

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE CUENCA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Trabajo de titulación previo a la
obtención del título de
Ingeniero Mecánico.

Proyecto Técnico

“ELABORACIÓN DEL PROCEDIMIENTO BASADO EN LA NORMATIVA
ESTÁNDAR INTERNACIONAL AWS D1.1 PARA LA DETERMINACIÓN DE
FALLOS EN JUNTAS SOLDADAS USANDO RADIOGRAFÍA INDUSTRIAL”

Autor:

Édgar Odilón García Salinas

Tutor:

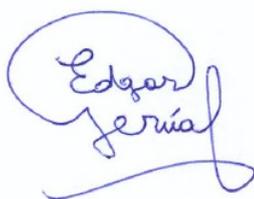
Fis. Luis Eduardo Garzón Muñoz, Ph.D.

Cuenca, Febrero 2018

Cesión de Derechos de Autor

Yo, *Édgar Odilón García Salinas*, con documento de identificación N° 0704115328, manifiesto mi voluntad de ceder a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de titulación: “*Elaboración del procedimiento basado en la normativa estándar internacional AWS D1.1 para la determinación de fallos en juntas soldadas usando radiografía industrial*”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Mecánico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

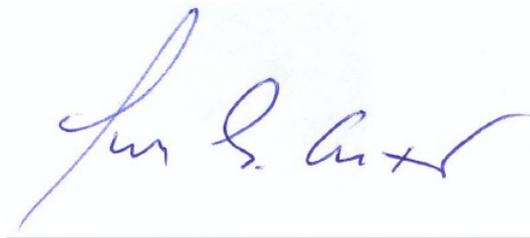
En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo éste documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



Édgar Odilón García Salinas
C.I. 0704115328

Certificación

Yo declaro que bajo mi tutoría, fue desarrollado el trabajo de titulación: *"Elaboración del procedimiento basado en la normativa estándar internacional AWS D1.1 para la determinación de fallos en juntas soldadas usando radiografía industrial"*, realizado por: *Édgar Odilón García Salinas* y , obteniendo el Proyecto Técnico, que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Luis E. Garzón", is written over a horizontal line.

Fis. Luis Eduardo Garzón Muñoz, Ph.D.
C.I. 0151388279

Declaratoria de Responsabilidad

Yo, *Édgar Odilón García Salinas*, con número de cédula 0704115328, autor del trabajo de titulación "*Elaboración del procedimiento basado en la normativa estándar internacional AWS D1.1 para la determinación de fallos en juntas soldadas usando radiografía industrial*", certifico que el total contenido del Proyecto Técnico, es de mi exclusiva responsabilidad y autoría.



Édgar Odilón García Salinas
C.I. 0704115328

Dedicatoria

Este proyecto se lo dedico

A Dios por ser mi guía y mi fortaleza para no renunciar y llegar a cumplir mis metas.

A mi padre Édgar Nicolás García Astudillo, a mi madre Chanena Jenny Salinas Jaramillo, que me han enseñado a afrontar las adversidades de la vida. Ellos con sus consejos necesarios lograron ser el hombre que hoy en día soy; que las cosas no se obtienen fácilmente, pues al contrario, se las consigue con esfuerzo y sacrificio.

A mi hermana Andrea Elizabeth García Salinas, que me ha brindado su apoyo incondicional; gracias por quererme a tu manera y seguir a mi lado.

Édgar

Agradecimientos

Agradezco a mi Dios, por la vida, la salud y por las innumerables bendiciones que día a día se tienen para que todos mis anhelos se hagan realidad.

Agradezco inmensamente a mi familia por todo su apoyo durante mi vida estudiantil, por sus consejos, sus enseñanzas, su comprensión y el cariño que siempre he tenido de ellos, me llena de mucha satisfacción saber que estuvieron en los momentos tristes y alegres de mi vida.

Agradezco a dos personas muy importantes en mi crecimiento, mi abuelita Leonor Astudillo y mi tía Mariana Astudillo, por haberme brindado su ayuda sin esperar nada a cambio y sus consejos cuando más he necesitado.

Agradezco a mi tutor el Fis. Luis Garzón, Ph.D.; Ing. Fran Reinoso, MSc e Ing. Esteban Tobar, MSc; que han sido mis docentes y guías, para poder elaborar, avanzar y culminar con éxito mi trabajo de titulación.

Agradezco al grupo de investigación GiMaT, por el apoyo y soporte necesario para culminar con éxito mi trabajo de titulación.

Édgar

Este documento fue realizado enteramente en L^AT_EX

Resumen

El proyecto técnico está enfocado en la aplicación de la técnica de radiografía industrial para visualizar los fallos en juntas soldadas de acuerdo a la normativa estándar internacional AWS D1.1. Se realizó una selección del material para poder presenciar discontinuidades en las juntas soldadas, para lo cual se utilizó el acero ASTM A36 mayormente empleado para la fabricación y el montaje de estructuras metálicas. Para la elaboración del procedimiento de práctica se emplearon todas las normas y requisitos de seguridad radiológica con la finalidad de obtener resultados óptimos que garanticen un adecuado control de calidad. Para que el Personal Ocupacionalmente Expuesto (POE) evite altos índices de dosis por radiación ionizante, se estableció un protocolo de seguridad radiológica en operaciones normales y en caso de emergencias, el mismo que tiene como objetivo precautelar la salud del operario y de las personas expuestas a radiaciones ionizantes (rayos X), para lo cual todos los trabajadores deben estar debidamente protegidos por medio de la utilización de equipos de seguridad personal e instrumentos de medición de radiaciones ionizantes. El organismo regulador de radiaciones ionizantes es el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable (MEER) y la Subsecretaría de Control y Aplicaciones Nucleares (SCAN), los mismos que son los encargados de controlar el uso y aplicación de equipos generadores de radiaciones ionizantes; igualmente se encargan de otorgar los permisos de funcionamiento y licencia a instituciones que cumplan con los respectivos requisitos para el uso de fuentes de radiación. Este trabajo es aplicado en industrias como: metalmecánica, construcciones, petroleras, médicas, metalúrgicas, etc., y a las instituciones educativas que trabajan en proyectos investigativos.

Palabras clave: Radiografía industrial, radiaciones ionizantes, rayos X, seguridad radiológica.

Abstract

The technical project is focused on the application of the industrial radiography technique to visualize the failures in welded joints according to the international standard AWS D1.1. A selection of the material was made to be able to witness discontinuities in the welded joints, for which the steel ASTM A36 mostly used for the manufacture and assembly of metal structures was used. For the development of the practice procedure, all radiological safety standards and requirements were used in order to obtain optimal results that guarantee an adequate quality control. For the Occupationally Exposed Personnel (POE) to avoid high dose rates for ionizing radiation, a radiological safety protocol was established in normal operations and in case of emergencies, the purpose of which is to protect the health of the operator and the people exposed to ionizing radiation (X-rays), for which all workers must be adequately protected through the use of personal safety equipment and ionizing radiation measuring instruments. The regulatory agency for ionizing radiation is the Ministry of Electricity and Renewable Energy (MEER) and the Undersecretariat of Control and Nuclear Applications (SCAN), which are in charge of controlling the use and application of ionizing radiation generating equipment; They are also in charge of granting operating permits and licenses to institutions that comply with the respective requirements for the use of radiation sources. This work is applied in industries such as: metalworking, construction, oil, medical, metallurgical, etc., and educational institutions working on research projects.

Keywords: Industrial radiography, ionizing radiation, X-rays, radiological safety.

Índice

	<u>Pág.</u>
Índice	IX
Lista de figuras	XI
Lista de tablas	XIII
1 Elaboración del procedimiento basado en la normativa estándar internacional AWS D1.1 para la determinación de fallos en juntas soldadas usando radiografía industrial	1
1.1 Introducción	1
1.2 Problema	2
1.2.1 Antecedentes	2
1.2.2 Importancia y alcances	3
1.2.3 Delimitación	3
1.3 Objetivos	3
1.3.1 Objetivo general	3
1.3.2 Objetivos específicos	3
1.4 Marco teórico referencial	4
1.4.1 Ensayos no destructivos END	4
1.4.2 Radiografía industrial	4
1.4.3 Soldadura	11
1.4.4 Seguridad radiológica	21
1.5 Marco Metodológico	26
1.5.1 Tipo de investigación	26
1.5.2 Diseño de la investigación	26
1.6 Resultados	33
1.6.1 Selección del material para el análisis mediante la técnica de radiografía industrial	33
1.6.2 Elaboración del procedimiento de práctica en inspección por radiografía industrial en juntas soldadas	35
1.6.3 Protocolo de seguridad radiológica para la utilización del equipo generador de rayos X	45
1.7 Conclusiones	55
1.8 Recomendaciones	55
1.9 Trabajos futuros	56

Referencias bibliográficas	57
Anexos	59
Anexo A.1 Licencias del personal ocupacionalmente expuesto	60
Anexo A.1 Licencias del personal ocupacionalmente expuesto	61
Anexo A.2 Certificado de calibración del equipo medidor de rayos X	62

