no pueda soportar la carga aplicada, la muestra se rompe por un fallo dúctil.

Factores que afectan la resistencia a la fatiga de un metal: además de la composición química del propio metal, existen otros factores, algunos de los más importantes son:

1. Concentración de esfuerzos. La resistencia a la fatiga se encuentra sumamente reducida por la presencia de aumentos de tensión tales como: hendiduras, agujeros, cuñas o cambios bruscos en la sección. Los fallos de fatiga pueden ser minimizados con un diseño cuidadoso para evitar aumentos de tensión cuantas veces sea posible.
2. Rugosidades superficiales. En general, cuanto más lisa sea la superficie final de la muestra del metal, mayor será la resistencia a la fatiga. La rugosidad de la superficie crea aumentos de tensión que facilitan la formación de la rotura por fatiga.
3. Estado de la superficie. Puesto que los fallos por fatiga se originan en la superficie del metal, cualquier cambio en las condiciones de la superficie afectarán la resistencia a la fatiga del metal. Por ejemplo, tratamientos de endurecimiento de superficies de aceros,

tales como la carburización y la nutrición, que endurecen la superficie incrementando la vida frente a la fatiga. La descarburización, por otra parte, que reblandece la superficie del acero tratado térmicamente, reduce la vida a la fatiga. La introducción de un modelo de esfuerzos residuales compresibles incrementa la vida a la fatiga.

4. El medio ambiente. Si un ambiente corrosivo está presente durante los esfuerzos cíclicos de un metal, el ataque químico acelera grandemente la velocidad a la cual se propaga la fatiga. La combinación del ataque corrosivo y los esfuerzos cíclicos sobre un metal es conocido como fatiga por corrosión. (Forrest, 1982)

Teorías sobre la fatiga: para explicar el fenómeno se propusieron teorías que justificaban la pérdida de resistencia mecánica en la alteración de la estructura interna del acero por campos magnéticos o por el propio giro del eje. Por absurdas que puedan parecer estas teorías, hay que tener en cuenta que por entonces los conocimientos relativos a la estructura interna de los materiales eran muy limitados, aunque se sabía que el proceso de fabricación condicionaba la textura del material confiriéndole unas determinadas propiedades. No es extraño entonces que se razonara que la rotura inesperada se produjera por la transformación de la estructura «fibrosa» del acero en una estructura «cristalina», sin que los mismos que defendían estas teorías supieran muy bien a qué se referían. Hacia 1845, Rankine demostró que la reducción de las concentraciones de tensiones alargaba la vida del eje. Posteriormente, hacia 1860, Wöhler desarrolló diversas máquinas de ensayo para el estudio sistemático del fenómeno, una de las cuales, la probeta rotatoria, inspira los actuales ensayos de fatiga de materiales. Wöhler extrajo dos conclusiones de aquellos ensayos: la primera, que las fuerzas necesarias para provocar la rotura con cargas dinámicas son muy inferiores a las necesarias en el caso estático, y la segunda, que existe un umbral por debajo del cual las probetas no se rompían (límite de fatiga). Ya en el siglo XX, Humfrey y Ewing observaron que, bajo cargas dinámicas, aparecían deformaciones por deslizamiento similares a las obtenidas en el caso estático, de modo que el progreso de dichas líneas era el que conducía a la rotura. Posteriormente, Hanson y Gough introdujeron la hipótesis del endurecimiento por deformación (acritud) para explicar la existencia del límite de fatiga, de modo que con cargas pequeñas el endurecimiento llegaba a compensar y detener el avance del deslizamiento. Actualmente, aunque se acepta la teoría del endurecimiento-deslizamiento, no existe al momento formulación cuantitativa que permita realizar un cálculo fiable. No obstante, la multitud de datos disponibles, especialmente para materiales férricos y otros materiales metálicos, ha permitido desarrollar métodos de cálculo para el diseño de piezas confiables.

La tensión puede ser axial (tensión y compresión), de flexión o torsional. En general, son posibles tres modos distintos de tensión fluctuante en el tiempo:

1. Representado esquemáticamente por una onda senoidal del tiempo, en la que la amplitud es simétrica y varía de un valor máximo a un mínimo igual a la tensión aplicada. Se denomina ciclo de carga invertida.
2. Denominado ciclo de carga repetida, los máximos y mínimos son asimétricos con respecto al nivel cero de carga.
3. Aleatorio: el nivel de tensión puede variar al azar en amplitud y frecuencia.

La amplitud de la tensión varía alrededor de un valor medio, el promedio de las tensiones máxima y mínima en cada ciclo
$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}$$

El intervalo de tensiones es la diferencia entre tensión máxima y mínima
$$\sigma_r = \sigma_{max} - \sigma_{min}$$

La amplitud de tensión es la mitad del intervalo de tensiones
$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} = \frac{\sigma_r}{2}$$

El cociente de tensiones R es el cociente entre las amplitudes mínima y máxima
$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$$

Por convención, los esfuerzos a tracción son positivos y los de compresión son negativos. Para el caso de un ciclo con inversión completa de carga, el valor de R es igual a -1 (Fig. 20)

Onda senoidal. En este caso hay que imaginar que la tensión representada es una tensión con ciclos de tracción (cuando es positiva) y de compresión (cuando es negativa).

Curva S-N (Esfuerzo – Número de ciclos): Esta curva se obtiene a través de una serie de ensayos donde una probeta del material se somete a tensiones cíclicas con una amplitud máxima relativamente grande (aproximadamente 2/3 de la resistencia estática a tracción)

Se cuentan los ciclos hasta rotura. Este procedimiento se repite en otras probetas a amplitudes máximas decrecientes. Los resultados se representan en un diagrama de tensión, S, frente al logaritmo del número N de ciclos hasta la rotura para cada una de las probetas. Los valores de S se toman normalmente como amplitudes de la tensión σ_a . Se pueden obtener dos tipos de curvas S-N. A mayor tensión, menor número de ciclos hasta rotura. En algunas aleaciones férreas y en aleaciones de titanio, la curva S-N se hace horizontal para valores grandes de N, es decir, existe una tensión límite, denominada límite de fatiga, por debajo del cual la rotura por fatiga no ocurrirá. Se puede observar cómo la curva decrece y tiende a decrecer hasta llegar a rotura. Muchas de las aleaciones no férreas (aluminio, cobre, magnesio, etc.) no tienen un límite de fatiga, dado que la curva S-N continúa decreciendo al aumentar N. La rotura por fatiga ocurrirá independientemente de la magnitud de la tensión máxima aplicada, y por tanto, para estos materiales, la respuesta a fatiga se especificaría mediante la resistencia a la fatiga que se define como el nivel de tensión que produce la rotura después de un determinado número de ciclos. En rigor, todo material metálico presenta un límite de fatiga. Ocurre que para materiales como la

mayoría de los ferrosos, dicho límite suele situarse en el entorno del millón de ciclos (para ensayos de probeta rotatoria), para tensiones internas que rondan 0,7-0,45 veces el límite elástico del material; mientras que para aquellos que se dicen sin límite de fatiga, como el aluminio se dan para tensiones muy bajas (en el aluminio, de 0,1-0,2 veces dicho límite), y aparece a ciclos muy elevados (en el aluminio puede alcanzar los mil millones de ciclos; en el titanio pueden ser, según aleaciones, cien millones de ciclos o incluso, excepcionalmente un billón de ciclos). Como en general no se diseñan máquinas ni elementos de manera que las máximas tensiones sean de 0,1-0,2 veces el límite elástico del material, pues en ese caso se estarían desaprovechando buena parte de las capacidades mecánicas del material, y como tampoco se suele diseñar asumiendo valores de vida por encima del millón de ciclo, en la práctica este tipo de materiales no van a poder presentar su límite de fatiga, aunque lo tienen. Esta confusión surge de la propia naturaleza de las curvas S-N de Wöhler, que fueron concebidas en el siglo XIX para los aceros. Al ampliarse el tipo de materiales metálicos usuales en ingeniería, los mismos conceptos y las mismas curvas se trasladaron a otros metales cuyo comportamiento a fatiga es esencialmente diferente (de hecho, es una característica propia de la fatiga la gran variabilidad de comportamientos que presenta en los distintos tipos de materiales). Y como quiera que el acero ha sido y es la piedra de toque de la ingeniería, interesa comparar las propiedades de los demás metales con respecto al mismo: es y era común que, al ensayar materiales, los ensayos se suspendieran una vez superado el millón de ciclos, considerando que no interesaba caracterizar materiales por encima de ese límite temporal. Otro parámetro importante que caracteriza el comportamiento a fatiga de un material es la vida a fatiga N_f . Es el número de ciclos para producir una rotura a un nivel especificado de tensiones. Además, el conocimiento del comportamiento a fatiga no es igual en todos los materiales: el material mejor conocido, más ensayado y más fiable en cuanto a predicciones a fatiga es la familia de los aceros. De otros materiales metálicos de uso común como el aluminio, el titanio, aleaciones de cobre, níquel, magnesio o cromo, se dispone de menos información, aunque la forma de los criterios de cálculo a fatiga y de las curvas S-N parece regular, y es parecida a la de los de los aceros, y se considera que su fiabilidad es alta. Para materiales cerámicos, por el contrario, se dispone de muy poca información, y de hecho, el estudio de la fatiga en ellos y en polímeros y materiales compuestos es un tema de candente investigación actual.

En todo caso, existe una diferencia notable entre la teoría y la realidad. Esto conduce a incertidumbres significativas en el diseño cuando la vida a fatiga o el límite de fatiga son considerados. La dispersión en los resultados es una consecuencia de la sensibilidad de fatiga a varios parámetros del ensayo y del material que son imposibles de controlar de forma precisa. Estos parámetros incluyen la fabricación de las probetas y la preparación de las superficies, variables metalúrgicas, alineamiento de la probeta en el equipo de ensayos, tensión media y

frecuencia del ensayo. Aproximadamente la mitad de las probetas ensayadas se rompen a niveles de tensión que están cerca del 25% por debajo de la curva. Esto suele asociarse a la presencia de fuentes de concentración de tensiones internas, como defectos, impurezas, entallas, ralladuras que han permanecido indetectadas. Se han desarrollado técnicas estadísticas y se han utilizado para manejar este fallo en términos de probabilidades. Una manera adecuada de presentar los resultados tratados de esta manera es con una serie de curvas de probabilidad constante.

- Fatiga de bajo número de ciclos (oligo fatiga) $< 10^3 - 10^5$ ciclos.
- Fatiga de alto número de ciclos $> 10^3 - 10^5$ ciclos.

Inicio y propagación de la grieta: El proceso de rotura por fatiga se desarrolla a partir del inicio de la grieta y se continúa con su propagación y la rotura final.

Inicio: Las grietas que originan la rotura o fractura casi siempre nuclear sobre la superficie en un punto donde existen concentraciones de tensión (originadas por diseño o acabados, ver Factores). Las cargas cíclicas pueden producir discontinuidades superficiales microscópicas a partir de escalones producidos por deslizamiento de dislocaciones, los cuales actuarán como concentradores de la tensión y, por tanto, como lugares de nucleación de grietas.

Propagación:

- Etapa I: una vez nucleada una grieta, entonces se propaga muy lentamente y, en metales policristalinos, a lo largo de planos cristalográficos de tensión de cizalladura alta; las grietas normalmente se extienden en pocos granos en esta fase.
- Etapa II: la velocidad de extensión de la grieta aumenta de manera vertiginosa y en este punto la grieta deja de crecer en el eje del esfuerzo aplicado para comenzar a crecer en dirección perpendicular al esfuerzo aplicado. La grieta crece por un proceso de enromamiento y agudizamiento de la punta a causa de los ciclos de tensión.

Rotura: Al mismo tiempo que la grieta aumenta en anchura, el extremo avanza por continua deformación por cizalladura hasta que alcanza una configuración enromada. Se alcanza una dimensión crítica de la grieta y se produce la rotura. La región de una superficie de fractura que se formó durante la etapa II de propagación puede caracterizarse por dos tipos de marcas, denominadas marcas de playa y estrías. Ambas indican la posición del extremo de la grieta en diferentes instantes y tienen el aspecto de crestas concéntricas que se expanden desde los puntos de iniciación. Las marcas de playa son macroscópicas y pueden verse a simple vista. Las marcas de playa y estrías no aparecen en roturas rápidas.

El ensayo de fatiga: un método común para medir la resistencia a la fatiga de un material es el ensayo de la viga rotatoria en voladizo. Uno de los extremos de la probeta cilíndrica de forma normalizada, se sujeta al eje de un motor; mientras que, en el extremo opuesto, se suspende un

peso. Inicialmente la probeta tiene una fuerza de tensión actuando sobre la superficie o fibra superior, en tanto que la inferior está sometida a compresión. Cuando la probeta gira 90°, los puntos que originalmente estaban bajo tensión y compresión no están sujetos a esfuerzo alguno. Sin embargo, para el caso de los ensayos realizados durante la presente investigación se utilizó la fatiga axial, aplicando cargas de tracción con una frecuencia de 1 ciclo por segundo.

Después de un número suficiente de ciclos, la probeta puede fallar. Generalmente se prueba una serie de muestras a diferentes esfuerzos para, finalmente, presentar los resultados graficando el esfuerzo en función del número de ciclos para la falla, (diagrama o curva de Whöler)

Los factores que influyen en la resistencia a la fatiga se pueden clasificar en cuatro grupos: efectos del material, efectos ambientales, efectos de fabricación y efectos varios. A continuación los más destacados.

Efectos del material:

- Composición química
- Condición de la falla
- Tamaño y forma
- Velocidad
- Bajo esforzado y sobre esforzado

Efectos ambientales:

- Corrosión
- Períodos de reposo
- Superponer esfuerzos estáticos
- Temperatura
- Variación de amplitudes

Efectos de Fabricación:

- Desgaste por fatiga y por corrosión
- Tratamientos térmicos
- Métodos de fabricación
- Concentración de esfuerzos
- Tratamientos superficiales

Efectos Varios:

- Fatiga superficial
- Esfuerzos Combinados

El ensayo de fatiga predice el tiempo o número de ciclos que resistirá una pieza, o la carga máxima permisible que se puede aplicar para prevenir la falla del componente. (Forrest, 1982)

- **El esfuerzo límite de Fatiga:** definido como el esfuerzo por debajo del cual existe la probabilidad del 50% de que ocurrirá falla por fatiga, es el criterio de diseño preferido.
- **La Vida a Fatiga:** indica cuánto resiste un componente a un esfuerzo particular.
- **La Resistencia a la Fatiga:** es el esfuerzo máximo con el cual no ocurrirá fatiga en un número particular de ciclos. La resistencia a la fatiga es necesaria al diseñar con materiales como el aluminio y los polímeros ya que estos no presentan un esfuerzo límite para fatiga.
- **Relación de Fatiga:** en algunos materiales, incluyendo los aceros, el esfuerzo límite para la fatiga es aproximadamente la mitad de su resistencia a la tensión. La relación se conoce como Relación de Fatiga ≈ 0.5 (permite estimar propiedades de fatiga a través del ensayo de tensión convencional)

Defectos de Superficie: La mayoría de los materiales son sensibles a las muescas, siendo las propiedades a la fatiga particularmente sensibles a defectos en la superficie. Los defectos de diseño o de fabricación concentran los esfuerzos, reduciendo el esfuerzo límite para fatiga y la resistencia y vida a fatiga. La superficie del material debe pulirse finamente para minimizar la posibilidad de falla.