Lista de figuras

	<u>Pág.</u>
Figura 1.1 – Radiografía en una tubería de petróleo	5
Figura 1.2 – tubo de producción de rayos X	6
Figura 1.3 – Radiación de frenado (Bremsstrahlung)	7
Figura 1.4 – Radiación de emisión de la capa K	8
Figura 1.5 – Efecto del cambio de miliamperaje en un tubo de rayos X	9
Figura 1.6 – Tipos de juntas de soldadura	12
Figura 1.7 – Biselado en V para estudios de unión entre dos materiales	13
Figura 1.8 – Tipos de biseles	13
Figura 1.9 – Cordón normal	14
Figura 1.10–Cordón de tampón	14
Figura 1.11–Cordón de ranura	15
Figura 1.12–Cordón de filete	15
Figura 1.13–Diagrama de los procesos de soldadura	16
Figura 1.14–Proceso SAW	16
Figura 1.15–Proceso GMAW	17
Figura 1.16–Proceso GTAW	17
Figura 1.17–Proceso SMAW	18
Figura 1.18–Inclusiones gaseosas	18
Figura 1.19–Tipos de fisuras	19
Figura 1.20–Falta de fusión y penetración	20
Figura 1.21–Defectos superficiales externos	20
Figura 1.22–Incrustaciones de escoria	21
Figura 1.23–Incrustación de tungsteno	21
Figura 1.24–Fuentes de radiación que percibe el ser humano	22
Figura 1.25–Irradiación externa	23
Figura 1.26–Contaminación radioactiva	23
Figura 1.27–Control de protección radiográfica	26
Figura 1.28–Tubo generador de rayos X	27
Figura 1.29–Unidad de control	28
Figura 1.30–Equipo revelador	29
Figura 1.31–Líquido Fijador (A+B) y Líquido Revelador (A+B+C)	29
Figura 1.32–Diseño del proceso para elaboración de las probetas	30
Figura 1.33–Película radiográfica D7 INDUSTREX (Carestream) AA400 con pantalla de plomo	30
Figura 1.34–Medidor de radioactividad digital Geiger-Müller de marca GAMMA-SCOUT®	31

Figura 1.35–Dosímetro personal	32
Figura 1.36–Negatoscopio	32
Figura 1.37–Curva de calibración para el equipo generador de rayos X	33
Figura 1.38–Selección del metal base y metal de aportación	34
Figura 1.39–Detalles para juntas soldadas a tope de canal simple con bisel tipo V	34
Figura 1.40–Detalle del diseño de la junta de soldadura	35
Figura 1.41–Imagen fotográfica de la probeta 1	39
Figura 1.42–Plano de la probeta 1	40
Figura 1.43–Imagen radiográfica de la probeta 1	40
Figura 1.44–Imagen radiográfica detallada de la probeta 1	41
Figura 1.45–Imagen radiográfica ampliada de la probeta 1	41
Figura 1.46–Imagen fotográfica de la probeta 2	43
Figura 1.47–Plano de la probeta 2	43
Figura 1.48–Imagen radiográfica de la probeta 2	44
Figura 1.49–Imagen radiográfica detallada de la probeta 2	44
Figura 1.50–Imagen radiográfica ampliada de la probeta 2	44
Figura 1.51–Organigrama funcional	46

Lista de tablas

	<u>Pág.</u>
Tabla 1.1 – Densidades de algunos materiales que se utilizan en radiografía	8
Tabla 1.2 – Especificaciones técnicas del tubo generador de rayos X AXFQ-2005	27
Tabla 1.3 – Componentes químicos del Líquido Fijador (A+B)	28
Tabla 1.4 – Componentes químicos del Líquido Revelador (A+B+C)	28
Tabla 1.5 – Datos técnicos del medidor de radioactividad digital Geiger-Müller de marca GAMMA-SCOUT®	31
Tabla 1.6 – Características del diseño de la junta de soldadura	35
Tabla 1.7 – Análisis de resultados de la probeta 1	41
Tabla 1.8 – Análisis de resultados de la probeta 2	45
Tabla 1.9 – Características del medidor de radioactividad Geiger Müller	47
Tabla 1.10–Límites de dosis para el POE y público en general	48
Tabla 1.11–Características técnicas del tubo generador de rayos X	49

Abreviaturas y/o definiciones

AWS	American Welding Society (Sociedad Americana de Soldadura).
END	Ensayos No Destructivos.
NBS	Normas Básicas Internacionales de Seguridad.
OIEA	Organismo Internacional de Energía Atómica.
SMAW	Shielded Metal Arc Welding (Soldadura por Arco con Electrodo Metálico Revestido).
ASTM	American Society for Testing and Materials (Sociedad Americana para Ensayos y Materiales).
UNSCEAR	United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (Comité Científico de las Naciones Unidas Dedicadas a la Radiación Atómica).
MEER	Ministerio de Electricidad y Energía Renovable.
SCAN	Subsecretaría de Control y Aplicaciones Nucleares.
POE	Personal Ocupacionalmente Expuesto.
Gy	En el SI, la unidad de medida que establece la dosis absorbida se denomina Gray.
Sv	En el SI, la unidad de medida que establece la dosis efectiva se denomina Sievert.

Elaboración del procedimiento basado en la normativa estándar internacional AWS D1.1 para la determinación de fallos en juntas soldadas usando radiografía industrial

1.1 Introducción

En la actualidad para las industrias es necesaria la aplicación de los ensayos no destructivos, así como también poder contar con laboratorios para realizar los trabajos que se requieran. Existen algunos tipos de ensayos no destructivos tales como: inspección visual, tintas penetrantes, termografía infrarroja, partículas magnéticas, ultrasonido, radiografía industrial. Este trabajo está relacionado con el ensayo no destructivo (END) por radiografía industrial, enfocado a los rayos X; el cual mostrará un procedimiento para su correcta aplicación. Las radiografías industriales, son usadas para visualizar la presencia de discontinuidades dentro de una soldadura, probetas o elementos soldados. Para la determinación de fallos en soldaduras por medio de radiografía industrial, debe tomarse algunas consideraciones para la correcta aplicación de este ensayo, principalmente realizar una buena soldadura, la cual el inspector debe asegurarse de los procedimientos del mismo que hayan sido calificados de acuerdo al tipo de material y junta a utilizar, así como también el personal y el equipo de soldadura, deben estar calificados. Realizando la soldadura en el material, se procede a una inspección visual, por ende, se debe cumplir con unos criterios de aceptación de acuerdo a la Norma AWS D1.1, para luego aplicar el procedimiento de inspección por rayos X. La aplicación de éste ensayo, debe ser regida por un procedimiento específico como lo dicta la Norma AWS D1.1 [1]. La protección radiológica, especifica las magnitudes y unidades radiológicas utilizadas para cuantificar la dosis, dosis adsorbida, dosis efectiva, dosis equivalente, y los límites de dosis de acuerdo a las Normas Básicas Internacionales de Seguridad (NBS) y al Organismo Internacional de Energía

Atómica (OIEA), para evitar la aparición de efectos nocivos para la salud a corto, mediano y largo plazo, así como emplear instrumentos más idóneos para la medición y control de las dosis.

Los procedimientos de la radiografía industrial, contienen las siguientes variables necesarias como: identificación del equipo, valores del control de radiación e imagen, rangos de espesor de soldadura, tipos de junta de soldadura, velocidad de escaneo, distancia de la fuente a la soldadura, distancia de la pantalla a la soldadura, ángulo de rayos X, ubicación del indicador de calidad de imagen, tipo de medio de registro, mejoramiento por computadora, ancho del haz de radiación, protocolo de caracterización de la indicación y criterios de aceptación.

Los criterios de aceptación, de acuerdo a las tablas de la Norma AWS D1.1, y la clase de severidad de la discontinuidad se realiza la aceptación o rechazo, los registros debe incluir junto con las imágenes grabadas un registro escrito proporcionando la siguiente información: identificación y descripción de la soldadura examinada, procedimientos utilizados, equipo utilizado, ubicación de las soldaduras dentro del medio de registro, resultados, incluyendo una lista de las soldaduras inaceptables y reparaciones con su ubicación dentro del medio de registro [1].

El proceso de soldadura eléctrica por arco con electrodo revestido, SMAW (Shielded Metal Arc Welding), es comúnmente utilizado a nivel mundial, puesto que existen también un sinnúmero de procesos de soldadura; por ello este proceso de soldadura es el elegido para el desarrollo del presente trabajo.

Hoy en día el ensayo por rayos X, está siendo suplantado por el ensayo de ultrasonido, pero se debe tomar en cuenta las ventajas de la radiografía industrial, y es que ésta puede usarse en materiales ferrosos y no ferrosos, metálicos y no metálicos, lo que proporciona un registro permanente de la condición interna de un material. Es más fácil poder identificar el tipo de discontinuidad que se detecta, revela discontinuidades estructurales y errores de ensamblaje. En sus limitaciones encontramos que es difícil de aplicar en piezas de geometría compleja o en áreas poco accesibles, la pieza debe tener acceso en ambos lados y se requiere medidas de seguridad para la protección contra la radiación.