Aplicación de los ensayos de Fatiga: A menudo los componentes se someten a condiciones de carga que no generan esfuerzos iguales a tensión que a compresión. Por ejemplo, el esfuerzo máximo durante la compresión pudiera ser menor que el esfuerzo máximo a tensión. En otros casos, la carga puede quedar entre esfuerzo de tensión máximo y mínimo, entonces, la curva de resistencia a la fatiga se presenta como amplitud del esfuerzo en función del número de ciclos para la falla. Los dos resultados más importantes de una serie de ensayos de fatiga son la duración a la fatiga para un esfuerzo en particular, y el límite de resistencia a la fatiga para el material. La duración a la fatiga indica cuánto dura un componente cuando un esfuerzo σ se aplica repetidamente al material. Si se va a diseñar una pieza de acero de herramientas que debe soportar 100,000 ciclos durante su vida útil, entonces debe diseñarse de manera que el esfuerzo aplicado sea menor que 90,000 psi. El límite de resistencia a la fatiga es el esfuerzo por debajo del cual la falla por fatiga nunca ocurre. Para evitar que se rompa una herramienta de acero, se debe asegurar que el esfuerzo aplicado nunca sea mayor que 60,000 psi. Las fisuras o grietas de fatiga se inician en la superficie del Material al que se aplica el esfuerzo, donde los esfuerzos son máximos. Cualquier defecto de diseño o de fabricación en la superficie concentra los esfuerzos y propicia la formación de una fractura por fatiga. Algunas veces se obtienen superficies muy pulidas para minimizar la posibilidad de falla por fatiga. La resistencia a la fatiga se relaciona también con la resistencia del material en la superficie. En muchas aleaciones ferrosas el límite de resistencia a la fatiga es aproximadamente la mitad de la resistencia a la tensión del material. (Anexo I, Fig. A12). Esta relación entre ese límite y la resistencia citada es la relación de fatiga:

$$\text{Relación de fatiga} = \text{límite de resistencia a la fatiga} / \text{resistencia a la tensión} \approx 0.5$$

Si la resistencia a la tensión en la superficie del material se incrementa, también aumenta la resistencia a la fatiga. De modo similar, la temperatura influye en la resistencia a la fatiga. Conforme se eleva la temperatura del material, la resistencia disminuye, y por consiguiente, también disminuye la duración a la fatiga y el límite de resistencia. (Forrest, 1982)

Detección de las grietas producidas por fatiga: hay siempre un peligro de fractura por fatiga en las partes sometidas a esfuerzos fluctuantes y es necesario inspeccionarlas periódicamente si se quieren evitar las fallas. La inspección podría ser más efectiva en los procesos de fatiga si se pudiera percibir el daño en un estado poco avanzado y sería de gran valor disponer de un método

para detectar el peligro de fatiga antes de que apareciera la grieta. Desafortunadamente, aunque los cambios en ciertas propiedades físicas se pueden detectar en probetas, antes de que ocurra la grieta, no hay una indicación de un fallo inminente en condiciones de servicio. Sin embargo, hoy día es necesario contar con la detección de grietas producidas por fatiga. Esto presenta dificultades prácticas considerables, pues una grieta menor que $\frac{1}{4}$ " de longitud no puede realmente detectarse a menos que se sospeche su presencia. Se dispone de muchos métodos diferentes para la detección de grietas, teniendo cada uno de ellos ventajas para aplicaciones particulares. Los métodos más usuales son magnéticos, penetrantes, eléctricos y ultrasónicos.

1.14. Detección de fallas en uniones soldadas

Líquidos penetrantes: sirve para detectar grietas y discontinuidades en la superficie de materiales sólidos no porosos. Se utiliza con una gran capacidad de penetrar en las piezas por capilaridad. Tras eliminar el líquido sobrante de la superficie y transcurrido un tiempo se le aplica un revelador que exuda al penetrante hacia la superficie; el dibujo que se forma en la superficie del material nos orienta de la situación y relativo tamaño de las grietas. (Anexo I, Fig. A13). El ensayo se divide en cinco etapas bien diferenciadas:

- **Limpieza** y preparación previas de la superficie, la superficie debe estar limpia y seca, también libre de agua, u otros agentes,
- **Penetración**, aplicar el penetrante y dejar actuar el tiempo necesario,
- **Eliminación del exceso** de líquido penetrante, tratar de quitar los excesos de penetrante para que en la observación final haya suficiente contraste,
- **Revelado**, extractos del penetrante, hace que éste salga de las discontinuidades y se manifieste en la superficie del material. El contraste de colores, de revelados y penetrante indica la posición de las grietas o discontinuidades.
- **Observación**, es la fase para la que más experiencia se necesita ya que se deben sacar conclusiones veraces de lo que se vea.

Ultrasonido: se utilizan frecuencias superiores a los 20 Khz y son inaudibles para los humanos al no sobrepasar el umbral de la percepción acústica. Las ondas ultrasónicas se propagan en cualquier medio si son de tipo longitudinal y sólo en cuerpos sólidos si son transversales. Tienen la propiedad de propagarse en el vacío y de depender de la naturaleza de su medio de propagación en cuanto a su velocidad. Los ultrasonidos sufren fenómenos de reflexión, refracción y difusión, de igual forma que las ondas acústicas y luminosas, dependiendo su propagación de la impedancia acústica del medio en que lo hagan. De esta forma, cuando un haz de ultrasonidos llega a la superficie de separación de dos medios cuyas impedancias acústicas son diferentes, una parte del haz se refleja, otra es refractada, y una tercera, se difunde. En esta propiedad se basan

las aplicaciones de los ultrasonidos en los ensayos no destructivos, ya que una onda ultrasónica propagándose en un material es reflejada cuando se encuentra con la más tenue capa de aire.

Este ensayo se realiza sobre todo para ensayar materiales que puedan tener grietas o defectos en el interior de su estructura y que a simple vista no se pueden apreciar. Con esta prueba se pueden detectar y cuantificar en tamaño y grosor las posibles grietas o defectos internos del material. También se pueden medir espesores de piezas con una gran precisión.

Las uniones soldadas son comúnmente sometidas a diversos tipos de sollicitación cíclica cuando se encuentran en aplicaciones prácticas y, por tanto, el fallo por fatiga es común. En el caso de recipientes y tuberías a presión, por ejemplo, la resistencia mecánica de las uniones soldadas determina la resistencia de toda la estructura, por lo que la soldadura representa un importante factor en la estimación de la reducción de la vida útil de dichos componentes.

1.15. Artículos consultados: existen estudios sobre el comportamiento a la fatiga de uniones soldadas. Entre estos, cabe destacar los realizados y publicados por:

- **VALSAN, M. (1995)** llevaron a cabo un análisis comparativo del comportamiento a la fatiga de bajo ciclo en condiciones de alta temperatura, de uniones soldadas de aceros tipo 316L como MB, 316 MA. *“High temperature, low cycle fatigue behaviour of AISI type 316LN base metal, 316LN-316 weld joint and 316 all-weld metal”*.
- **CHENG, G. (1996)** investigaron la iniciación y propagación de grietas de fatiga de bajo ciclo en el cordón, ZAC y metal base en una unión soldada de un recipiente presurizado fabricado con un acero tipo 16MnR. *“Study on the ultrasonic fatigue test of 16MnR”*.
- **ZHAO, Y. (1999)** estudiaron la interacción y evolución de grietas cortas de fatiga en uniones soldadas de acero inoxidable tipo 1Cr18Ni9Ti, a través de la observación de réplicas. *“A Probabilistic Assessment of the Design S-N Curves for 1Cr18Ni9Ti Pipe-Welded Joint”*.
- **RUDOLPH, J. (2001)** reportan mejoras en el comportamiento mecánico ante cargas de fatiga, en uniones soldadas de recipientes a presión, mediante soldadura con electrodo de tungsteno, GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*) con tratamiento térmico post-soldadura. Igualmente hacen referencia a la no disposición de códigos o normas para el diseño de elementos soldados sometidos a carga de fatiga y se reportan curvas de fatiga para uniones soldadas de aceros de alta resistencia. **“Fatigue Lifetime Assessment Procedures For Welded Pressure Vessel Components”**.
- **RIVAS, A. (2003)** evaluaron las propiedades mecánicas de dos aceros disímiles unidos mediante soldadura con protección gaseosa y se reportan evaluación con y sin tratamiento post-soldadura, indicando comportamiento mecánico adecuado del acero soldado con el

electrodo de acero inoxidable austenítico, precalentado a 300 °C, a pesar de presentar altos valores de dureza en la ZAC. *“Comportamiento Mecánico De Un Acero 5cr-0,5mo Soldado Con Un Acero Inoxidable Austenítico 309mo”*.

- **BALASUBRAMANIAN, V. (2003)** evaluaron el comportamiento mecánico ante carga alternativa de un acero para recipientes, ASTM 517 grado F, mediante la comparación de los procesos de soldadura por arco eléctrico SMAW (*Shield Metal Arc Welding*) y FCAW (*Flux Cored Arc Welding*). Reportan, para el proceso SMAW, inferior velocidad de crecimiento de grieta así como, mayor resistencia a la fatiga, contenido de martensita en la ZAC y bainita en la ZAC del proceso FCAW. *“Effect Of Welding Processes On Toe Cracking Behaviour Of Pressure Vessel Grade”*.
- **MASAKI, K. (2004)** evaluaron el comportamiento mecánico de un acero inoxidable ante fatiga rotativa y reporta inicios de grieta al 60% de la vida de fatiga, grieta desarrollada lentamente en forma superficial y hasta que la grieta radial llegó a un intervalo de profundidad de 150 y 350 µm, luego de estas profundidades se produjo la falla súbita. *“Initiation And Propagation Behaviour Of Fatigue Cracks In Hard-Shot Peened Type 316l Steel In High Cycle Fatigue”*.
- **CHEN, X. y ZHAO, Y. (2005)** llevaron a cabo una investigación sobre el comportamiento a la fatiga de un acero inoxidable del tipo 1Cr18Ni9Ti y en las uniones soldadas de una tubería sometidas a presión interna cíclica. *“Evaluation of fatigue amage at welded tuve joint under cyclic pressure using surface hardness measurement”*.

Además de las propiedades de fatiga, en años recientes, también ha sido de interés, el estudio de las propiedades mecánicas en tracción de las juntas soldadas de los aceros inoxidables, tanto austeníticos como dúplex. En este sentido;

- **AMIGÓ, V. (2005)** han llevado a cabo una investigación a fin de evaluar la influencia de la velocidad de soldadura en las propiedades a tracción de uniones soldadas por láser, de chapas de acero inoxidables dúplex. Dicho estudio, también, involucró la observación de la microestructura de los cordones obtenidos y de la ZAC mediante técnicas de microscopía óptica y electrónica de barrido, así como la determinación de diferentes perfiles de microdureza que permitieron evaluar las modificaciones en las propiedades mecánicas de la zona de afección térmica. *“Propiedades Mecánicas de las Uniones por Laser de Aceros Inoxidables Dúplex”*.
- **PUCHI-CABRERA (2007)** investigaron la influencia de la composición de mezclas de gases protectores Ar/O₂ del proceso de soldadura a tope mediante arco metálico con protección gaseosa (GMAW), sobre la vida a la fatiga en condiciones uniaxiales de juntas

soldadas del acero inoxidable AISI 316L, enfatizando en los cambios de dureza que ocurren en el metal base, en el cordón y ZAC durante los ensayos de fatiga, a fin de estudiar la acumulación de daño de la junta soldada. “**Vida a la fatiga de juntas soldadas del acero inoxidable AISI 316L obtenidas mediante el proceso GMAW**”.

En lo que se refiere al mecanismo de fatiga propiamente dicho de las uniones soldadas, es un hecho comúnmente aceptado que, el fallo es causado por la propagación de grietas de tipo superficial, que se inician en la raíz de la soldadura, por lo que al analizar el comportamiento a la fatiga de uniones soldadas empleando técnicas de mecánica de fractura, es necesario calcular el valor del factor de intensidad de esfuerzos de la grieta de fatiga (Puchi-Cabrera al, 2007). Para ello, se acostumbra predecir la vida a la fatiga de las uniones soldadas, en términos de parámetros de crecimiento de grietas, tales como da/dN y ΔK obtenidos experimentalmente [29-48].

Sin embargo, tal como ha sido señalado por diversos investigadores, este enfoque pudiera ser inadecuado ya que el mismo no involucra el nivel de esfuerzo medio que opera en la junta y, también, debido a que las grietas en las juntas soldadas no siempre se propagan de manera normal al esfuerzo aplicado debido a lo complejo de la geometría. En este sentido;

- **CHOI Y CHOI, (2005)** llevaron a cabo un estudio, recientemente, sobre el crecimiento de grietas de fatiga en uniones soldadas, cuando este tiene lugar en planos distintos a aquellos perpendiculares a los esfuerzos aplicados, empleando un enfoque basado en densidad de energía de deformación y utilizando muestras de curvatura diferente mediante las cuales se estimó la resistencia a la fatiga en tracción. El análisis del crecimiento de las grietas de fatiga se llevó a cabo a fin de evaluar el efecto de la forma de la grieta inicial, longitud de esta y relación de carga, lo que permitió a estos investigadores obtener parámetros de crecimiento de grietas de fatiga a partir de curvas de crecimiento de grietas, asumiendo que dichos defectos mantienen una forma geométrica constante. “**Fatigue life prediction of out-of-plane gusset welded joints using strain energy density factor approach**”.
- **BARREDA (2005)** estudiaron el comportamiento frente a la fatiga de las uniones soldadas de un acero de baja aleación pero para procesos de soldeo por haz de electrones.

Otra contribución importante al estudio de fallas en recipientes presurizados la realizan **PASQUALI Y SBUTTONI (2008)**, quienes analizaron cómo influyen los errores de diseño en el colapso de un recipiente a presión utilizado como acumulador de aire comprimido. “**Failure Analysis of Pressure Vessel**”.

1.16. Conclusiones del Capítulo I: no se reportan, hasta el momento investigaciones y resultados relacionados con soldaduras de aceros disímiles de acero estructurales ASTM A537 (I)

soldados a tope con aceros inoxidable austenítico ASTM A240 (304L) mediante proceso de soldadura por arco eléctrico semiautomático con protección de gas inerte (GMAW: Gas Metal Arc Welding) empleando argón como gas de protección y un acero inoxidable austenítico ASTM A240 (308L) como material de aporte. Por lo que se vislumbra un nuevo horizonte de investigación, generando novedad científica y la posibilidad de pronosticar la durabilidad de recipientes y tuberías a presión soldadas con dichos aceros.

CAPÍTULO II

MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Los materiales utilizados para el presente estudio consistieron en una lámina de acero inoxidable austenítico ASTM A240 (304L, MB 1) y una lámina de acero estructural ASTM A537 (MB2), ambas de dimensiones (120 x 240 x 4,76) mm. La soldadura se hizo a tope, en piezas de 280 mm de longitud con bisel de 60°, posición plana (ASME Sección IX QW-463.1), utilizando el procedimiento GMAW en atmósfera de argón y MA un electrodo consumible de acero inoxidable austenítico ASTM A240 (308L) de 1,6 mm, aplicando una pasada y siguiendo el esquema ilustrado en la Fig. 1.

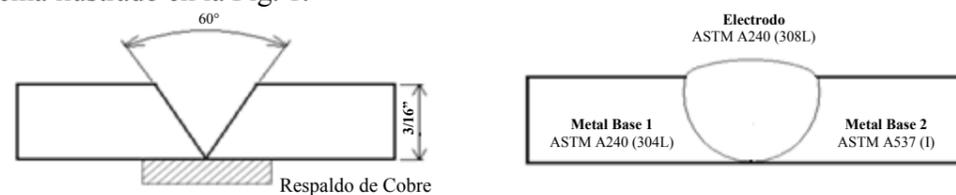


Fig. 1. Configuración de la unión soldada, bisel y materiales involucrados

2.2. Los parámetros de soldadura, fueron: intensidad de corriente, $I = 250$ A; voltaje, $E = 27$ V; energía $Q_0 = E \cdot I = 6,75$ Kw, Heat Input (HI) = 0,80 KJ/mm. Velocidad del Alambre: 4 m/min y velocidad del Arco: 0,508 m/min, especificaciones AWS. Después del proceso de soldadura, cada muestra soldada fue sometida a ensayos no destructivos, mediante técnicas de líquidos penetrantes y ultrasonido, con el propósito de descartar la presencia de grietas o algún otro defecto superficial e interior que pudieran alterar los resultados de los ensayos mecánicos. La Fig. 2, ilustra la evaluación mediante líquidos penetrantes.



Fig. 2. Inspección visual mediante líquidos penetrantes (a) junta original, (b) tinte penetrante, (c) y (d) tinte revelador

2.3. Caracterización química: Se verificó la composición química de los MB utilizando el método de Espectrofotometría por Absorción Atómica. En vista a la diferencia entre la composición de referencia y la obtenida en el laboratorio, se recalcularon los Cr y Ni equivalente para caracterizar el cordón de soldadura con la composición real obtenida en el laboratorio.

2.4. Caracterización microestructural: Para los MB 1 y 2, A240 (304L) y A537 (I) respectivamente, se cortaron muestras en sentido axial y transversal de la lámina, con el propósito de descartar influencia en el sentido de laminado (Fig. 3, García, 2008)

De cada probeta soldada, se cortaron muestras representativas de la soldadura conteniendo los MB 1 y 2, la ZAC y el cordón de soldadura. Se prepararon metalográficamente siguiendo el método de pulido mecánico convencional de acuerdo a ASTM E – 3. El pulido final se realizó con pasta de diamante de 1 μm .

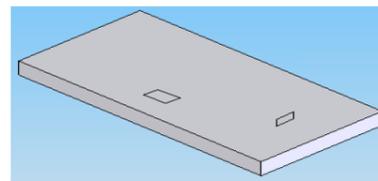


Fig. 3. Muestras en MB 1 y 2, sentidos axial y transversal.

Las muestras fueron atacadas con Vilella (45 ml Glicerol, 15 ml Ácido nítrico, 30 ml Ácido clorhídrico) para el MB1 A240 (304L) y Nital al 3% (100 ml Alcohol etílico 96%, 1-10 ml Ácido nítrico) para el MB2 A537 (I), mientras que la unión soldada fue atacada con Nital al 3% para evidenciar el interfase entre el estructural y el inoxidable, y posteriormente con Vilella para conformar el perfil microestructural de la unión soldada. Todas las muestras se analizaron mediante microscopía óptica (MO), utilizando un microscopio metalográfico con platina invertida, con sistema digitalizador de imagen acoplado, marca Nikon, modelo EPIPHOTH 200.

2.5. Caracterización mecánica: se realizaron ensayos de microdureza, tracción, charpy, doblado guiado y fatiga. Se midieron perfiles de microdureza Vickers (HV), cubriendo los MB 1 y 2, la ZAC y el cordón de soldadura. Para ello se utilizó un microdurómetro Vickers, marca MITUTOYO, modelo MVK – H1, previamente calibrado con sus patrones de calibración, aplicando una carga de 100g durante 15 s y en correspondencia con el código ASTM E – 92.

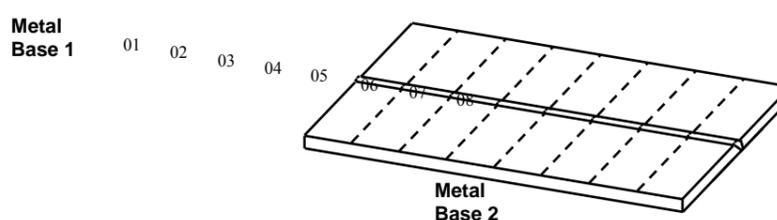


Fig. 4. Fabricación de las probetas ensayadas (García 2008)

Las probetas fueron mecanizadas de forma convencional, mediante máquina fresadora universal marca ELGOBIAR, modelo F2UE, con el empleo de líquido refrigerante, en correspondencia con el código ASME Sección IX para hornos y recipientes a presión (Fig. 4).

Tabla. 3. Especificaciones de la junta y dimensiones de las probetas (AWS Handbook, 2007)

Probeta	Ensayo	Dimensiones
01	Descartado	1 1/2" x 3/16"
02	Tracción	1" x 3/16"

03	Doble de Cara	1 1/2" x 3/16"
04	Doble de Raíz	1 1/2" x 3/16"
05	Doble de Cara	1 1/2" x 3/16"
06	Doble de Raíz	1 1/2" x 3/16"
07	Tracción	1" x 3/16"
08	Descartado	1 1/2" x 3/16"

Para cada probeta se eliminó el material de aporte excesivo, para garantizar un espesor uniforme en la junta de 3/16" (4,8 mm) y se descartaron los extremos de la junta (01 y 08) (Tabla 3).

Para los ensayos de tracción, se prepararon dos (02) probetas por cada MB y dos (02) para la unión soldada (Fig. 5). Estos ensayos fueron realizados empleando una Máquina Universal de tracción, marca SERVOSIS, modelo PBI-20. Calibrada grado 01, calidad de investigación.

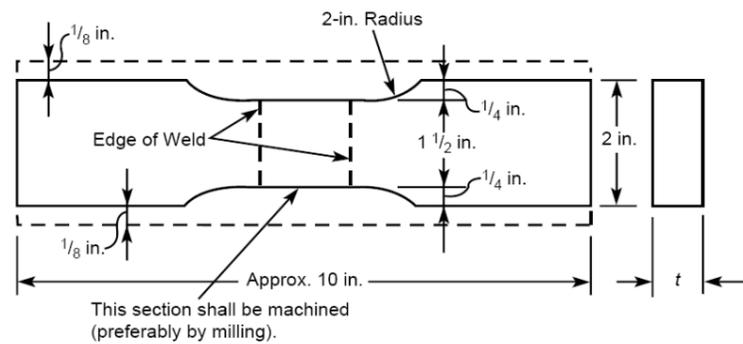


Fig. 5. Dimensiones de la probeta de tracción (AWS Handbook, 2007)

Para los ensayos de doblez guiado, se prepararon cuatro (04) probetas por cada sección soldada, dos (02) para el ensayo de doblez de cara y dos (02) para el ensayo de doblez de raíz.

Las dimensiones de las probetas son referidas en la Tabla 3 y fueron dobladas 180° hasta alcanzar forma en "U", colocando la soldadura en la zona sometida a mayor deformación. El objetivo de este ensayo es el de observar el comportamiento dúctil del material, sin que llegue a generar, en la zona de mayor deformación de la probeta, fallas mayores a 1/8" (3,2mm).

Para tal fin, se utilizó una prensa hidráulica (Cap. 40 Ton) provista de una base para ensayos de doblez cuyas dimensiones corresponden con AWS y dependen de la resistencia de la unión por lo que fue necesario efectuar, previamente las pruebas de tracción.

Para los ensayos de impacto charpy, se prepararon cinco (05) probetas por cada material base y cinco (05) para la unión soldadas, cuyas dimensiones se indican en la Fig. 6, con espesor de 5 mm y ancho de 10 mm, en correspondencia con el código ASTM E – 23. Estos ensayos fueron realizados empleando un péndulo CHARPY/IZOD, marca HOYTOM, modelo J300, a temperatura ambiente de laboratorio (20°C).

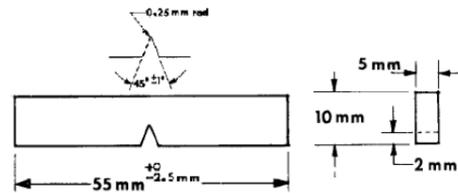


Fig. 6. Dimensiones de las probetas ensayadas a impacto charpy (ASTM E23-02)

Para los ensayos de fatiga axial se prepararon diez (10) probetas por cada material base y diez (10) para la unión soldada, cuyas dimensiones se indican en la Fig. 7, con espesor T de 3/16" (4,7625 mm), en correspondencia con el código ASTM E – 606.

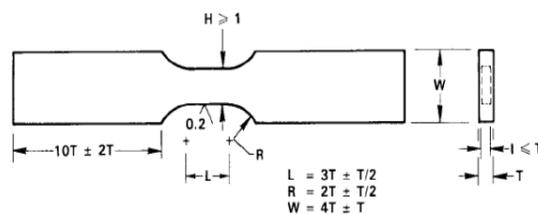
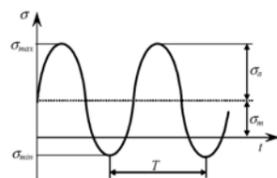


Fig. 7. Dimensiones de las probetas ensayadas a fatiga (ASTM E466-96)

Estos ensayos fueron realizados empleando una Máquina Universal de tracción, marca SERVOSIS, modelo PBI-20. Calibrada grado 01, y generando en el programa de control, un ciclo de aplicación de carga axial con una frecuencia de un pulso por segundo (Fig. 8) y diez (10) diferentes cargas, tomando como valor inicial la calculada empleando como factor de fatiga 0,4 y el esfuerzo máximo a la tensión ($0,4 \sigma_{UTS}$) determinado previamente, mediante el ensayo de tracción tanto de los MB 1 y 2, como para la junta soldada (JS).



Donde;

$\sigma_{max}=F/A$; Esfuerzo máximo aplicado (MPa)

$\sigma_{min}=0$; Esfuerzo mínimo aplicado (MPa)

$T=1s$; Período de aplicación de carga (s)

Fig. 8. Configuración del ensayo de fatiga axial (García 2008)

2.6. Análisis estadístico: este análisis se realizó con el empleo del tabulador electrónico Microsoft Excel 2007 y el software "Tierra" (Legra). Se graficaron los valores de esfuerzo y número de ciclos (S-N) y se obtuvo el diagrama de dispersión con su correspondiente curva. De igual forma, se siguió el método de los mínimos cuadrados, para obtener la función que mejor se ajuste a los datos, de acuerdo con el criterio de mínimo error cuadrático, con su respectivo análisis de varianza (ANOVA, según terminología inglesa).

2.7. Conclusiones del Capítulo III: el presente capítulo puntualiza los materiales y métodos utilizados en la investigación, mediante; materiales utilizados y condiciones de soldadura, caracterizaciones química, microestructural y mecánica, así como el análisis estadístico.

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIONES DEL TRABAJO

3.1. Caracterización de la soldadura: previo al desarrollo práctico de la investigación, se estimó la presencia de fisuración mediante el empleo de los diagramas de SHAEFFLER, DELONG y WRC siguiendo el procedimiento que se describe a continuación y a partir de la composición de los MB y de MA tomados del código ASTM A240 y ASTM A537 (Tabla 4):

$$[\%X_{weld}] = \frac{B}{B+D} [\%X_{BM}] + \frac{D}{B+D} [\%X_{FW}] \quad (1)$$

donde;

$[\%X_{weld}]$	Elemento en la zona de fusión
$[\%X_{BM}]$	Elemento en el metal base
$[\%X_{FW}]$	Elemento en el electrodo
$[B]$	Área de material fundido (penetración)
$[D]$	Área de material depositado (cordón)

Tabla. 4. Composición de los materiales base ASTM A240 (304L), ASTM A537 (I) y de aporte ASTM A240 (308L)

Material	Base 1	Aportación	Base 2
	304L	308L	A537(I)
C	0,030	0,040	0,240
Cr	19,000	19,500	0,250
Ni	10,000	10,000	0,250
Mo	0,000	0,000	0,080
Mn	2,000	2,500	1,025
Si	0,750	0,900	0,325
N	0,100	0,140	0,140
P	0,045	0,040	0,035
S	0,030	0,030	0,035
Cu	0,000	0,000	0,350

B y D se calcularon en forma teórica, mediante parámetros adimensionales n_3 , θ_p , θ_p / n_3 , σ_3 :

$$B = \frac{2a^2\pi}{v^2} \left(\frac{\sigma_{3m}}{\sigma_{3m} + 1} \right) (1 + 2\sigma_{3m}) \quad (2)$$

$$D = \frac{k'}{\rho} \left(\frac{1}{v} \right) \quad (3) \quad \theta = \frac{(T - T_o)}{(T_c - T_o)} \quad (4)$$

$$\frac{\theta_p}{n_3} = \frac{1}{\sigma_{3m}} \exp\left(\frac{-\sigma_{3m}}{\sigma_{3m} + 1} \right) \quad (5)$$

$$n_3 = \frac{E.I.\eta.v}{4.\pi.a^2.(Hc - Ho)} \quad (6)$$

donde;	n_3	Factor adimensional de calor aportado
	θ_p	Factor adimensional de temperatura pico
	σ_3	Factor adimensional de posición
	a	Difusividad térmica (mm^2/S)
	v	Velocidad de la soldadura (mm/min)
	σ_{3m}	Factor adimensional de posición local
	k'/ρ	Tasa promedio de volumen depositado
	E	Voltaje (V)
	I	Corriente (A)
	η	Eficiencia
	$H_c - H_o$	Cambio de entalpía en el punto (J/mm^3)

Tabla 5. Parámetros de Soldadura (AWS, 2007)

Proceso:	GMAW		
Gas:	Ar - (1 ó 2)% O ₂	Corriente:	DCRP
D electrodo:	0,0625"	k'/ρ	0,70
Intensidad:	250 Amp	Número de pases:	1
Q₀ = I · V (kW)	6,75 kW	Voltaje:	27 V
Vel alambre	157,5 ipm	(6.750 W)	
Vel arco:	20 ipm	(66,68 mm/s)	
Dilución:	0,56	(8,47 mm/s)	

Se realizaron los cálculos, separando la junta disímil en dos casos, el MB1 A240 (304L) – con el MA A240 (308L); y un segundo caso el MB2 A537 (I) – con el MA A240 (308L). Ambos con los mismos parámetros de soldadura (Tabla 5)

Propiedades físicas de los materiales en cuestión (Tabla 6)

Tabla 6. Propiedades físicas de los materiales en cuestión (Payares, 2003)

Material	Difusividad Térmica	Diferencia de Entalpía
	a (mm^2/s)	$H_m - H_o$ (J/mm^3)
304L	4,0	7,40
308L	4,0	7,40
A537(I)	8,0	7,50
304L - 308L	4,0	7,40
308L - A537(I)	6,0	7,45

Convergencia para σ_3 (Tabla 7)

Tabla 7. Convergencia para σ_3 (García, 2008)

Junta	σ_3	θ_p/v_3	error
304L - 308L	12,9	0,031	0,0%
308L - A537(I)	6,1	0,069	0,0%

Seguidamente, se calcularon los parámetros adimensionales, reportados en la Tabla 8.