La línea de investigación de este trabajo está dirigida a la elaboración de un procedimiento basado en la Norma AWS D1.1, para detectar fallos en juntas soldadas por medio de radiografía industrial utilizando los rayos X, dado en el transcurso del tiempo, se ha convertido en una herramienta de uso cotidiano en las industrias que desean mantenerse en la vanguardia del mercado con sus productos [2].

1.2 Problema

1.2.1 Antecedentes

Hoy en día las industrias no brindan la adecuada atención hacia el tema de END, especialmente al ensayo de radiografía industrial, utilizando los rayos X, por cuanto a algunos procesos no son debidamente analizados en el tema de control de calidad, originando fallas y deficiencias en procesos

de soldadura, por lo que es indispensable la aplicación de las normativas internacionales, como en el caso de la norma AWS D1.1, para cumplir con los estándares internacionales y poder brindar productos de excelente calidad.

1.2.2 Importancia y alcances

Actualmente en la ciudad de Cuenca no existen laboratorios que realicen análisis de radiografía industrial para detectar fallos en materiales, utilizando normativa internacional. La Universidad Politécnica Salesiana, posee algunos equipos de última tecnología tales como: inspección visual, tintas penetrantes, partículas magnéticas, ultrasonido industrial, termografía infra-roja, presión hidrostática y radiografía industrial. El presente trabajo está enfocado en el procedimiento y análisis para la toma de muestras en juntas soldadas a tope de canal simple con bisel tipo V, utilizando el método de radiografía industrial con un tubo generador de rayos X, bajo la norma AWS D1.1., enfocada en materiales metálicos como el acero estructural ASTM A36.

1.2.3 Delimitación

El proyecto será desarrollado en el Laboratorio de Ensayos No destructivos, de Ingeniería Mecánica, de la Universidad Politécnica Salesiana de la ciudad de Cuenca, la cual cuenta con un equipo generador de rayos X, marca Angstrom con la serie AXFQ-2005 y un equipo revelador marca JPI Automatic X-Ray Filmprocessor Model JP-33.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Realizar procedimiento bajo norma estándar internacional AWS D1.1 utilizando la técnica de radiografía industrial en el laboratorio de END de manera segura para determinar fallos en juntas soldadas.

1.3.2 Objetivos específicos

- Seleccionar el material para el análisis mediante la técnica de radiografía industrial en juntas soldadas.
- Utilizar la normativa para la elaboración del procedimiento de práctica en inspección por radiografía industrial en juntas soldadas.

- Emplear protocolo de seguridad radiológica para la utilización del equipo de generación de rayos X.

1.4 Marco teórico referencial

1.4.1 Ensayos no destructivos END

Son las técnicas no destructivas de inspección, detección y evaluación de discontinuidades internas o externas aplicadas a materiales metálicos y no metálicos sin alterar sus propiedades físicas, químicas o mecánicas [3].

Por las distintas ventajas que ofrece este método, es muy usado en las industrias, especialmente en las constructoras y de fabricación de maquinaria como la automotriz, las mismas que desarrollan grandes avances con la finalidad de lograr buen desempeño, pocas pérdidas económicas y sobretodo evitar falla a futuro o pérdidas humanas [3]. Los ensayos más conocidos son:

- Inspección Visual.
- Tintas penetrantes.
- Ultrasonido.
- Corrientes inducidas.
- Partículas magnéticas.
- Metalografía de réplica.
- Termografía.
- Radiografía industrial.

Este proyecto se va a centrar en el desarrollo de la radiografía industrial, tanto en la interpretación de defectos y fallas, como en la correcta aplicación del método según la norma AWS D1.1. Por otro lado, el ensayo de radiografía es considerado como uno de los ensayos no destructivos más confiables, por lo que se va aplicar en placas para ver distintos defectos ocasionados en la soldadura.

1.4.2 Radiografía industrial

La radiografía industrial es un proceso de END de inspección volumétrica, que permite detectar y buscar discontinuidades, aprovechando que es una radiación electromagnética de longitud de onda corta, la cual puede penetrar materiales sólidos como: metales, polímeros, etc. [4].

Este método tiene una gran aplicación dentro de algunas industrias tal es el caso que se ha vuelto indispensable dentro de algunas áreas tales como: la medicina, ingeniería, seguridad, etc. En la figura 1.1 se puede ver la aplicación de la radiografía industrial de forma directa en el campo y sobre una tubería de petróleo.



Figura 1.1 – Radiografía en una tubería de petróleos [4].

El material se irradia y se presentan cambios internos que hacen que se retenga la radiación si existen heterogeneidades. La radiación ionizante que logra traspasar el objeto puede ser registrada por medio de la impresión en una placa o papel fotosensible. Al colocar una película radiográfica se obtienen cambios en la tonalidad en las zonas donde se recibe la radiación. La correcta interpretación de la imagen permite la detección de fallos que no se pueden ver. La energía de los rayos X o Gamma es absorbida o atenuada al atravesar un material (de manera proporcional a la densidad, espesor y configuración del material inspeccionado). Actualmente, dentro de la industria existen dos técnicas comúnmente empleadas para la inspección radiográfica, como ya se ha ido introduciendo: radiografía con rayos X y radiografía con rayos Gamma. La principal diferencia entre estas dos técnicas es el origen de la radiación: los rayos X proceden de un alto potencial eléctrico, los rayos Gamma se producen, en cambio, por desintegración atómica espontánea de un radioisótopo [4]. Un equipo de radiografía industrial está compuesto por diversas partes:

- **Fuente de radiación (rayos X o rayos Gamma):** equipos o elementos radioactivos con la capacidad de producir radiación electromagnética, que van equipados de acuerdo a su función, condiciones de operación y los tipos de materiales que se van a inspeccionar.
- **Controles de la fuente:** son los distintos dispositivos con los cuales cuenta las fuentes de radiación y mediante ellos se pueden ingresar distintos valores de operación como, por ejemplo: voltajes de aplicación, intensidad, amperajes, etc.
- **Película radiográfica:** elemento que constituye el medio donde se registra la imagen radiográfica y que está constituida de una hoja de acetato transparente o plástico de un espesor delgado, además, está cubierta de emulsiones de bromuro de plata con un grosor aproximado de 0,0254mm [5].

- **Pantallas intensificadoras:** son láminas de textura flexible, constituidas de un material que es capaz de interrelacionarse con las radiaciones electromagnéticas hasta el punto de convertirlas en visibles.

- **Indicadores de calidad de una imagen:** tal como su nombre lo dice son indicadores que permiten determinar los valores mínimos de sensibilidad aceptables de una imagen radiográfica. Con esta técnica de END se alcanzan excelentes resultados para la detección de defectos volumétricos que tengan un volumen superior al 3% relativo al espesor del material en la dirección de los rayos incidentes [4].

1.4.2.1 Fuentes de radiación

El proceso de inspección radiográfica se fundamenta en el fenómeno físico que tiene la energía radiante de longitud de onda muy corta, de penetrar materiales opacos a la luz visible. Las fuentes de energía radiante de longitud de onda corta que se usan típicamente en este proceso son los rayos X y los rayos Gamma [6].

- **Generadores de rayos X:** dispositivos que tienen la capacidad para convertir energía cinética de los electrones en rayos x, y de acuerdo a su potencia se clasifican en equipos de alta y baja energía. Uno de los elementos más conocidos y utilizados en la industria son los tubos de rayos X, los cuales operan en 100 a 400 kV [5]. En la figura 1.2, se muestra de forma esquematizada este dispositivo, que está conformado por un cátodo y un ánodo los cuales son los encargados de la aceleración de los electrones para la producción de rayos X.

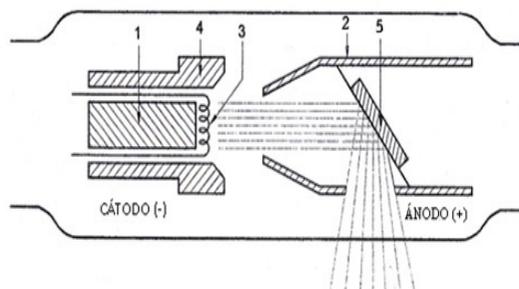


Figura 1.2 – Tubo de producción de rayos X, el cual consta de: 1.- Cátodo, 2.- Ánodo, 3.- Filamento, 4.- Cúpula de concentración, 5.- Anticátodo [5].

Los equipos de emisión radiográfica de rayos X presentan las siguientes ventajas [5]:

- Se puede suspender la emisión de la radiación en cualquier instante.
- Existe grandes condiciones de seguridad.
- La radiación X, presenta muy buena calidad con respecto a los radioisótopos que emanan este tipo de radiación electromagnética.

- No se requiere de blindaje tan pesado, tal como el que se necesita para la protección de la radiación producida por isótopos.
- Con respecto a la penetración, puede existir una variación dependiendo el tipo de material y sus espesores.

1.4.2.2 Rayos X

Son radiaciones electromagnéticas emitidas por el ánodo de un bulbo al vacío al recibir el impacto de los electrones que parten del cátodo, teniendo menor longitud de onda, pero con mayor energía [6]. Este tipo de radiación puede ser obtenido por dos procesos como:

- Radiación de frenado (Bremsstrahlung).
- Radiación de emisión de la capa K.

- **Radiación de frenado (Bremsstrahlung):** ambas involucran un determinado cambio en el estado de sus electrones, pero cabe mencionar que la forma de producción a través del método de frenado es más sencilla de entender en términos conocidos de la radiación, ya que la misma es emitida cuando la velocidad del electrón con carga negativa se disminuye después de oscilar alrededor del núcleo positivo de un átomo de tungsteno [6], tal como se puede apreciar en la figura 1.3.

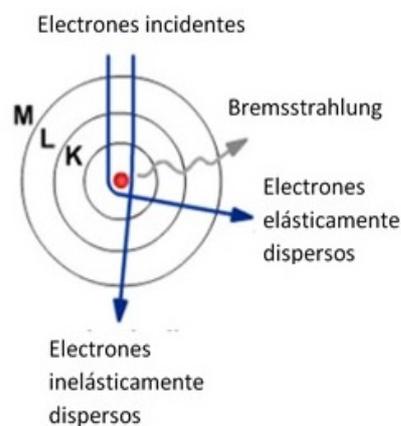


Figura 1.3 – Radiación de frenado (Bremsstrahlung). **Fuente:** Autor.

El principio de este fenómeno para la producción de los electrones se dispersa de manera elástica e inelástica por el núcleo positivo. De tal forma que los electrones que se dispersan de forma inelástica pierden algo de energía y lo cual produce un fotón o haz de rayos X. Por otro lado, los electrones emitidos o dispersados de forma elástica cambian de dirección perdiendo energía y dispersándose en el ambiente.

- **Radiación de emisión de la capa K:** hay que recordar que los átomos poseen electrones de forma organizada y bien distribuida en capas, las mismas que tienen distintos niveles de energía.

La capa K presenta el estado energético más bajo del átomo, por lo que un electrón de una capa externa puede entregarle energía a otro que se encuentre en la capa K para expulsarlo, es así que un electrón de tungsteno de mayor energía puede caer dentro de la capa K y la energía perdida por el electrón que cae, aparece en un fotón de rayos X emitido, es así como se produce la radiación X [6], ver figura 1.4.

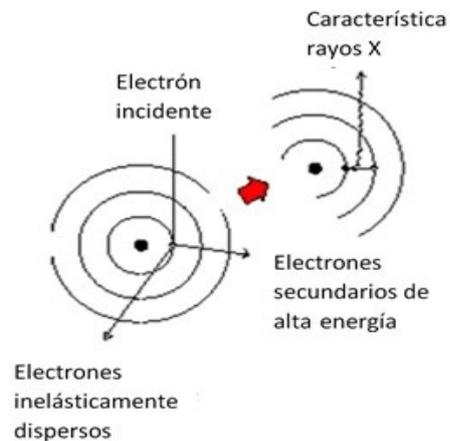


Figura 1.4 – Radiación de emisión de la capa K. **Fuente:** Autor.

Cabe mencionar que la emisión de la capa K produce rayos X en mayor proporción que el método de Bremsstrahlung.

1.4.2.3 Penetración de la radiación

Es la menor o mayor capacidad que tiene la radiación de atravesar un material; esta capacidad depende de la longitud de onda de la radiación y de la naturaleza del material irradiado [6]. En la tabla 1.1 se muestran algunos materiales y sus densidades, los cuales se utilizan en blindajes para el uso de radiaciones de baja y alta energía.

Tabla 1.1 – Densidades de algunos materiales que se utilizan en radiografía [7].

Materiales	Densidad (kg/m^3)
Hormigón	2300
Madera	720
Papel	930
Plomo	10540
Ladrillo	1920
Acero	7870
Poliestireno	55
Asfalto	2115
Baquelita	1300

1.4.2.4 Distancia focal

Es la distancia desde el foco del tubo generador de los rayos X hasta la película radiográfica que se está empleando para observar los resultados.

1.4.2.5 Tiempo de exposición

Periodo que establece el tiempo durante el cual se mantiene el equipo emitiendo radiación, regulando a la vez la cantidad de rayos X.

1.4.2.6 Kilovoltaje (kV)

Conocido como el diferencial de potencial, en los equipos de generación de rayos X, este cambio de potencia se da entre el ánodo y cátodo, que a su vez varía la energía cinética de los electrones, de tal forma que suelen modificar el promedio de una longitud de onda de un haz de radiación, por lo que puede intensificar o disminuir la cantidad de penetración sobre un determinado material [5].

1.4.2.7 Miliamperaje (mA)

Es una magnitud de la intensidad eléctrica y dentro de los equipos de radiación X, actúan directamente sobre los electrones los cuales impactan sobre el ánodo, a su vez la cantidad de tanto de incremento o decremento de miliamperajes, se refleja en la radiación que se emite. Cabe mencionar que no se modifica la longitud ni la onda del haz de radiación electromagnética, tal como se puede apreciar en la figura 1.5.

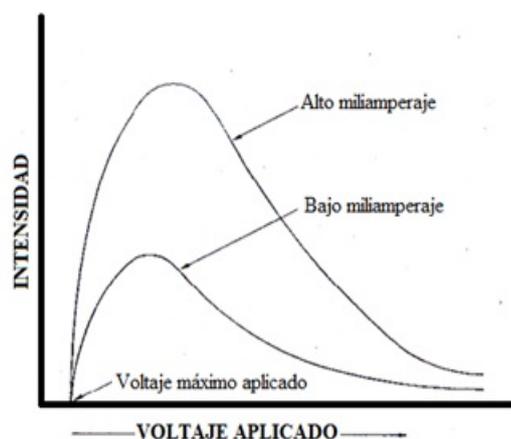


Figura 1.5 – Efecto del cambio de miliamperaje en un tubo de rayos X [5].

1.4.2.8 Principio de aplicación de los rayos X

A continuación, se detalla cómo sería el principio básico de aplicar este END [2]:

- Primero se debe contar con una fuente de radiación, que puede ser un equipo de rayos X.
- El elemento o la parte que se va a inspeccionar se ubica entre la fuente y la película que debe ser sensible a la radiación.
- La radiación que logra atravesar la pieza a evaluarse, logra exponerse y formar un esquema por medio de sombras sobre una película que es sensible a la radiación.
- Una vez desarrollado el fenómeno anterior, y después de haber realizado el proceso de revelado de la película como resultado se tiene una gran variación de grises en la placa radiográfica realizada, que facilita determinar la composición de material y el espesor. Así como también se puede ver la presencia de algunos defectos o discontinuidades existentes en el elemento analizado.

La radiografía industrial presenta ventajas como:

- Facilita una imagen visual de defectos internos como superficiales de los materiales a ser inspeccionados.
- Presenta escasas limitaciones en todo lo que tiene que ver con la inspección de distintos materiales o elementos tanto mecánicos como estructurales.
- Es muy utilizada para examinar áreas que están completamente cubiertas o con acceso restringido.
- No es necesario acceder de forma directa hacia la parte que se va a analizar.
- Descubre los errores de fabricación y ayuda a establecer las acciones correctivas.
- Se obtiene en el ensayo de la inspección un registro permanente.
- Se puede aplicar a un amplio rango de espesores, desde láminas de metal hasta las secciones de mayor espesor.

A continuación, presentamos las siguientes limitaciones:

- Se requiere de instalaciones especiales como son: el área de exposición, un cuarto oscuro para el procesado de la película y equipo de seguridad.
- La tecnología para el desarrollo de éste ensayo es relativamente costosa.
- Necesariamente se requiere de personal altamente capacitado, calificado y con experiencia.
- No permite indicar a que profundidad está ubicado un determinado fallo o discontinuidad.

1.4.3 Soldadura

Proceso industrial mediante el cual se puede conseguir uniones permanentes entre materiales de la misma naturaleza o distinta. Para el desarrollo de este proceso de unión es indispensable la aplicación de calor o presión, en donde se agregue o no, un material de aporte.

1.4.3.1 Sociedad Americana de Soldadura (AWS)

La Sociedad Americana de Soldadura es una organización creada en el año de 1919; no tenía fines de lucro y sus objetivos estaban centrados en realizar avances tecnológicos y científicos en las áreas de procesos de uniones permanentes (soldaduras) y cortes; además, la AWS con el tiempo se ha vuelto el encargado de establecer códigos, especificaciones, métodos, etc. En general todas las normas (AWS D1.1 y AWS D1.5) que regulan distintos procesos de unión y calificación de personal que se encarga del desarrollo óptimo, de los distintos procesos de soldadura, así como la calificación del personal encargado de la elaboración de cordones de soldadura [8].

1.4.3.2 Terminología general

Existe gran variedad de terminología que se han estandarizado dentro de las normativas AWS, los cuales son indispensables y que han sido acogidos por diversas entidades, que se dedican a la construcción y reparación de distintas estructuras e instalaciones en las cuales se emplea varios procesos de soldadura. A continuación, se detalla los términos principales que son más utilizados, que se definen según la AWS A3.0 [9].