Tabla 8. Parámetros adimensionales n_3 , θ_p , θ_p / n_3 , σ_3 (García, 2008)

Junta	n_3	θ_p	θ_p / n_3	σ_3
304L - 308L	32,65	1,0	0,031	12,91
308L - A537 (I)	14,41	1,0	0,069	6,10

Se calcularon las dimensiones correspondientes al área del material fundido o penetración [B] y el área depositada o área del cordón de soldadura [D], así como las relaciones adimensionales B/(B+D) y D/(B+D), requeridas para el cálculo de [%X_{weld}], valores reportados en la Tabla 9.

Tabla 9. Dimensiones del cordón de soldadura calculados en forma teórica (García, 2008)

Junta	B (mm ²)	D (mm ²)	B/(B+D)	D/(B+D)
304L - 308L	32,39	20,67	0,6104	0,3896
308L - A537(I)	30,77	20,67	0,5982	0,4018

Haciendo uso de (1) se determinó el % de elemento en la zona de fusión [%X_{weld}] y, mediante las expresiones desarrolladas por SHAEFFLER, DELONG y WRC, se caracterizó el cordón de soldadura para ambos casos (Tabla 10)

Tabla 10. Composición química del cordón y determinación de los Cr y Ni equivalente (García 2008)

Junta	304L - 308L	308L - A537(I)	promedios
C	0,033	0,154	0,093
Cr	18,731	7,943	13,337
Ni	9,316	4,138	6,727
Mo	0,000	0,060	0,030
Mn	2,128	1,537	1,832
Si	0,753	0,529	0,641
N	0,116	0,128	0,122
P	0,037	0,034	0,035
S	0,029	0,033	0,031
Cu	0,004	0,185	0,095
SHAEFFLER			
Cr eq	19,861	8,797	14,329
Ni eq	11,360	9,516	10,438
"DELONG"			
Cr eq	19,861	8,797	14,329
Ni eq	14,828	13,357	14,092
WRC			
Cr eq	18,731	8,003	13,367
Ni eq	12,772	12,123	12,448

3.2. Caracterización química: los resultados de los análisis químicos de las probetas seleccionadas se muestran en la Tabla 11. Como se observa, existe una diferencia de 11 % entre la composición referida en el código ASME y la obtenida por el referido método. La mayor diferencia se presentó en el MB2, específicamente en los porcentajes de Cr, Ni y Mo.

Tabla. 11. Composición de los MB obtenida en laboratorio (García, 2008)

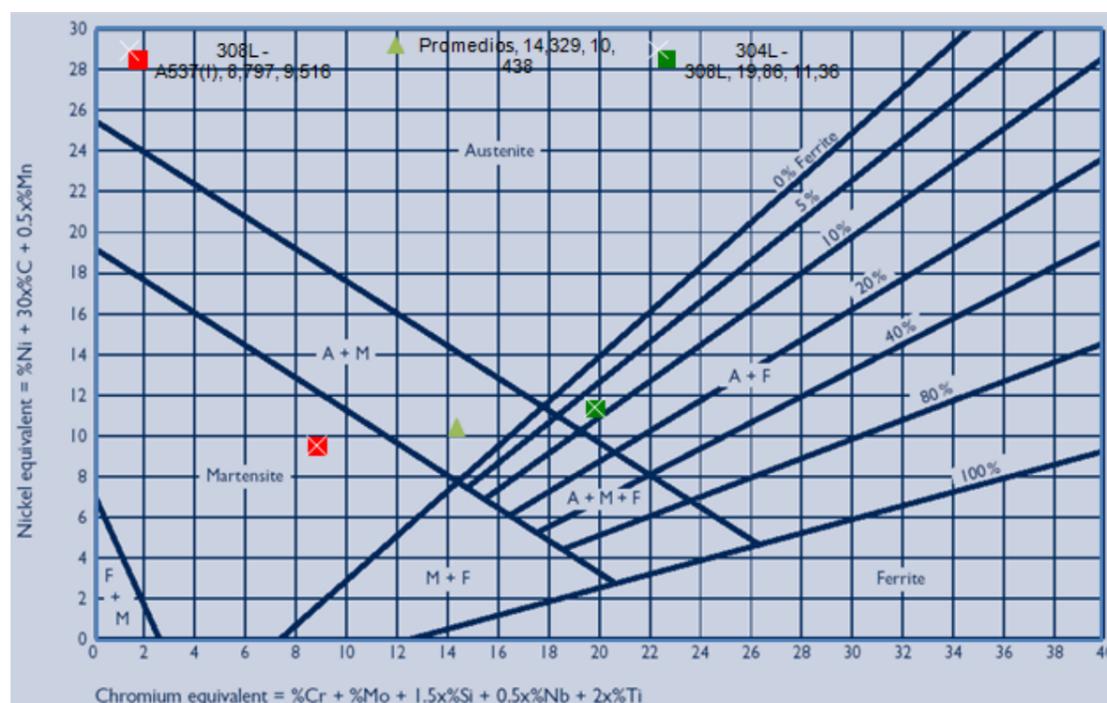
Elem	MB 1: A240 (304L)			MB 2: A537 (I)		
	ASME	Lab.	dif (%)	ASME	Lab.	dif (%)
C	0,030	0,028	7%	0,240	0,230	4%
Cr	19,000	18,240	4%	0,250	0,180	28%
Ni	10,000	8,880	11%	0,250	0,200	20%
Mo	0,000	0,000	0%	0,080	0,100	25%
Mn	2,000	1,890	6%	1,025	0,890	13%
Si	0,750	0,660	12%	0,325	0,280	14%
N	0,100	0,100	0%	0,140	0,120	14%
P	0,045	0,035	22%	0,035	0,030	14%
S	0,030	0,028	7%	0,035	0,035	0%
Cu	0,000	0,006	0%	0,350	0,310	11%
			7%			14%

En vista a la diferencia entre la composición de referencia y la obtenida en el laboratorio, se recalcularon el Cr y Ni equivalente con la composición real (Tabla 12).

Tabla 12. Composición química del cordón y determinación del Cr y Ni eq de laboratorio. (García, 2008)

Junta	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	N	P	S	Cu	Cr eq	Ni eq
304L - 308L	0,033	18,731	9,316	0	2,128	0,753	0,116	0,037	0,029	0,004	19,861	10,297
308L - A537(I)	0,154	7,943	4,138	0,06	1,537	0,529	0,128	0,034	0,033	0,185	8,797	8,777

A continuación se presentan las estimaciones de microestructura a obtener mediante el empleo de los diagramas de SHAEFFLER (Fig. 9), DELONG (Fig. 10) y WRC (Fig. 11).

**Fig. 9. Diagrama de Shaeffler para el MB1-MA, MA-MB2 (AWS, 2007)**

Del diagrama de Schaeffler se puede notar que para el caso de la junta 304L-308L, se encuentra dentro de la zona de Austenita más ferita (A+F), libre de riesgo de fisuración y 12% de Ferrita, para la junta 308L-A537(I), se encuentra dentro de la zona de martensita pura (característica frágil), por lo que podría presentarse fisuración en frío, mientras que en el punto medio de la recta que pasa por los casos 1 y 2, se encuentra dentro de la zona de Austenita más martensita (A+M), por lo que podría presentarse fisuración tanto en frío como en caliente. (Fig. 9)

Del diagrama de DeLong se puede notar que sólo el caso de la junta 304L-308L puede ser evaluada mediante este diagrama ya que los Cr y Ni equivalente de los otros casos se encuentra fuera del rango de apreciación de dicho diagrama. En este sentido, la junta 304L-308L se aprecia dentro de la zona de Austenita más ferita (A+F), libre de riesgo de fisuración y 1,98% de Ferrita. (Fig. 10). Para la junta 308L-A537(I) (Cr eq: 8,797; Ni eq: 13,357) y el punto medio de la recta que pasa por los casos 1 y 2, Cr eq: (14,329; Ni eq: 14,092)



Fig. 10. Diagrama de DeLong para el MB1-MA, MA-MB2 (AWS, 2007)

Igualmente del diagrama WRC se puede notar que sólo el caso de la junta 304L-308L puede ser evaluada mediante este diagrama ya que los Cr y Ni equivalente de los otros casos se encuentra fuera del rango de apreciación. En este sentido, la junta se aprecia dentro de la zona de Austenita más ferita (A+F), libre de riesgo de fisuración y 2% de Ferrita. (Fig. 11).

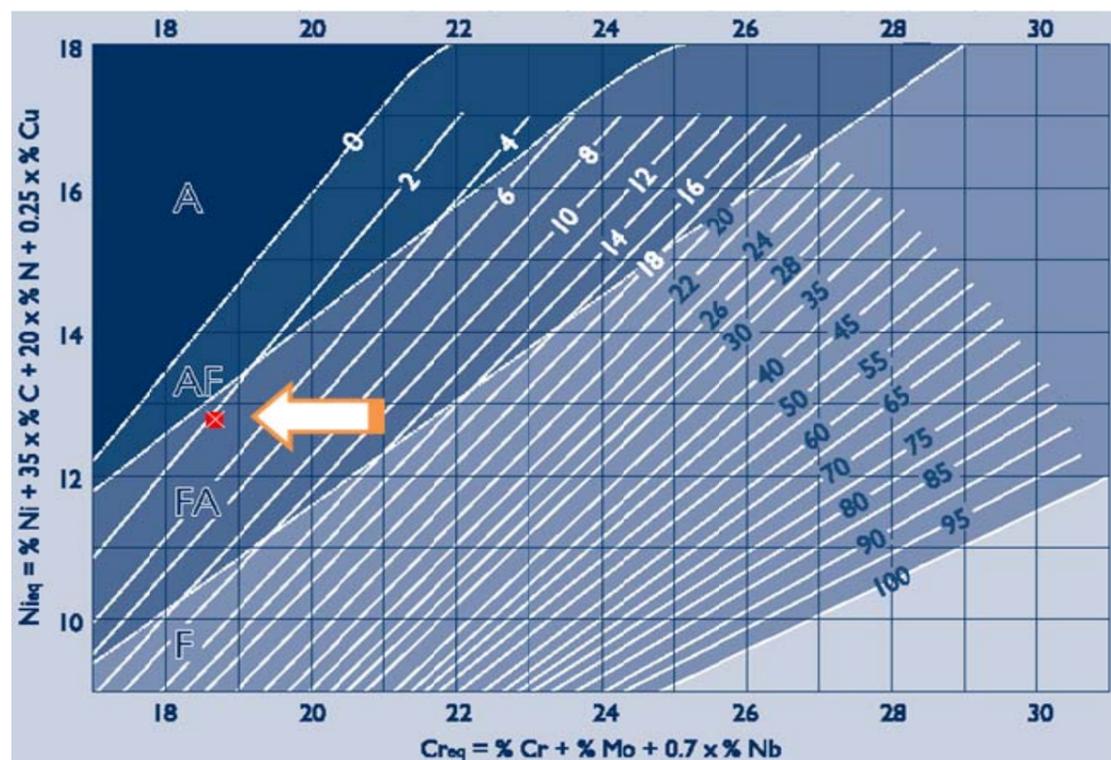


Fig. 11. Diagrama WRC para el MB1-MA, MA-MB2 (AWS, 2007)

3.3. Caracterización microestructural: la Fig. 12 muestra la microestructura del MB1, acero estructural ASTM A537 (I), tomada en dirección del laminado (Fig. 12.a) y en dirección transversal al mismo (Fig. 12.b), con el propósito de descartar diferencias microestructurales en relación al sentido del laminado. Está constituida principalmente por ferrita y perlita en proporción 20% y 80% respectivamente. El tamaño de grano ferrítico promedio (ASTM E – 112), fue de $15 \pm 2 \mu\text{m}$. Las características microestructurales observadas en ambos cortes son similares. Se observó que el acero estructural presenta un alto nivel de inclusiones.

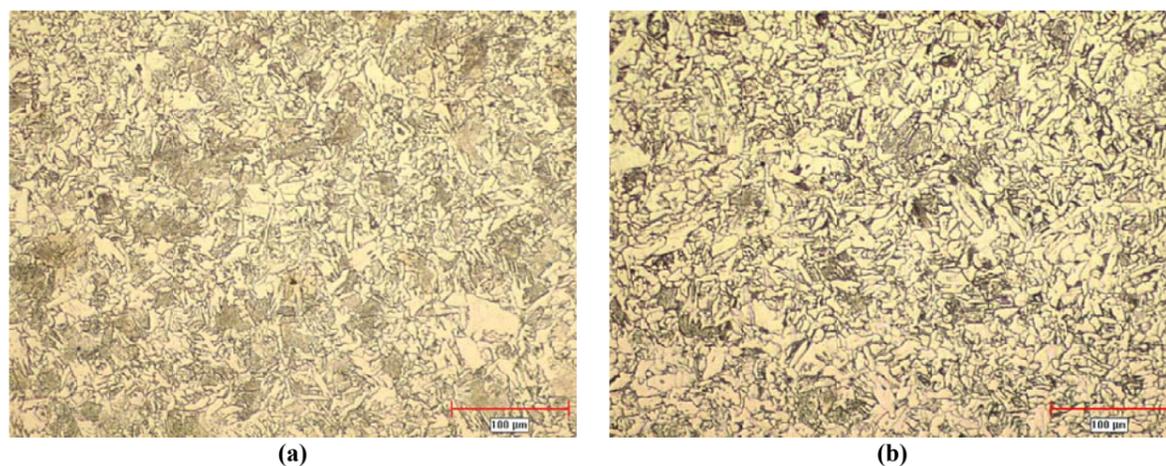


Fig. 12. Microestructura del MB1, ASTM A537 (I) 200x, Atacado con Nital 3%
a) dirección longitudinal al laminado. b) dirección transversal al laminado. (García 2008)

La Fig. 13 muestra la microestructura del MB2, acero inoxidable austenítico ASTM A240 (304L), tomada en dirección del laminado (Fig. 13.a) y en dirección transversal al mismo (Fig.

13.b), con el propósito de descartar diferencias microestructurales en relación al sentido del laminado. Corresponde a un acero inoxidable austenítico, observándose maclas de deformación. El tamaño de grano austenítico promedio, fue de $26 \pm 2 \mu\text{m}$. Se observó bajo nivel de inclusiones. Las características microestructurales observadas en ambos cortes son similares.

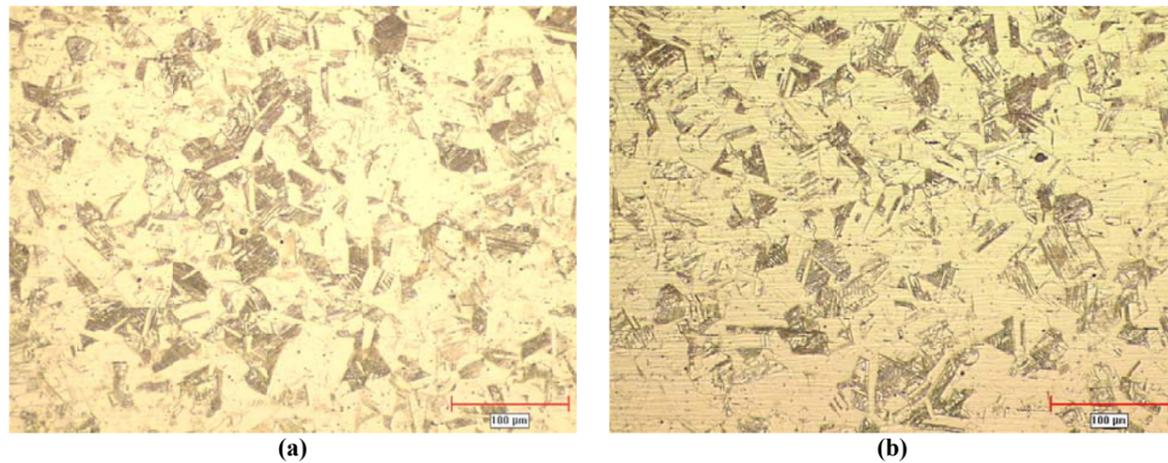


Fig. 13. Microestructura del MB2, ASTM A240 (304L) 200x, Atacado con Vilella a) dirección del laminado. b) dirección transversal al laminado. (García 2008)

La Fig. 14 presenta una microfotografía sin ataque metalográfico de la Junta Soldada sin tratamiento post-soldadura de una de las réplicas observadas. Los distintos contrastes observados en la muestra permiten distinguir en la ZAC, varias sub-regiones definidas por la microestructura desarrollada en cada una de ellas, producto de las condiciones térmicas locales experimentadas durante el proceso de soldadura. También pudo observarse la presencia de inclusiones en la línea de fusión entre el acero estructural A537 (MB2) y el inoxidable 308L (MA), así como una grieta en la línea de fusión entre los aceros inoxidable 304L y 308L. Se observaron tres muestras presentando grieta sólo la número 2.