- **Soldabilidad:** es la capacidad que presenta determinado material, para la aplicación de un proceso de soldadura.
- **Soldador:** es la denominación que se le da a una persona con la capacidad y el conocimiento de realizar un determinado proceso de soldadura. Existen los que son calificados y no calificados.
- **Máquina de soldar:** equipo que cuenta con la tecnología necesaria, para generar las condiciones adecuadas para el desarrollo de una soldadura o unión permanente.
- **Ensayo no destructivo:** proceso de inspección que permite determinar el estado físico de una pieza, cordón de soldadura, estructura, etc., sin la necesidad de alterar sus condiciones físicas o químicas.
- **Defecto:** puede estar conformado por una discontinuidad o varias, que por su naturaleza y efectos pueden causar daños sobre un determinado elemento, está considerado dentro de la normativa y

especificaciones de aceptación bajo los mínimos rangos aplicables.

1.4.3.3 Posiciones de soldadura

Las posiciones de soldadura son las ubicaciones en las que se pone el soldador con referencia a la junta a ser soldada, con la finalidad de obtener ergonomía. Las posiciones que son básicas dentro del proceso de soldadura son: Plana, vertical, horizontal y sobre cabeza [9].

1.4.3.4 Tipos de juntas

Corresponden a las distintas posiciones como se orientan o arreglan los elementos que van a ser sometidos a un proceso de soldadura, de tal forma que el soldador obtenga ergonomía y seguridad para que lleve el proceso. A continuación en la figura 1.6, se menciona los tipos que existen [3].

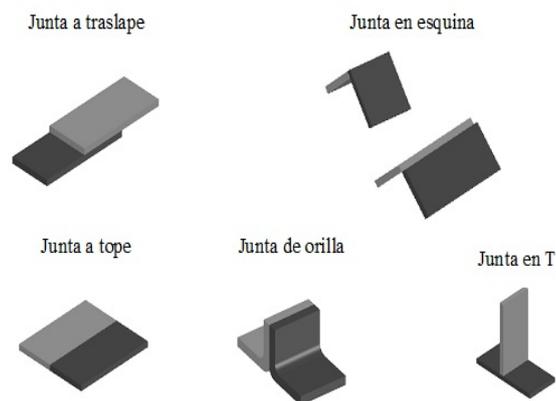


Figura 1.6 – Tipos de juntas de soldadura. **Fuente:** Autor.

- **Junta a traslape:** se forma por dos elementos que van traslapadas una sobre la otra y que puede ser unidas por varios procesos de soldadura.
- **Junta a tope:** este tipo de junta se forma por dos piezas que van de manera longitudinal o transversal, siempre y cuando las superficies de contacto estén comprendidas en los planos de los dos elementos a unir.
- **Junta en esquina:** tal como su nombre lo dice, son elementos que forman una esquina con un ángulo de 90° .
- **Junta de orilla:** este tipo de junta suele ser el resultado de una fusión a través de superficies adyacentes, de tal forma, que la parte soldada está en el interior de los planos superficiales de unión de los dos elementos fijados permanentemente.
- **Junta en T:** junta donde las dos piezas que la constituyen están en forma de T.

1.4.3.5 Biseles y sus configuraciones

Un bisel de soldadura es aquel, que se realiza en el borde o esquina de un material base, con la finalidad de asegurar el proceso de unión. Estos pueden ir configurados dependiendo la aplicación y los espesores del material con el que se está trabajando ver figura 1.7. Donde se realiza un biselado en V, para un estudio de soldadura entre aluminio y acero [10].

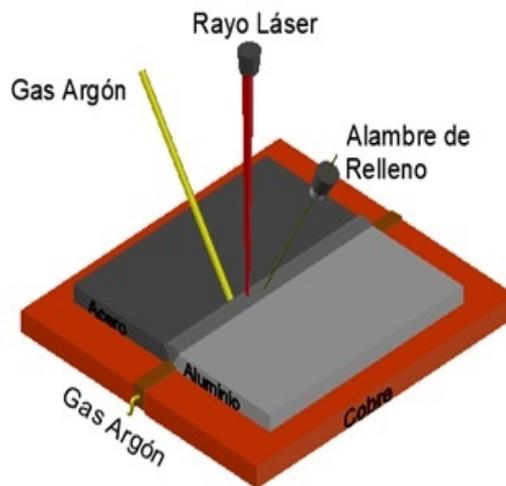


Figura 1.7 – Biselado en V para estudios de unión entre dos materiales. **Fuente:** Autor.

Existen varios tipos de filetes (ver figura 1.8) que son elaborados en un material base según a la necesidad o aplicación, de los cuales se puede destacar los siguiente: Los biseles en forma de J y U, son muy utilizados para espesores grandes, su principal finalidad es la de disminuir el porcentaje de material de aporte, su complejidad de preparación es alta y suele ser muy costosa, la misma que solo puede ir justificada dependiendo de cuanto sea el costo del material de aporte que va durante todo el proceso de soldadura [11]. Además, los criterios más importantes, para la realización de un bisel es el grado de penetración, algo que en los de tipo J son muy bajos, los biseles que presentan un mayor grado de penetración son el V y el U [12].

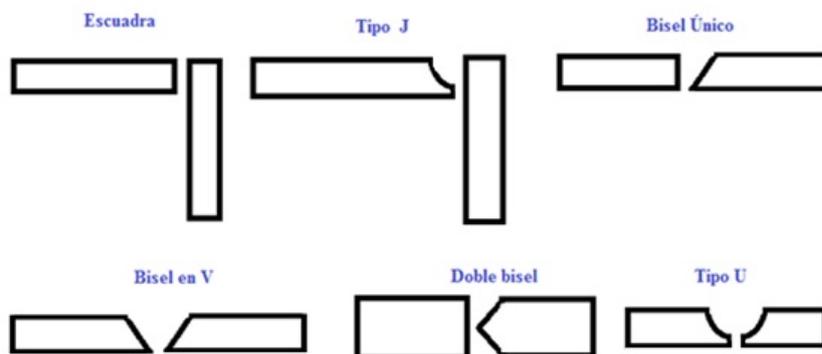


Figura 1.8 – Tipos de biseles. **Fuente:** Autor.

1.4.3.6 Tipos de cordones de soldadura

Los cordones de soldadura, están relacionados con los procesos de unión a los que se someten dos elementos a ser soldados, de los cuales se establece que existen 4 tipos de cordones y son: normal, de tampón, de ranura y de filete. A continuación, se detallan como se forman los cordones anteriormente mencionados:

- **Cordón normal:** se elabora en un solo pase, en donde se aplica material de aporte en los elementos que van a ser unidos, para la realización de este tipo de cordón no se hacen movimientos de penetración, simplemente se realizan con la finalidad de ver las habilidades de un soldador, o para estudios bajos distintos parámetros [11], ver figura 1.9.



Figura 1.9 – Cordón normal. **Fuente:** Autor.

- **Cordón de tampón:** estos tipos de cordones, suelen tener la función de un remache, para su desarrollo generalmente se utiliza un proceso de soldadura denominado por puntos el cual suele fundir los dos materiales, los mismos que quedan unidos sin la necesidad de material de aporte. También, se denomina cordón de tampón a la soldadura en la cual se llena los orificios con material de aporte [13], ver figura 1.10.



Figura 1.10 – Cordón de tampón. **Fuente:** Autor.

- **Cordón de ranura:** dentro de la industria de la construcción son los que más se aplica, ya que este consiste en el relleno de material de aporte sobre un material base que posea alineamiento, presentando varias configuraciones dependiendo la accesibilidad, economía y diseño de las uniones a soldarse [14], ver figura 1.11.

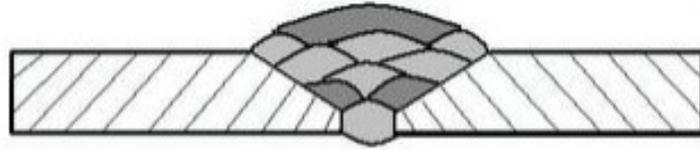


Figura 1.11 – Cordón de ranura. **Fuente:** Autor.

- **Cordón de filete:** la forma de este cordón se puede apreciar en la figura 1.12, son muy parecidos a los de ranura, con la diferencia que generan mayor rigidez entre los elementos que se unen, así como también, la posición de la junta es en forma de T o esquina.



Figura 1.12 – Cordón de filete. **Fuente:** Autor.

1.4.3.7 Procesos de soldadura

Existen muchos métodos y procesos de soldadura que van desde los que utilizan material de aporte y los que no, así como también, aquellos que sirven para materiales metálicos y no metálicos. La gran mayoría necesita de energía calórica con altas temperaturas, muchas de las veces con generación de llama de tal forma que se pueda conseguir la unión de dos elementos [15]. A continuación, se menciona los más utilizados. En la figura 1.13 se muestra una clasificación completa de los procesos de soldadura.