Esta situación se atribuye al no cumplimiento de los parámetros de soldadura y especificaciones emitidas para su desarrollo, podría ser ocasionada por falla en la preparación de la muestra, postura inicial, e incluso en las habilidades del soldador, representado por la velocidad del arco de soldadura y/o la velocidad del alambre, influyendo directamente en el amperaje y a su vez en el calor aportado.

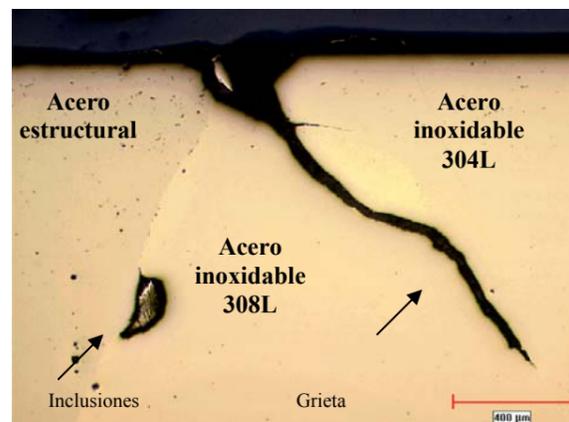


Fig. 14. Microfotografía de la muestra soldada 50x sin ataque (García 2008)

En la Fig. 15 se muestra la microestructura de la unión soldada previo al ataque químico, se ilustra la zona de unión disímil entre los dos aceros (estructural A537 e inoxidable 308L), se evidencia lo descrito en las observaciones anteriores respecto al bajo nivel de inclusiones para el acero inoxidable y al alto nivel de inclusiones para el acero estructural y no se evidencian grietas ni posible fisuración.

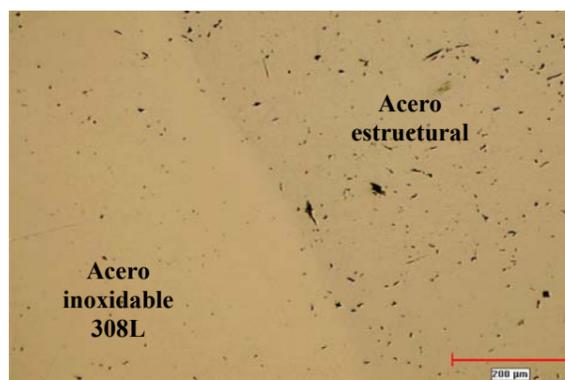


Fig. 15. Microestructura de la unión soldada 50x sin ataque (García 2008)

En la Fig. 16.a, se muestra la superficie soldada una vez atacada químicamente (Nital 3%), se diferencian ambos materiales, revelándose la microestructura del acero estructural, la cual está constituida por granos de perlita con ferrita acicular en los bordes de grano. Esta microestructura corresponde a la ZAC, y se evidencia crecimiento en el tamaño del grano. Mientras que la Fig. 16.b muestra una ampliación a 200x de la zona correspondiente al acero estructural y se resaltan los granos de perlita con ferrita acicular en los bordes de grano

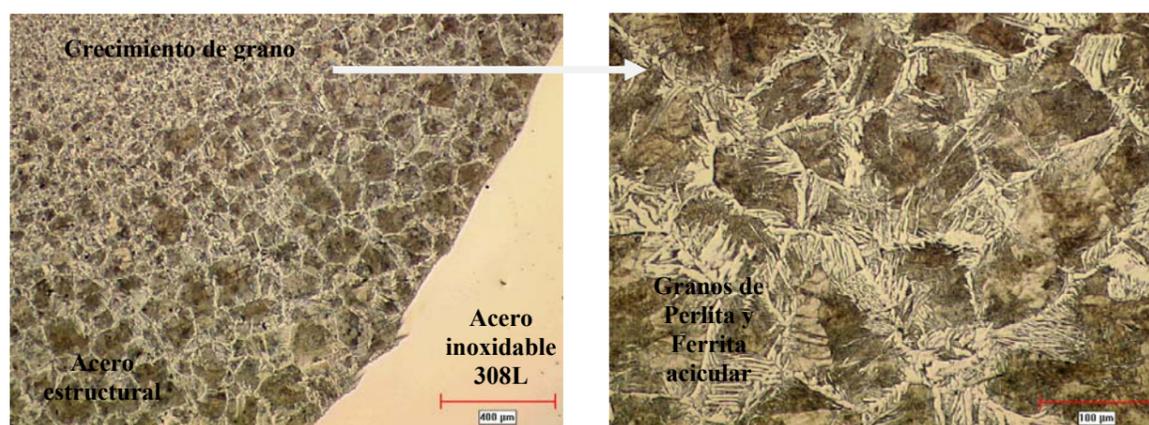


Fig. 16. Microestructura de la unión soldada, con ataque químico a) línea de fusión 50x. b) acero estructural 200x. (García 2008)

3.4. Caracterización mecánica

Microdureza HV: la Fig. 17 ilustra el perfil de microdureza de la muestra soldada, medido en el centro, un tercio superior y un tercio inferior, del cordón de soldadura, observándose tendencia similar en las tres mediciones, y en la Fig. 18 se muestra el barrido de microdureza.

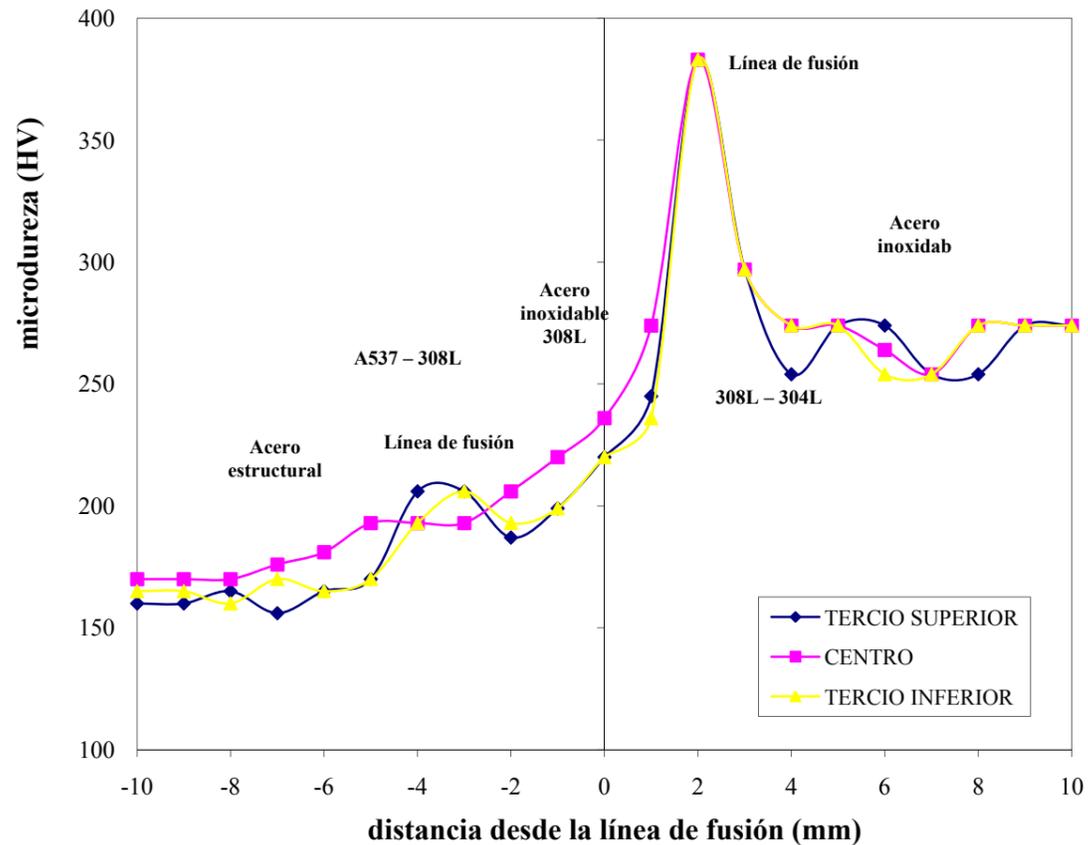


Fig. 17. Perfil de microdureza en la muestra soldada (García 2008)

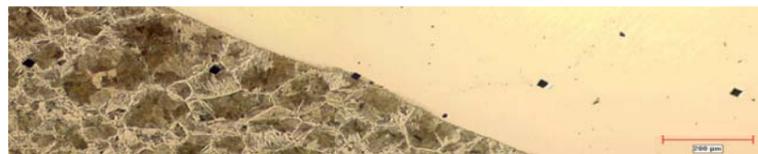


Fig. 18. Barrido de microdureza HV, 50x. (García 2008)

Se puede apreciar que la ZAC presenta un incremento progresivo en los valores de microdureza entre el acero estructural y el acero inoxidable, ubicándose en un intervalo entre 150 y 383 HV. De igual forma, se puede observar que la línea de fusión entre el cordón de soldadura y el acero inoxidable 304L presenta el valor máximo de dureza de 383 HV, mientras que la línea de fusión entre el cordón de soldadura y el acero estructural, presenta un máximo relativo de 200 HV, esto se atribuye a la presencia de martensita en la zona.

Propiedades mecánicas a tensión: (Tablas 13 y 14) MB 1 y 2, el MA y la JS.

Tabla. 13. Propiedades mecánicas a tensión de las muestras bajo estudio (especificaciones mínimas requeridas por el código ASTM 240/537)

Material	σ_y	σ_{UTS}	Elongación (%)
	(MPa)	(MPa)	
Metal base 1 A240 (304L)	270	515	35
Metal base 2 A537 (I)	240	458	40
Metal de aporte A240 (308L)	345	550	22

En la Fig. 19 se muestra la curva esfuerzo deformación ingenieril, para el acero inoxidable A240 (304L), el acero estructural A537 (I), y la junta soldada, observándose mayor resistencia y ductilidad en el acero inoxidable, resistencia similar entre el acero estructural y la junta soldada, y menor ductilidad en la junta soldada.

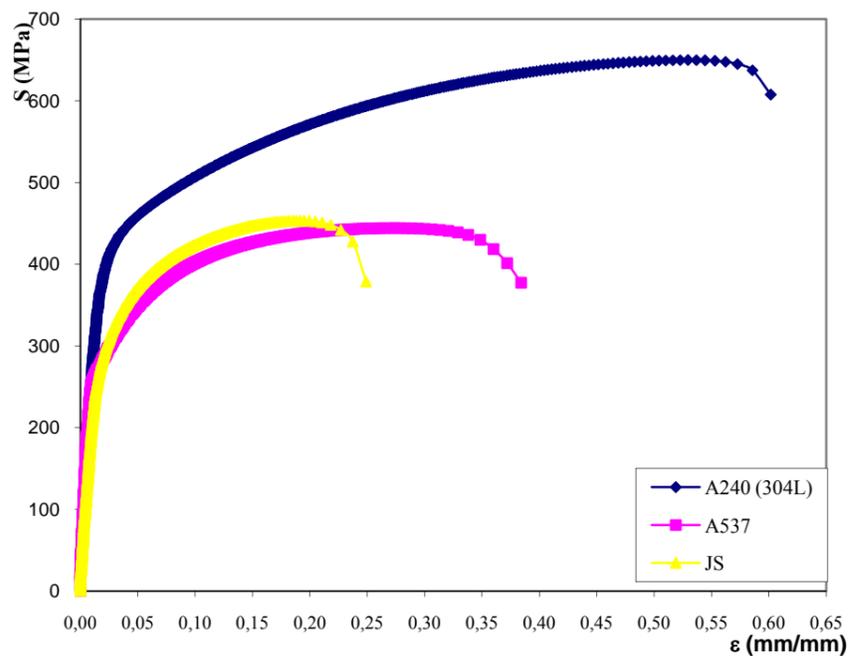


Fig. 19. Curva ingenieril Esfuerzo – Deformación
a) Metal base 1 A240, b) Metal base 2 A537 c) Junta soldada (JS). (García, 2008)

Tabla. 14. Propiedades mecánicas a tensión de las muestras bajo estudio (García, 2008)

Material	σ_y	σ_{UTS}	Elongación
	(MPa)	(MPa)	(%)
Metal base 1 A240 (304L)	388±3	648±2	48±1
Metal base 2 A537 (I)	265±6	458±2	34±1
Metal de aporte A240 (308L)	481±3	585±2	19±2
Unión soldada	283±3	456±2	25±2

En la Tabla 14 se aprecia que el esfuerzo máximo (σ_{UTS}) y el esfuerzo de fluencia (σ_y) de las probetas evaluadas, resultaron superiores a los mínimos requeridos por el código **ASTM**, referidos en la Tabla 13. De igual forma se puede notar que los resultados del ensayo correspondiente a la JS son similares a los valores del MB2 ASTM A537 (I).



Fig. 20. Probeta soldada ensayada a tracción.

Por otro lado, las JS experimentaron menor porcentaje de elongación, lo que se corresponde con menos ductilidad, por la presencia de la martensita generada en el enfriamiento, sin embargo se mantiene por encima del 20%, lo que aun puede ser clasificado como unión de característica Dúctil. Es importante mencionar que las probetas soldadas, ensayadas a tracción, fallaron fuera de la ZAC y el cordón de soldadura, específicamente en el MB2 A537 (I) (Fig. 20)

Estos resultados se correlacionan con la microestructura presentada por el material. Las regiones con fases más duras que la ferrita modifican la respuesta del material cuando éste es sometido a carga. Estas estructuras hacen el material más resistente a ser deformado conduciendo a un mayor esfuerzo para producir su deformación plástica. Al mismo tiempo el material tiende a aceptar un menor grado de alargamiento.

Propiedades mecánicas a impacto, (Ensayo Charpy): Las propiedades mecánicas a impacto de los MB 1 y 2, y la junta soldada, se reportan en la Tabla 15.

Tabla. 15. Propiedades mecánicas a impacto de las muestras bajo estudio (García, 2008)

Material	Energía de impacto (J)		
	ASTM	Laboratorio	(%)
Metal base 1 A240 (304L)	86,8	80±2	7,8±2,3
Metal base 2 A537 (I)	68,0	60±2	11,8±2,9
Unión soldada	----	120±2	----

Ensayos de doblez guiado: Tomando como referencia la resistencia a la fluencia de la junta soldada y las especificaciones del código ASME (Tabla 16) Sección IX QW-463.1 se utilizó la base para doblar tipo A (hasta 55.000 psi) cuyas dimensiones se pueden observar en la Fig. 21.