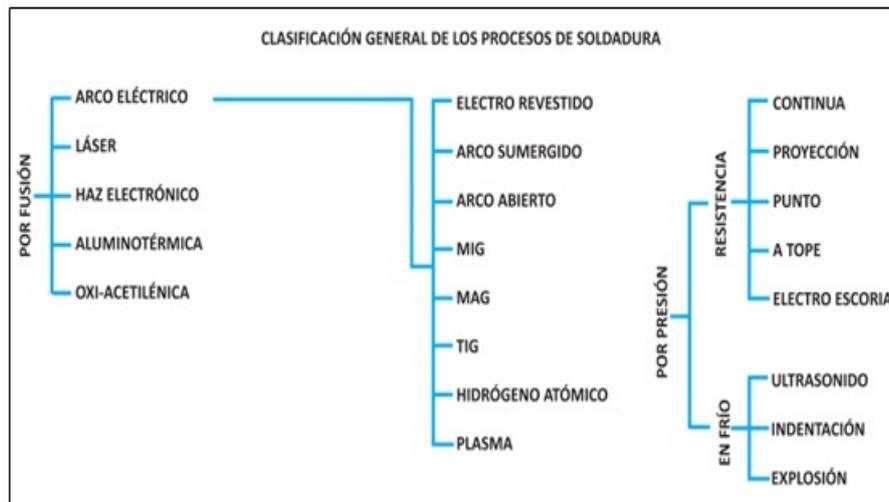


Figura 1.13 – Diagrama de los procesos de soldadura [15].

De los procesos que se mencionan en el diagrama anterior los más utilizados son los de arco eléctrico los cuales se detallan a continuación los más utilizados dentro de las industrias y en los que se genera mayor cantidad de defectos.

- Proceso SAW (Soldeo por arco sumergido):** el proceso SAW, se realiza mediante la fusión de un electrodo, el mismo que puede ser tubular o macizo. Se utiliza una escoria de características físicas, bien sea granular o en polvo, cuya función es de proteger y alimentar el arco de soldadura. En la figura 1.14 se puede ver los elementos que actúan en este proceso de soldadura.

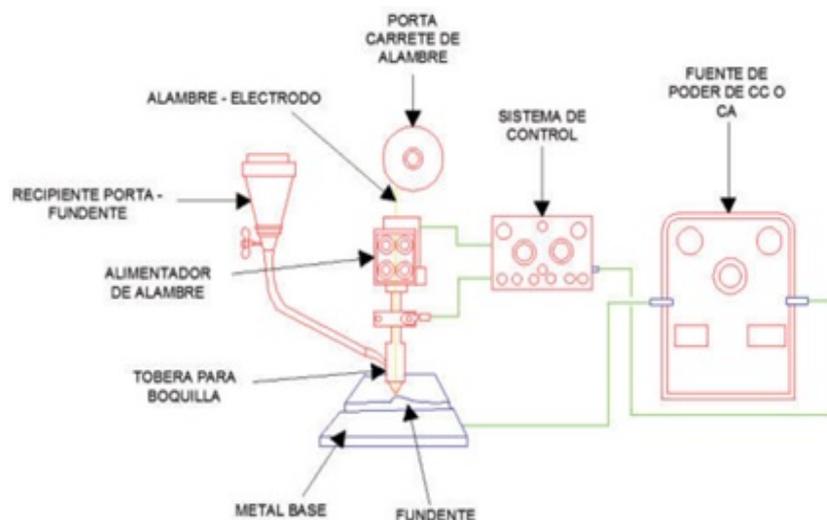


Figura 1.14 – Proceso SAW [3].

- Proceso GMAW (Soldadura eléctrica por arco bajo protección de gas con alimentación continua de electrodo sólido):** al generar un arco eléctrico y fundiendo un rollo de alambre

sobre el material base se denomina proceso GMAW, ver figura 1.15.

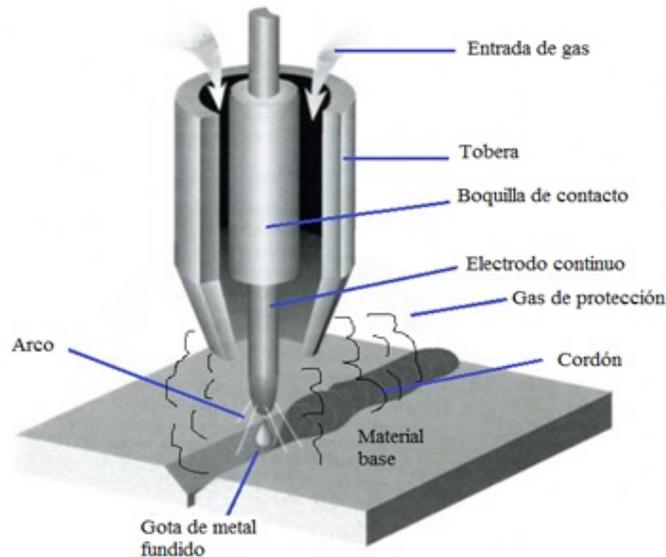


Figura 1.15 – Proceso GMAW. Fuente: Autor.

- **Proceso GTAW (Con electrodo de tungsteno y protección gaseosa):** proceso que se lo conoce también como TIG, el principal componente es el tungsteno, permitiendo unión permanente entre dos materiales sin obtener presión; llegando a una temperatura de fusión mediante el arco voltaico [3], ver figura 1.16.

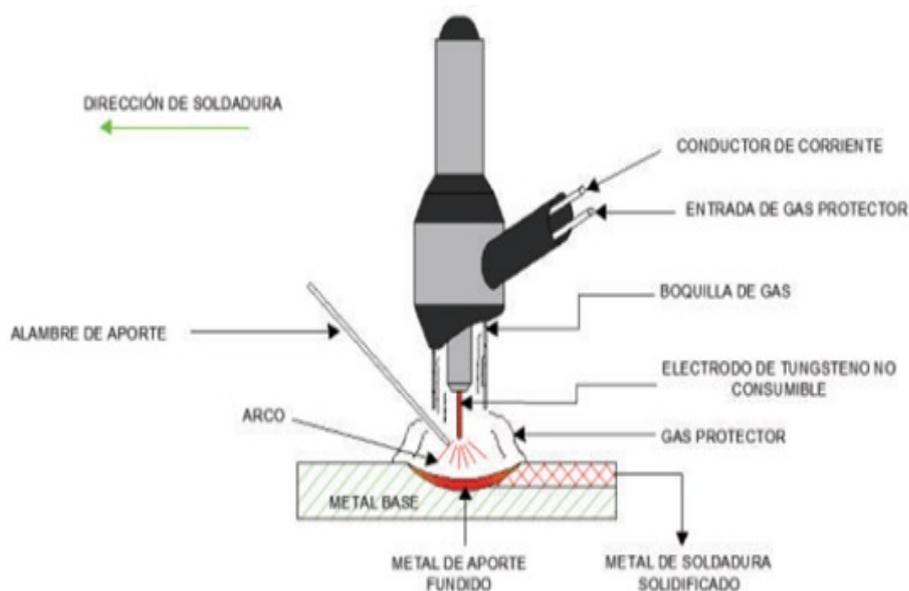


Figura 1.16 – Proceso GTAW [3].

- **Proceso SMAW (Soldadura eléctrica por arco con electrodo revestido):** el proceso SMAW es el más utilizado a nivel mundial, este proceso permite la coalescencia de materiales a través del arco eléctrico que se genera entre un electrodo de metal revestido y la pieza que se va a soldar [3]. En la (figura 1.17a) se tiene los elementos que se tiene cuando se está llevando

a cabo la soldadura y en la (figura 1.17b) están los dispositivos necesarios para ejecutar el proceso SWAW.

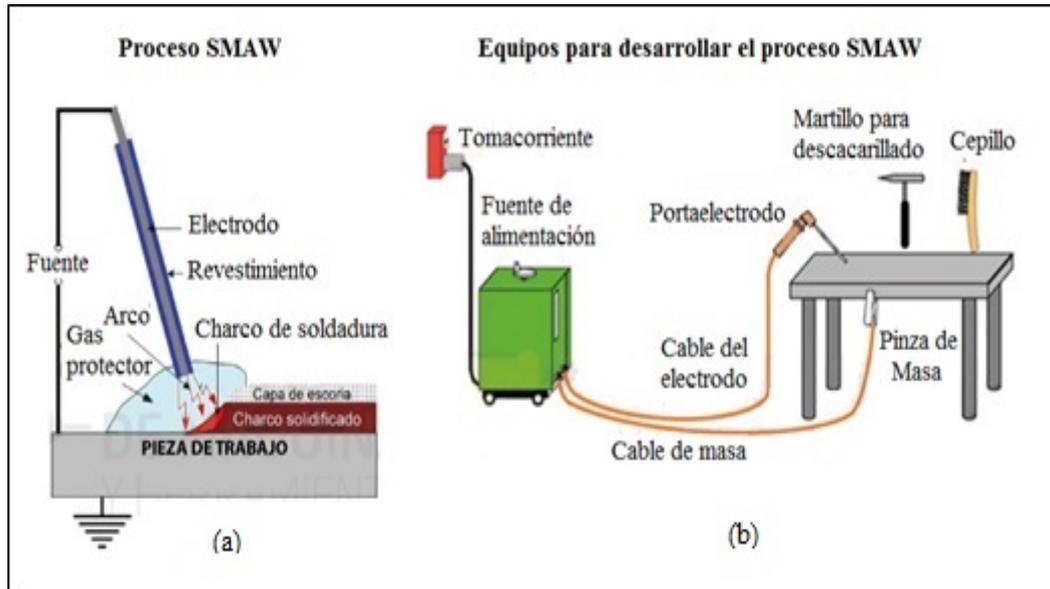


Figura 1.17 – Proceso SMAW. Fuente: Autor.

1.4.3.8 Defectos de soldadura

En los distintos procesos de soldadura se pueden generar una serie de defectos que pueden estar dentro de un rango aceptable o no en la normativa AWS [16], los mismos que pueden ser analizados por inspectores de soldadura como por ejemplo en el análisis de probetas o elementos mecánicos [17]. A continuación, se detallan los defectos de soldadura más comunes:

- **Inclusiones gaseosas:** este tipo de defectos son cavidades que se manifiestan en forma de poros extendidos, los cuales se generan por el encapsulamiento de gases en el cordón de un proceso de soldadura, que al solidificarse las discontinuidades quedan al exterior y son netamente visibles [18], tal como se puede apreciar en las tres fotografías de la figura 1.18.



Figura 1.18 – Inclusiones gaseosas. Fuente: Autor.

- **Fisuras:** son defectos graves que podrían aparecer por efecto de una rotura concreta la cual aparecería durante la soldadura y que podría ser generado por cargas externas como golpes

durante el proceso de solidificación del cordón o también podrían aparecer por un enfriamiento brusco que genera cargas internas sobre el metal caliente en proceso de solidificación [19].

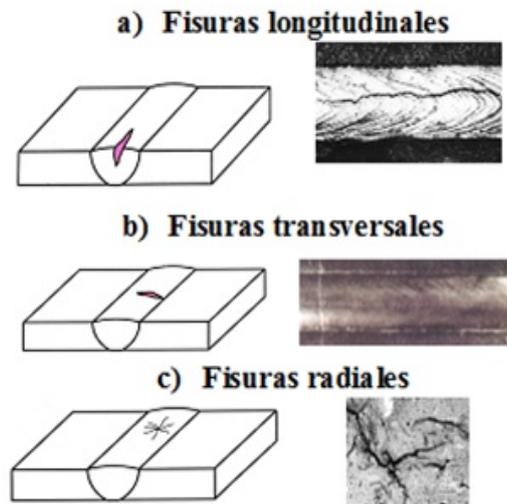


Figura 1.19 – Tipos de fisuras. **Fuente:** Autor.

De la figura 1.19, las fisuras lineales alrededor del cordón de soldadura las cuales son producidas comúnmente por el enfriamiento brusco, es mostrada en (a); en la (b), representa daños transversales en el cordón y se produce por el mismo efecto anterior; mientras que las fisuras radiales en (c), son las que se dan por golpes durante el proceso de solidificación.

- **Falta de fusión y penetración:** la falta de fusión es un defecto que se forma por un mal proceso de soldadura, así como también, por la mala ubicación de parámetros en las máquinas de soldeo, su forma física se presenta cuando no existe una unión adecuada entre el material de aporte y el base. Por otro lado, la falta de penetración se manifiesta por las mismas características de la falta de fusión y se diferencia en su forma física, porque el cordón no cubre por completo la raíz de metal base, en la figura 1.20 se puede observar estos dos tipos de defectos [19].

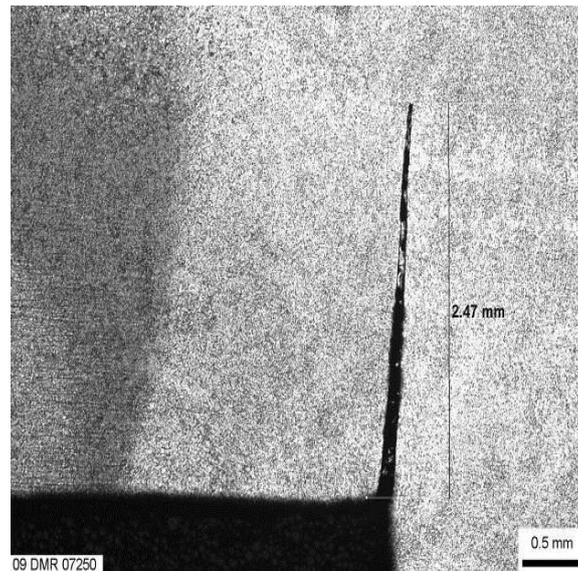


Figura 1.20 – Falta de fusión y penetración [20].

- **Defectos superficiales:** estos defectos son aquellos que se pueden apreciar, tanto en el cordón de soldadura, como en las cercanías del mismo y en la placa base, estos son: picaduras, porosidades externas, salpicaduras, penetración excesiva, sobre monta excesiva, falta de continuidad, rechupes, etc. Las discontinuidades mencionadas anteriormente se producen por diversos factores y afectan a la apariencia física del cordón, muchos de ellos no afectan en lo absoluto a la soldadura, mientras que existen otros que si, como es el caso de los rechupes y poros, que al ser muy profundo y holgado no son aceptados en las normas AWS. En la figura 1.21 se puede ver los distintos defectos, ocasionados por un proceso de soldadura de mala calidad.

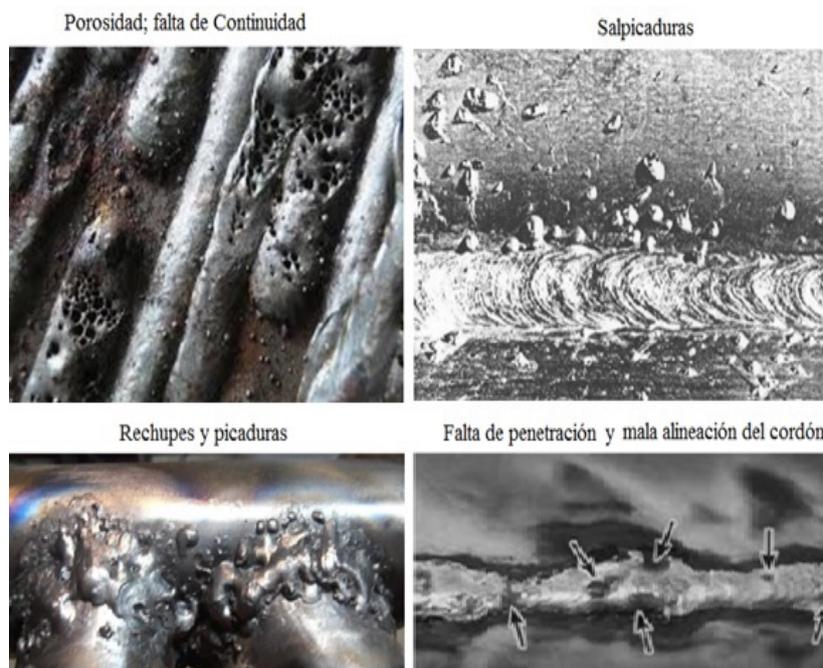


Figura 1.21 – Defectos superficiales externos. **Fuente:** Autor.

- **Incrustaciones de escoria:** están conformadas por material particulado producidos por la escoria que se genera de la soldadura, el cual se queda atrapado entre el material base y el material de aporte, en la figura 1.22 se puede apreciar de forma esquematizada este defecto.

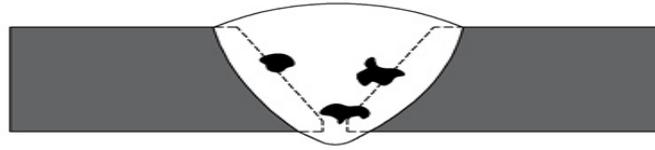


Figura 1.22 – Incrustaciones de escoria. **Fuente:** Autor.

- **Incrustaciones de tungsteno:** partículas sólidas de tungsteno, que se quedan impregnadas en el cordón de soldadura, el mismo que es desarrollado por medio de proceso TIG, en la figura 1.23 se puede apreciar la esquematización.

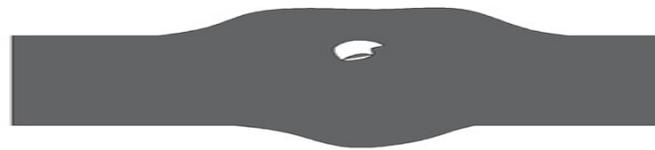


Figura 1.23 – Incrustación de tungsteno. **Fuente:** Autor.

1.4.4 Seguridad radiológica

La Seguridad radiológica está enfocada en proteger al trabajador y al medio ambiente de la emisión de radiaciones o emisión de fuentes radioactivas que puedan afectar la salud y a la contaminación del medio ambiente. Para esto se debe procurar que todas las personas expuestas empleen adecuadamente los equipos y materiales tendiendo a evitar sobreexposiciones o límites de dosis altas, esto se podrá conseguir con una adecuada capacitación y con la debida protección del personal expuesto.