Tabla. 16. Dimensiones para el doblez guiado (AWS, 2007)

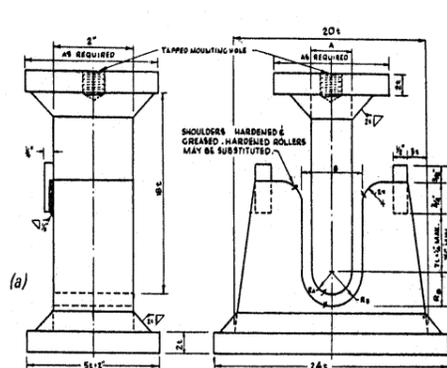


Fig. 21. Base para el doblez guiado (AWS, 2007)

Dimensión	AWS TEST Resistencia a la Fluencia MPa (Ksi)		
	Hasta 360 Hasta (55)	360 – 620 (55 – 90)	620 y más (90 y más)
R _A (macho)	19mm (3/4")	25mm (1")	32mm (1-1/4")
R _B (base)	30mm (1-3/16")	37 mm (1-7/16")	43 mm (1-11/16")

La Fig. 22 muestra las probetas sometidas a los ensayos de doblez de cara y raíz para las juntas soldadas. En todo caso, el doblez se pudo realizar a 180° hasta alcanzar la forma en "U", colocando la soldadura en la zona sometida a mayor deformación sin presentar grieta alguna.

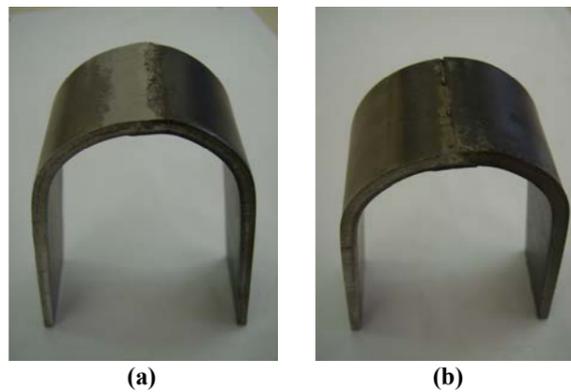


Fig. 22. Macrofotografías de las muestras sometidas a doblez guiado. a) Cara, b) Raíz.

(García, 2008)

Propiedades mecánicas a fatiga axial: Para determinar la resistencia a la fatiga, tanto para los MB, como para la JS, se tomó como referencia la relación de fatiga (0,4) respecto al esfuerzo máximo (σ_{UTS}) determinado previamente mediante el ensayo de tensión.

Tabla 17. Resultados de los ensayos de fatiga para los materiales investigados (García, 2008)

MB1 A240 (304L)		MB2 A537(I)		JS	
S (Mpa)	N	S (Mpa)	N	S (Mpa)	N
380	7	260	1025	250	1036
350	2290	240	2574	230	5004
320	8481	230	3540	210	15165
310	10472	225	4513	190	48203
300	11865	222,5	4850	170	103073
290	18575	215	7513	160	159351
280	21812	200	17872	155	293171
270	46357	190	21105	150	398756
260	66169	180	33194	145	501732
250	121201	130	1020747	140	649432

Se construyó el diagrama S-N de Whöler para cada MB y la JS, resultando la curva correspondiente a la JS próxima superior a la del MB2 (Fig. 23). Los valores determinados se reportan en la Tabla 18.

Tabla 18. Propiedades mecánicas a fatiga de las muestras bajo estudio (García, 2008)

Material	$f = 0,4 \sigma_{UTS}$	S_{fatiga}
	(MPa)	(MPa)
Metal base 1 A240 (304L)	259±2	218±2
Metal base 2 A537 (I)	183±2	122±2
Unión soldada	182±2	132±2



Fig. 23. Probeta soldada ensayada a fatiga. (García, 2008)

La Fig. 24 muestra la curva S-N (Whöler) a partir de los datos de la Tabla 17 para las condiciones de ensayos establecidas. Se puede apreciar del diagrama S-N que la resistencia a la fatiga de la JS es superior en 8% a la determinada para el MB2, lo que satisface el criterio de diseño de que en la junta soldada no debe ocurrir el fenómeno de la fisuración interior que influiría de manera determinante en el inicio de la grieta y en consecuencia en la resistencia a la fatiga de la unión soldada. Es importante mencionar que en todas las muestras ensayadas, se inició la grieta y fallaron en la línea de fusión entre el cordón de soldadura y el acero inoxidable 304L, donde posteriormente se produjo la falla, como se muestra en la Fig. 23.

Se aprecia, además, que existe similar tendencia entre las tres curvas, cumpliéndose la relación pérdida de resistencia a la fatiga con el número de ciclos y que $\sigma_{MB1} < \sigma_{JS} < \sigma_{MB2}$ y $N_{MB2} > N_{JS} > N_{MB1}$. Como se observa, la máxima resistencia a la fatiga la presentó el MB1, siguiendo la JS y finalmente, el MB2. Es evidente, además, que los mayores valores de resistencia a la fatiga ocurren para menores números de ciclos, lo que es consistente la teoría general de la fatiga (Forrest, 1982).

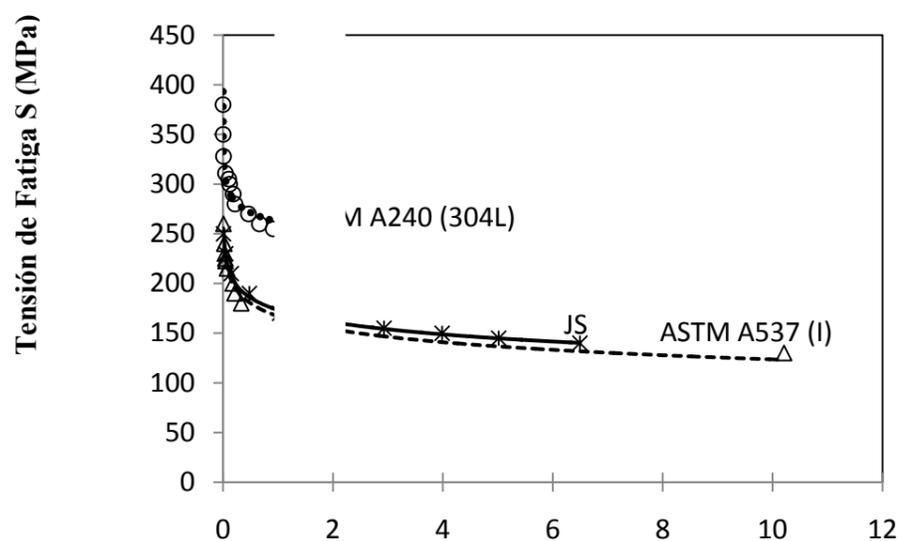


Fig. 24. Curvas S-N (Whöler) para los materiales ensayados (García, 2009)

Número de ciclos N, x 10⁵

3.5. Modelación matemática: Los análisis de los mínimos cuadrados de las curvas ajustadas de la Fig. 24 arrojaron los modelos 7-9 con sus correspondientes coeficientes de determinación:

Para el Metal base 1 ASTM A240 (304L):

$$\sigma_{\text{FatMB1}} = -13,7 \ln(N) + 419,7; \quad [\text{MPa}] \quad (7)$$

$$r^2 = 0,956$$

Para el Metal base 2 ASTM A357 (I):

$$\sigma_{\text{FatMB2}} = -18,8 \ln(N) + 384,5; \quad [\text{MPa}] \quad (8)$$

$$r^2 = 0,982$$

Para la Junta soldada:

$$\sigma_{\text{FatJS}} = -17,7 \ln(N) + 254,94; \quad [\text{MPa}] \quad (9)$$

$$r^2 = 0,996$$

En virtud que los análisis se concentran en la evaluación de la calidad metalúrgica de la junta soldada, que constituye el objeto de estudio, se procede a discutir solamente la significancia del modelo de la ecuación 9, a través del Análisis Operativo de Varianza (ANOVA)

Para la realización del ANOVA, se requirió hacer arreglos matemáticos para linealizar el modelo, por ser este del tipo logarítmico. Este arreglo matemático es perfectamente posible si el número de ciclos se expresa en escala logarítmica, por lo que el modelo adquiere la forma:

$$\sigma_{\text{FatJS}} = -17,7 x + 254,94$$

Donde: $x = \ln(N)$

La curva para el modelo linealizado aparece en la Figura 25.

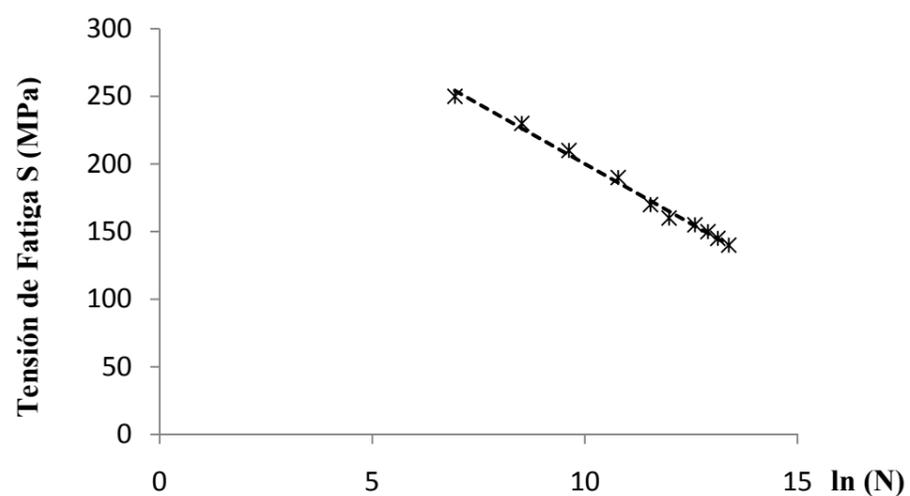


Fig. 25. Curvas S-N (Whöler) para el número de ciclos a escala logarítmica (García, 2009)

3.6. Conclusiones del Capítulo IV: es posible realizar los análisis de regresión y ANOVA asumiendo que el modelo es lineal. Los resultados del ANOVA para el modelo de la ecuación 9, se muestran en la Tabla 19. Del análisis de los correspondientes estadígrafos (t de Student y F de Fisher), se desprende que el coeficiente del modelo de la ecuación 9 y el modelo propiamente dicho son estadísticamente significativos, lo que permite concluir que el modelo describe adecuadamente, con un nivel de confianza de 95 % y un grado de ajuste de 99,6 %, el comportamiento a la fatiga de juntas soldadas de aceros inoxidable austeníticos ASTM A240 (304L)-acero estructural ASTM A537 (I) utilizando acero inoxidable austenítico ASTM A240 (308L) como material de aporte para las condiciones establecidas en las Tabla 5 de la pág. 49 (parámetros de soldadura) y Tabla A3 de los anexos, lo que permite resolver el problema identificado, dar cumplimiento al objetivo planteado y verificar la hipótesis científica del trabajo.

Tabla 19. Resultados de los ANOVA para el modelo de la ecuación 9. (García, 2009)

Variación explicada: 13158.4236275051 para Grados de libertad: 1
Variación residual: 91.5763724950316 para Grados de libertad: 8
Variación total: 13250 para Grados de libertad: 9
Error estándar de una estimación: 3.6169516070666
Error probable de una observación: 2.28206851235638
Para una prueba con nivel de confianza 0.95:
Intervalo de confianza de r : [0.98485737, 0.99921221]
Prueba de Significación del Modelo:
Para una prueba F de Fisher con nivel de confianza 0.95:
Valor de Fc para el ajuste: 1149.5038
Valor de Ft por la tabla: 4.7375
El ajuste es estadísticamente significativo ya que $F_c > F_t$.
Prueba para el Coeficiente -17.7 del Modelo (0.95)
Valor teórico (t de Student), $t = 1.86$
Valor calculado $t_2 = -33.90433319$
El coeficiente -17.7143701520612 es estadísticamente significativo ya que $t \leq t_2 $

CONCLUSIONES

1. Se obtuvo una unión metalúrgica entre los aceros ASTM A240 (304L) – ASTM A537, soldados con material de aporte ASTM A240 (308L) y proceso de soldadura por arco eléctrico semiautomático con protección de argón (GMAW) y sin someter la junta a tratamientos térmicos pre y post soldadura, que presenta propiedades mecánicas ante cargas monotónicas y cíclicas, que se pueden considerarse adecuadas para soportar los requerimientos mecánicos en condiciones de servicio de recipientes y tuberías a presión de uso frecuente en la industria productora y refinadora de hidrocarburos PDVSA.
2. Mediante la evaluación utilizando los diagramas de SHAEFFLER, DELONG y WRC, se estimó libre de fisuración la unión entre los aceros inoxidable austeníticos ASTM A240 (304L) y ASTM A240 (308L), predicción verificada mediante los ensayos metalográficos; así como posibilidad de fisuración en frío entre el acero estructural ASTM A537 (I) soldado a tope con el acero inoxidable austenítico ASTM A240 (308L), predicción descartada a través de los ensayos metalográficos.
3. Se obtuvo un modelo estadísticamente fundamentado que permite pronosticar la vida de fatiga en campo de Wöhler de juntas soldadas de aceros ASTM A240 (304L) – ASTM A537, soldados con material de aporte ASTM A240 (308L) y proceso de soldadura GMAW, aplicable a recipientes y tuberías a presión con historias de esfuerzos entre 140-250 MPa. Arrojó resistencia a la fatiga de 132 MPa para el millón de ciclos, y relación de fatiga de 0,3 (límite de resistencia a la fatiga / resistencia a la tensión) resultados que podrían ser generalizables a otras aleaciones, otros procesos y tipos de juntas y vislumbra posibilidades de ampliar el horizonte de la investigación.
4. Los resultados representan un aporte a la sustentabilidad ecológica y el uso racional de los recursos naturales incorporados a las actividades productivas, ya que al aumentar la vida útil de los equipos se mejora la tasa de utilización de los recursos naturales renovables y no renovables y con esto aumentará el tiempo previsto para su agotamiento. Al mismo tiempo se disminuyen los impactos negativos al medio ambiente por concepto de averías y fugas presentadas y se disminuyen pérdidas económicas que se derivan, y la mitigación de los consiguientes impactos ecológicos – ambientales negativos que se generan por los escapes de gases y la contaminación del subsuelo favoreciendo el desarrollo sustentable.

RECOMENDACIONES

1. Complementar la caracterización mecánica mediante los ensayos de fatiga a alto número de ciclos y fatiga con probeta fisurada, concentrando los esfuerzos en determinar la velocidad de propagación de grietas, desarrollar un modelo matemático que permita comparar con los resultados experimentales y la construcción de un tanque a escala, mediante el empleo de criterios de similitud, que permita medir deformaciones y esfuerzos bajo situaciones reales y la modelación mediante método de Elementos Finitos.
2. Profundizar en el estudio de crecimiento de grietas en uniones soldadas de materiales disímiles, pertenecientes a recipientes y tuberías sometidas a presión, ante carga monotónica y cíclica para determinar la influencia que producen las cargas alternantes en el mecanismo de surgimiento y propagación de grietas en las uniones soldadas.
3. Evaluar los efectos de las variaciones deformacionales y el tiempo de aplicación de los esfuerzos en el comportamiento de los materiales ante las condiciones estudiadas, y Evaluar los efectos del carácter de aplicación de las cargas uniaxiales y biaxiales en las variaciones deformacionales de las uniones analizadas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Manuales y textos consultados

- [01] ASKELAND, D. La Ciencia e Ingeniería de los Materiales. 3ra edición. Universidad de Missouri – Rolla. 1998.
- [02] ASM Handbook Metals, Properties and Performance Collection. American Society for Metal, Ohio 44073. 2005.
- [03] ASM Handbook. Boiler and Pressure Vessels Code, Vol. IX. American Society for Metal, Ohio 44073. 2005.
- [04] ASM Specialty Handbook. Stainless Steel, J. R. Davis (Ed.), ASM International, Materials Park, OH, USA, 1994.
- [05] AWS Handbook. The Procedure Handbook of Arc Welding. Twelfth Edition. 2007.
- [06] CALLISTER, W. Ciencia e Ingeniería de los Materiales, Editorial Reverté, 2005.
- [07] Código ASME. Sección VIII, Divisiones I y II. Diseño de Recipientes a Presión. 2007.
- [08] Código ASME. Sección IX. Calificación de Soldaduras y Soldaduras Fuertes. 1998.
- [09] DIETER, G.E. Mechanical Metallurgy. New York. McGraw-Hill. Tercera Edición. 1986.
- [10] DOWLING, N.E. Mechanical Behavior of Materials. Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue, Prentice Hall. 1998.
- [11] FORREST, P.G. Fatiga de los Metales. Editorial Urmo, 1982.
- [12] HERTZBERG, R. Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials. Third Edition. Edit Wiley, 1989.
- [13] Metals Handbook, Failure Analysis and Prevention, Volume 11, 9na Edition.
- [14] POLUSHKIN, E. Defectos y fallos de los metales. Editorial Paraninfo-1960,
- [15] SHIGLEY, J. Diseño de Elementos de Máquina. 6ª edición. Editorial McGraw-Hill. 2002.
- [16] SMITH, W. Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales. McGraw-Hill. Tercera Edición. 2004.
- [17] THIELSCH, H. Defectos y roturas en recipientes a Presión y Tuberías. Editorial Urmo, Bilbao. 1969.
- [18] Welding Handbook, Welding technology, Volume 1, AWS. 2007.

Especificaciones de Materiales:

[19] ASTM A 240/A 240M (2001). Standard Specification for Heat-Resisting Chromium and Chromium-Nickel Stainless Steel Plate, Sheet, and Strip for Pressure Vessels.

[20] ASTM A537/A537M-95 (2000). Standard Specification for Pressure Vessel Plates, Heat-Treated, Carbon-Manganese-Silicon Steel.

Especificaciones de Ensayos:

[21] ASTM E3-01 Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens.

[22] ASTM E8M-01e1 Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials.

[23] ASTM E23-02 Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials.

[24] ASTM E92-82 (1997) e3 Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials.

[25] ASTM E112-96e1 Standard Test Methods for Determining Average Grain Size.

[26] ASTM E190-92(1997) Standard Test Method for Guided Bend Test for Ductility of Welds.

[27] ASTM E466-96 Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials.

[28] ASTM E606-92 (1998) Standard Practice for Strain-Controlled Fatigue Testing.

Artículos consultados:

[29] AMIGÓ, V. "Propiedades Mecánicas de las Uniones por Laser de Aceros Inoxidables Dúplex". 2005

[30] BARREDA. "Análisis de Mecánica de la Fractura". 2005.

[31] BALASUBRAMANIAN GUHA, V. "Effect of welding processes on toe cracking behavior of pressure vessel grade steel". Indian Institute of Technology Madras, Chennai, India. 2003

[32] BALASUBRAMANIAN GUHA, V. "Fatigue crack growth behavior of welded cruciform joints". Indian Institute of Technology Madras, Chennai 600 036, 28 Febrero 2003.

[33] BORJAS M. A. "Inspección de placas y soldaduras en aluminio para recipientes a presión por el método de ultrasonido". LUZ, Facultad de Ingeniería, Maracaibo. 1993.

[34] CHENG, G. "Study on the ultrasonic fatigue test of 16MnR". 1996.

[35] CHEN, X. y ZHAO, Y. "Evaluation of fatigue damage at welded tube joint under cyclic pressure using surface hardness measurement". 2005

[36] CHOI Y CHOI, "Fatigue life prediction of out-of-plane gusset welded joints using strain energy density factor approach". 2005

[37] KECSMAR, J. "Some Notes on the Influence of Manufacturing on the Fatigue Life of Welded Aluminum Marine Structures". Journal of Ship Production, 2004.

- [38] MARTÍNEZ, M “Effects of Austempering Temperature on Fatigue Crack Rate Propagation in a Series of Modified (Cu, Ni, and/or Mo) Nodular Irons”. ASM International. 2002.
- [39] MARTTÍNEZ, R. “Obtención del valor de las variables del proceso de soldadura automática por arco sumergido (SAW) en la recuperación de árboles de molinos de caña de acero 30r (guijos) agrietados”. Universidad Central de las Villas. 2006
- [40] MASAKI, K “Initiation and propagation behavior of fatigue cracks in hard-shot peened Type 316L steel in high cycle fatigue”. Department of Mechanical Engineering and Intelligent Systems. University of Electro Communications Tokyo. 2004.
- [41] MERIZALDE C. VILLALOBOS G. PUCHI C. “Estudio sobre propagación de grietas de fatiga en una aleación comercial de Aluminio AA6063-T6”. 2003.
- [42] PUCHI-CABRERA. “Vida a la fatiga de juntas soldadas del acero inoxidable AISI 316L obtenidas mediante el proceso GMAW”. 2007
- [43] RIVAS, A. L. E. VIDAL, H. D’ARMAS, S. FANEYT, E. VILLAMISAL Y C. MOLINA, “Comportamiento Mecánico de un Acero 5Cr-0,5Mo Soldado con un Acero Inoxidable Austenítico 309Mo”. 2003.
- [44] RUDOLPH, J. “Fatigue lifetime assessment procedures for welded pressure vessel components”. Department of Chemical Engineering, University of Dortmund, Germany. 2001.
- [45] PASQUALI Y SBUTTONI. “Failure Analysis of Pressure Vessel”. 2008
- [46] PAYARES, C. “Influencia de las variables de soldadura en las propiedades mecánicas y de la microestructura en las soldaduras a tope de aleaciones de Aluminios 6063 T 5”, 2003.
- [47] VALSAN, M. “High temperature, low cycle fatigue behaviour of AISI type 316LN base metal, 316LN-316 weld joint and 316 all-weld metal”. 1995.
- [48] ZHAO, Y. “A Probabilistic Assessment of the Design S-N Curves for 1Cr18Ni9Ti Pipe-Welded Joint”. 1999.

Direcciones electrónicas:

- [49] HARVEY, B. “Industria de acero inoxidable reduce uso de níquel”. Abril 12, 2008.
<http://www.bnamericas.com/story.jsp?idioma=E§or=8¬icia=429978>
- [50] Petróleos de Venezuela S.A. (PDVSA). <http://www.pdvsa.com/>

ANEXOS

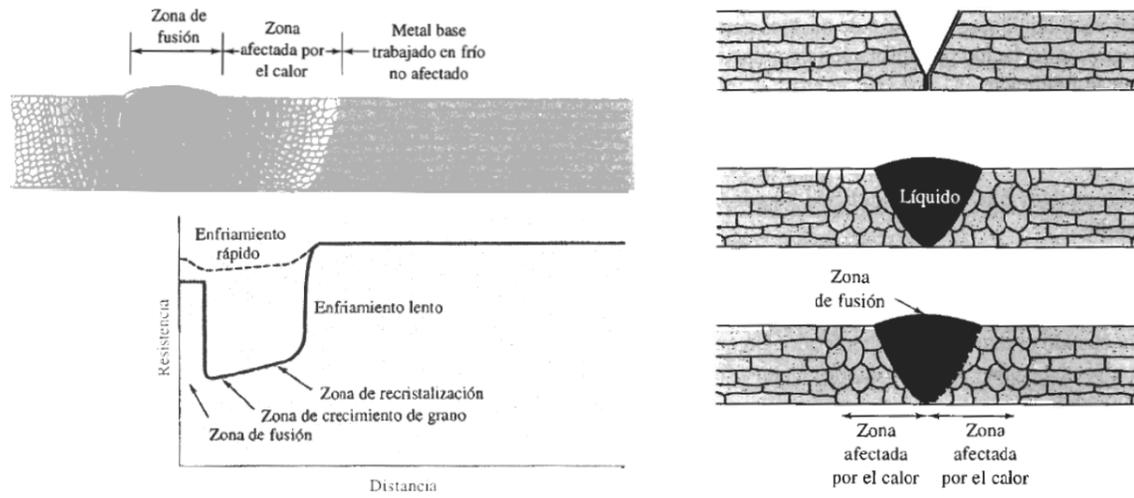


Fig. A1. Estructura y propiedades que rodean una soldadura por fusión

(Askeland, 1998)

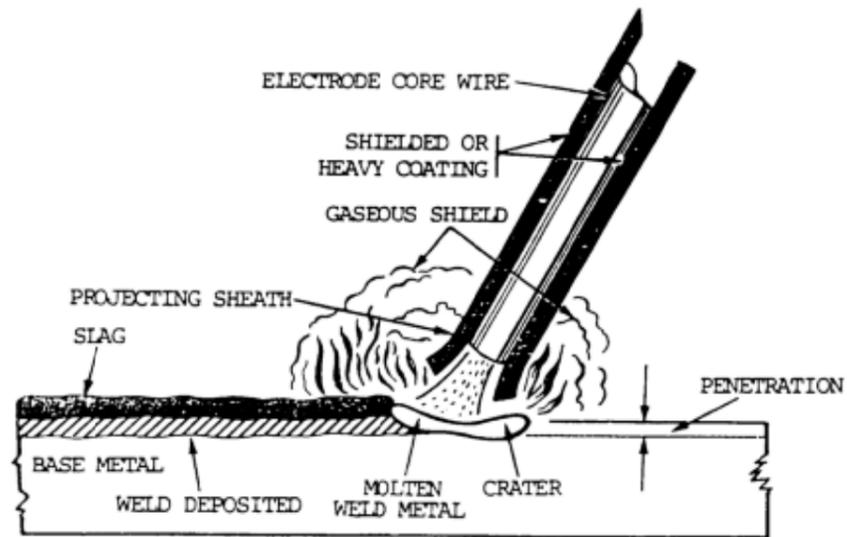


Fig. A2. Esquema de soldadura con electrodos revestidos, SMAW (AWS, 2007)

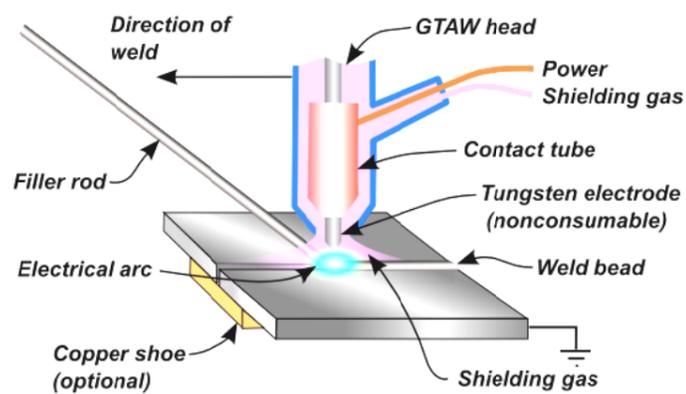


Fig. A3. Esquema de soldadura con electrodos no consumible, TIG ó GTAW (AWS, 2007)



Fig. A4. Accesorios para soldadura TIG, (AWS, 2007)

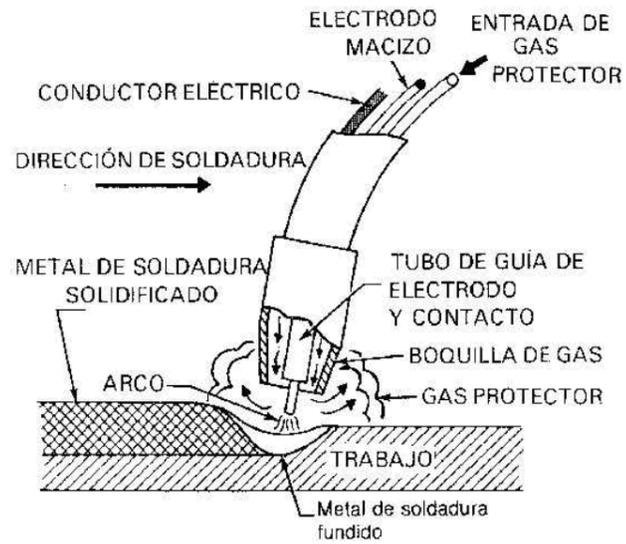


Fig. A5. Soldadura con electrodos consumible, MIG/MAG ó GMAW (AWS, 2007)

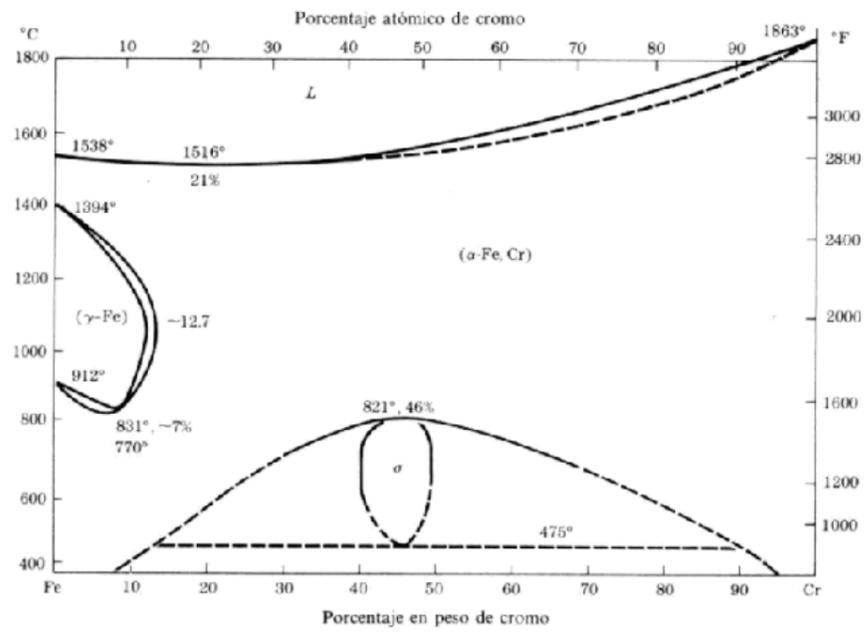
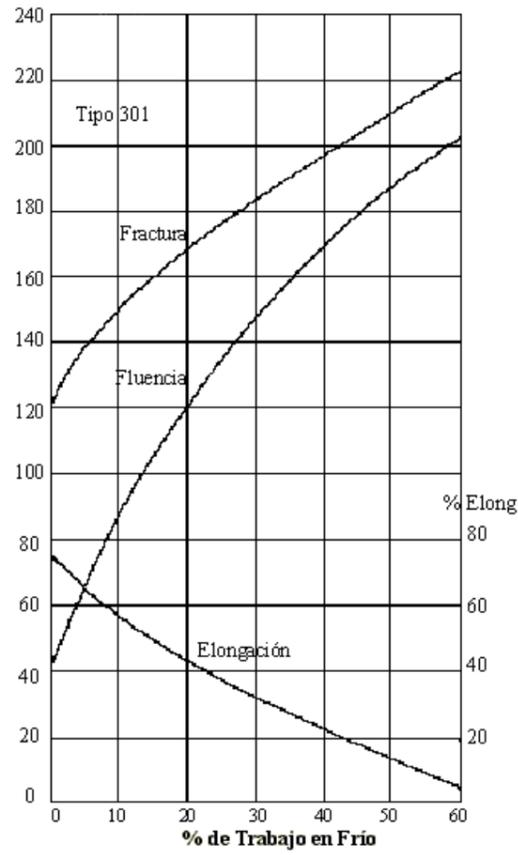
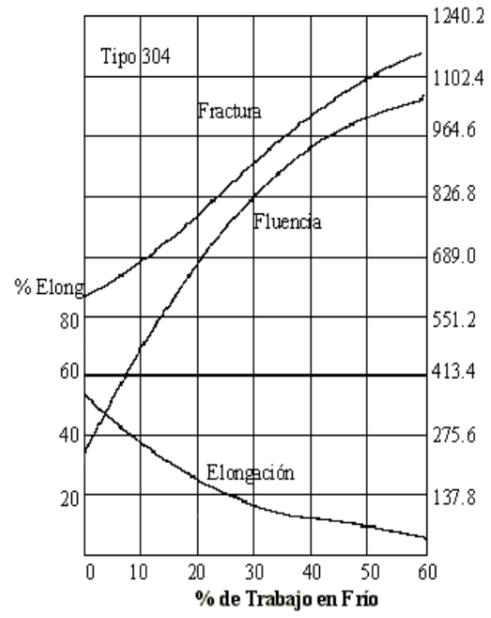


Fig. A6. Diagrama de fases Fe - Cr, (ASM Specialty Handbook. Stainless Steel, 1994)

Tensión de Fluencia y Fractura, ksi



Composición
0.056 % C, 0.87 % Mn, 0.43 % Si,
18.60 % Cr, 10.25 % Ni



Composición Normal 17.0% Cr, 7.0% Ni

Fig. A7. Efecto del trabajo en frío e las propiedades mecánicas del acero 17 Cr, 7 Ni

(ASM Specialty Handbook. Stainless Steel, 1994)

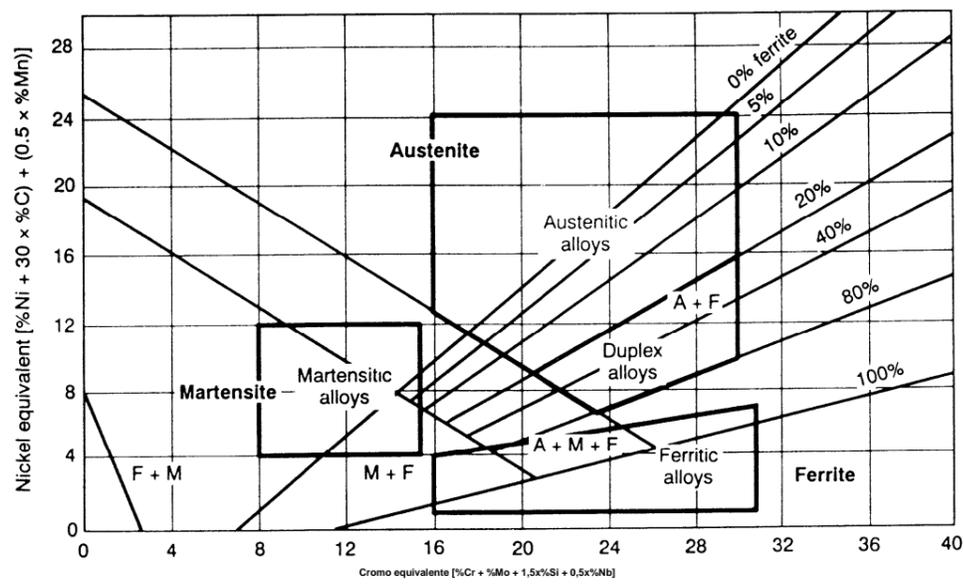


Fig. A8. Diagrama de Schaeffler (AWS, 2007)

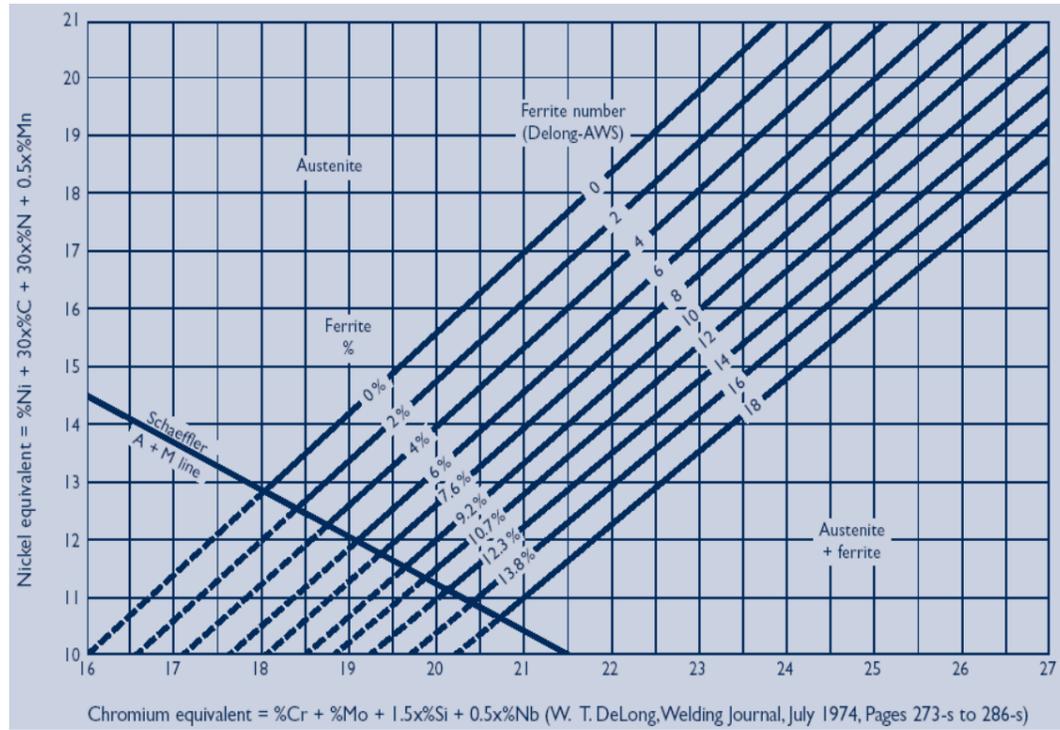


Fig. A9. Diagrama de De Long (AWS, 2007)

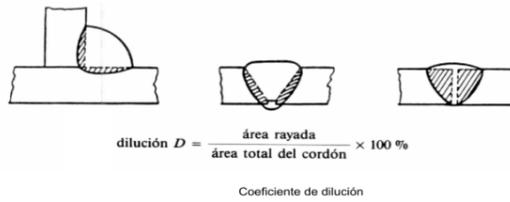


Fig. A10. Dilución (Martínez, 2006)

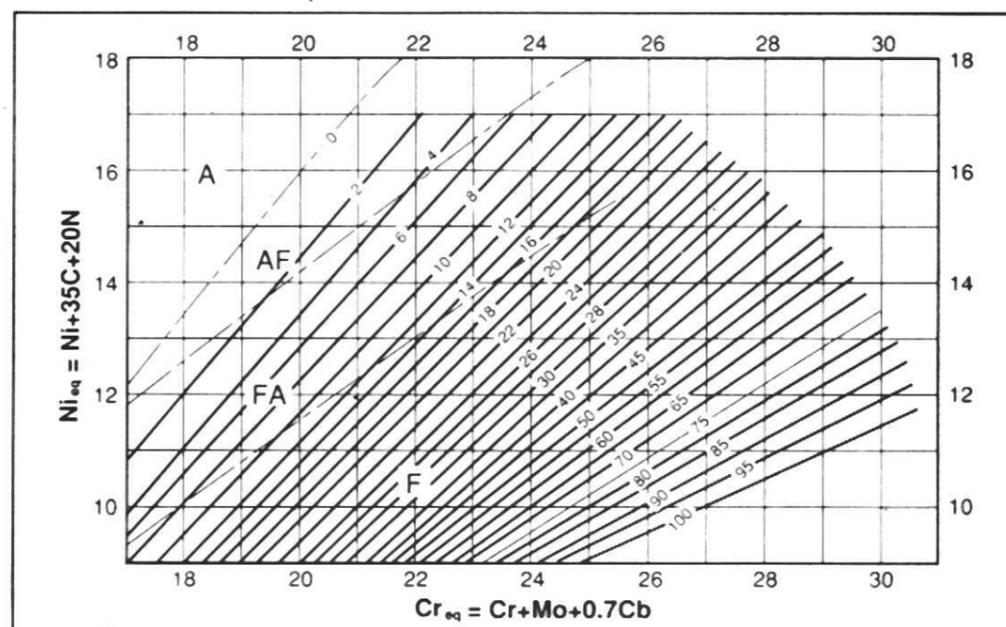


Fig. A11. Diagrama de WRC-1988 (AWS, 2007)

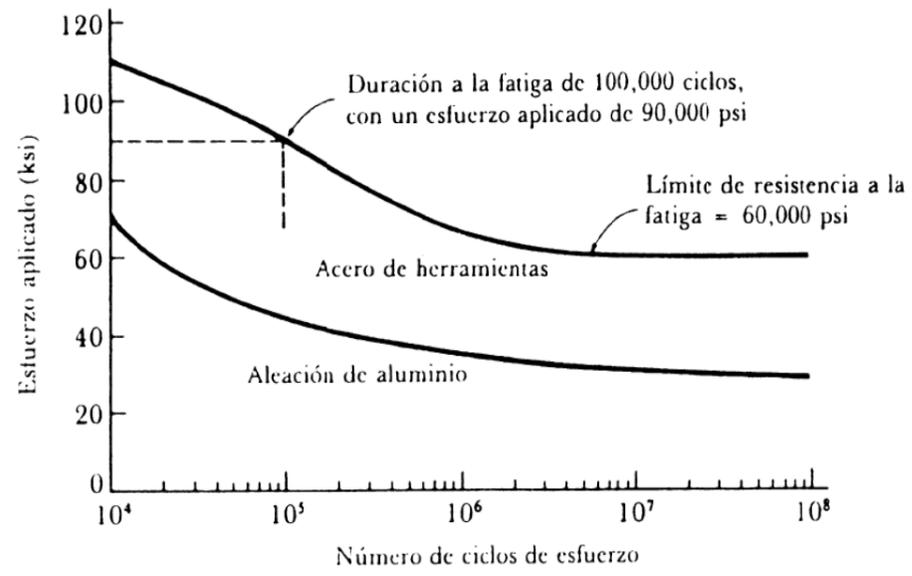


Fig. A12. Curva obtenidas en el ensayo de fatiga (Askeland, 1998)

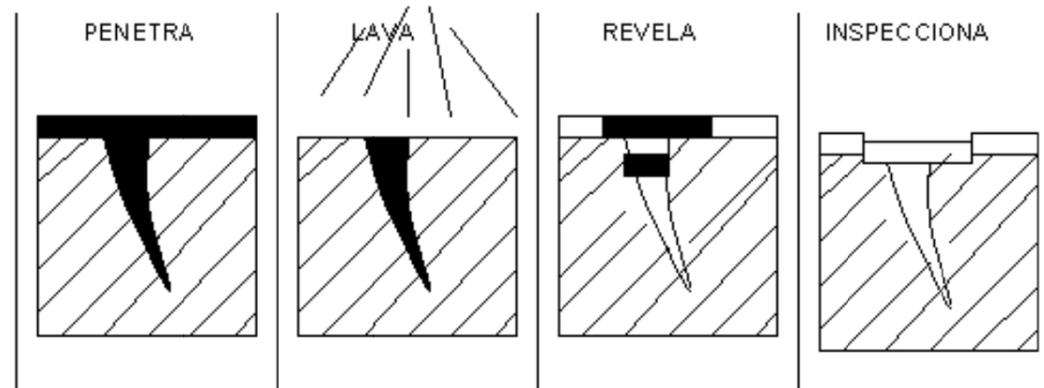


Fig. A13. Etapas de la prueba de líquidos penetrantes (Askeland, 1998)

Tabla A1. Típicos Aceros Inoxidables Austeníticos

(ASM Specialty Handbook. Stainless Steel, 1994)

Tipo	% Cr	% Ni	% C	% Mn	% Mo
302	17-19	8-10	0.15	2.0	
304	18-20	8-10	0.08	2.0	
304L	18-20	8-10	0.03	2.0	
310	24-26	19-22	0.25	2.0	
316	16-18	10-14	0.08	2.0	2.3
316L	16-18	10-14	0.03	2.0	2-3

Tabla A2. Valores aproximados de N en función del proceso de soldadura

(Martínez, 2006)

Proceso:	% de Nitrógeno en el metal depositado:
SMAW	0.060
GTAW	0.045
GMAW (Hilo tubular)	0.090
GMAW	0.140

Tabla A3. Valores obtenidos a partir de los ensayos de fatiga (García, 2008)

MB1: ASTM A240(304L)

F(0,5)	323	Resist. a la Fatiga (MPa)	218
F(0,4)	258		

Nro	S (MPa)	w (mm)	A (mm ²)	F (Ton)	Ciclos
1	380	10,75	53,75	2,083	7
2	350	10,5	52,5	1,874	2.290
3	320	10,4	52	1,697	8.481
4	310	10,1	50,5	1,597	10.472
5	300	10,25	51,25	1,568	11.865
6	290	10,05	50,25	1,486	18.575
7	280	10,05	50,25	1,435	21.812
8	270	10,1	50,5	1,391	46.357
9	260	10,2	51	1,353	66.169
10	250	10,2	51	1,301	121.201

MB2: ASTM A537(I)

F (0,5)	220	Resist. a la Fatiga (MPa)	122
F (0,4)	176		

Nro	S (MPa)	w (mm)	A (mm ²)	F (Ton)	Ciclos
1	260	10,35	51,75	1,372	1.025
2	240	10,6	53	1,297	2.574
3	230	10,8	54	1,267	3.540
4	225	10,6	53	1,216	4.513
5	222,5	10,5	52,5	1,191	4.850
6	215	10,25	51,25	1,124	7.513
7	200	10,15	50,75	1,035	17.872
8	190	10,1	50,5	0,979	21.105
9	180	10,2	51	0,936	33.194
10	130	10,4	52	0,690	1.020.747

JS:

F(0,5)	227	Resist. a la Fatiga (MPa)	132
F(0,4)	182		

Nro	S (MPa)	w (mm)	A (mm ²)	F (Ton)	Ciclos
1	250	10,3	51,5	1,313	1.036
2	230	10,1	50,5	1,185	5.004
3	210	9,9	49,5	1,060	15.165
4	190	9,9	49,5	0,959	48.203
5	170	9,9	49,5	0,858	103.073
6	160	10,25	51,25	0,836	159.351
7	155	10,1	50,5	0,798	293.171
8	150	9,9	49,5	0,757	398.756
9	145	9,8	49	0,725	501.732
10	140	10	50	0,714	649.432