1.4.4.1 Efectos de las radiaciones ionizantes

El reino animal como el vegetal, están expuestos a los diferentes tipos de radiaciones ionizantes, los cuales van desde los rayos cósmicos que provienen del espacio hasta la tierra, así como de los radioisótopos que se encuentra inmersos en el aire, en los distintos alimentos o incluso en el mismo ser humano. Por lo tanto, a los seres vivos les resulta inevitable estar rodeados de los distintos tipos de radiación. Los seres humanos en todas sus actividades perciben cierta cantidad de radiación, dosis que son muy bajas y que muchos de los casos no tienen ningún efecto sobre la salud, por otro lado, si aumenta el nivel de radiación a valores muy altos y tiempos de exposición extremadamente amplios, pueden dañar células de ciertos órganos e incluso causar la muerte de las personas [21], en la siguiente figura 1.24 se puede ver las principales fuentes capaces de emitir radiación y las dosis percibidas por el ser humano de forma anual.

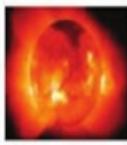
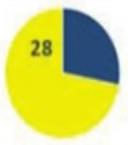
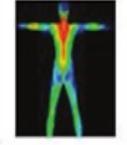
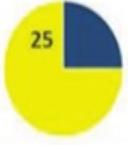
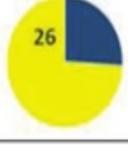
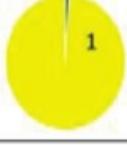
Fuentes Naturales		Dosis anual (mrem/año)	Fuentes hechas por el hombre		Dosis anual (mrem/año)
	Rayos cósmicos (radiación del sol y del espacio exterior)			Médico (diagnóstico por rayos x)	
	Materiales de construcción			Bombas atómicas	
	El cuerpo humano			Producción de energía nuclear	
	La tierra			Productos, televisores a color	

Figura 1.24 – Fuentes de radiación que percibe el ser humano [21].

1.4.4.2 Clasificación de los efectos biológicos

Tal como se mencionó anteriormente, las radiaciones ionizantes afectan al ser humano y pueden ocasionar daños en el mismo, los efectos biológicos se clasifican de la siguiente forma:

- **Determinísticos o No estocásticos:** este tipo de efectos producen la muerte celular, por lo que son clínicamente atribuibles en el individuo expuesto y la gravedad del efecto depende del umbral. Por ejemplo: daños en la piel, infertilidad, opacidades en el cristalino, etc.
- **Estocásticos:** este tipo de efectos son probabilísticos y las anomalías pueden ser bastante tardías, por lo que son epidemiológicamente atribuibles en poblaciones extensas. Por ejemplo: efectos genéticos, cáncer, etc.

1.4.4.3 Tipos de exposición

Las distintas formas de exposición pueden clasificarse de acuerdo al contacto que exista entre el ser humano y la fuente de radiación, de las cuales se tiene las irradiaciones externas y contaminación radioactiva.

- **Irradiación externa:** tal como se puede ver en la figura 1.25, la contaminación en el ser humano por este tipo de radiación es de forma externa, ya que no se tiene ningún contacto directo, un ejemplo muy claro son los cuartos de estudio cercanos a los laboratorios de radiografía en las universidades.



Figura 1.25 – Irradiación externa [21].

- **Contaminación radioactiva:** este tipo de contaminación se tiene cuando la persona o ser vivo ha entrado en contacto con la fuente de radiación o incluso cuando los efectos radiográficos han penetrado por completo el cuerpo por diversas vías como: digestiva, térmica, etc., en la figura 1.26 se puede observar un esquema de afectación directa de la radiación sobre un ser humano.



Figura 1.26 – Contaminación radioactiva [21].

1.4.4.4 Protección radiológica

Anteriormente se había mencionado algunos efectos que produce la radiación, así como también los que pueden ser severos o no, razón por lo cual existen normativas para poder protegerse de los tipos de radiación, sobretodo de las que podrían ocasionar efectos dañinos en la salud de un individuo que trabaje con la interacción directa e indirecta. Entonces la protección radiológica está definida como una disciplina donde hay parámetros establecidos, recomendaciones y requisitos para que un operario o persona natural las tenga en cuenta y las acate de forma obligatoria con el objetivo de evitar contaminarse y por ende resguarde su vida [22]. Existen muchas organizaciones a nivel mundial que regulan y crean normativas para evitar la contaminación tal es el caso del Comité Científico de las Naciones Unidas Dedicadas a la Radiación Atómica, (UNSCEAR) por sus siglas en inglés, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, que estudia los efectos que provocan las distintas formas de emisión radiográfica ionizante. En el Ecuador el ente encargado es la (SCAN) Subsecretaría de Control y Aplicaciones Nucleares, y que a través del (MEER) Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, que controlan y regularizan la utilización de radiaciones ionizantes.

- **Magnitudes dosimétricas:** son magnitudes que permiten establecer los efectos que han causado la radiación absorbida en el cuerpo de un ser humano y son las siguientes:
 - Expresado en rad o ergs, donde se tiene lo siguiente, 1 rad es equivalente a 100 ergs, además otra unidad de medida es el gray ($1\text{Gy} = 100\text{rad}$), entonces la magnitud que se presenta de dosimetría en un ser humano representa a la radiación que el cuerpo haya absorbido [5].
 - Existe un valor que se le denomina dosis equivalente de radiación, el cual representa una cantidad absorbida de radiación y que representa la probabilidad que un ser humano tenga efectos nocivos sobre sí. Este es el Sievert que es representado por la siguiente equivalencia 1 Sv es igual a 100 Rem [5].
 - Dosis de radiación efectiva, magnitud que expresa los efectos biológicos con respecto a tipo de tejido y que son afectados por la radiación, está definido por una sumatoria de las distintas dosis de un tejido que ha sido irradiado, el cual debe ser multiplicado con un factor de ponderación, que se lo conoce como riesgos del tejido.

1.4.4.5 Control de exposición a la radiación

Para poder trabajar con radiaciones, es necesario establecer límites de dosis permisibles para el Personal Ocupacionalmente Expuesto (POE) y público en general. Por ello se hace un control de exposición de las radiaciones que está absorbiendo el operador, como también delimitar el área de trabajo, el tiempo de permanencia, distancia y blindaje.

- **Tiempo:** Por medio de una ecuación general se la puede determinar de la siguiente forma:

$$\text{Tiempo de permanencia} = \frac{\text{Límite de exposición}}{\text{Tasa de dosis}}$$

Como se puede apreciar en la fórmula anterior tanto el tiempo de permanencia o exposición y su límite tiene una relación directamente proporcional. Entonces, se diría que la expresión mencionada ayuda a encontrar el límite de exposición de un ser humano bajo las radiaciones ionizantes.

- **Distancia:** la fórmula que se presenta a continuación ayuda a determinar, la magnitud de separación que debe tener un individuo hacia una fuente de emisión radiográfica [5].

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{D_2^2}{D_1^2}$$

Donde:

I_1, I_2 : Intensidad en los puntos uno y dos.

D_1, D_2 : Distancia en los puntos uno y dos.

- **Blindaje:** Constituye los elementos y materiales con capacidad para absorber gran cantidad de radiación, es decir mientras mayor sea la cantidad de blindaje mejor va a ser la protección. Los espesores y los tipos de materiales de protección van de acuerdo a la cantidad de energía que emiten dichas radiaciones. En la figura 1.27, se puede ver los parámetros mencionados en el control de protección radiográfica.

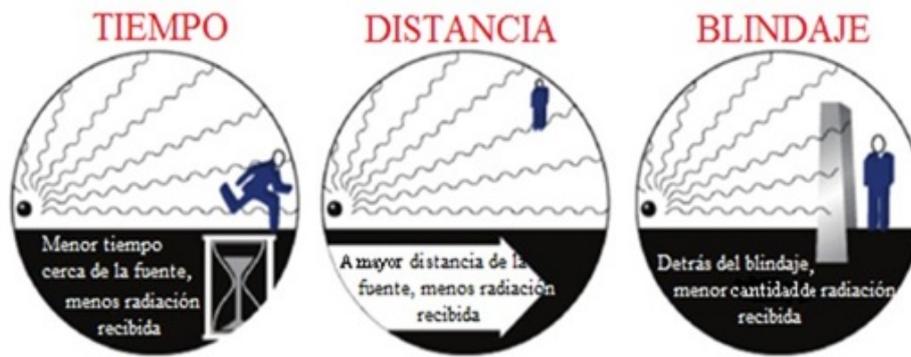


Figura 1.27 – Control de protección radiográfica. Fuente: Autor.

1.5 Marco Metodológico

1.5.1 Tipo de investigación

Para el desarrollo de la presente investigación se ha utilizado el método experimental que consistió en el análisis de juntas soldadas aplicando la técnica de radiografía industrial con rayos X, con la finalidad de encontrar fallos en el proceso de soldadura.

1.5.2 Diseño de la investigación

1.5.2.1 Norma AWS D1.1

En la presente investigación, se escogió la normativa AWS D1.1, que contiene los requerimientos para la fabricación y el montaje de las estructuras metálicas, por lo que se emplea en aceros estructurales mayores a 1/8in, es decir mayor a 3mm de espesor [1].

1.5.2.2 Equipos, instrumentos y materiales

Se utilizaron los siguientes equipos, instrumentos y materiales para la toma de muestras al desarrollo de este trabajo investigativo:

- Tubo generador de rayos X.
- Unidad de control o consola de mando.
- Equipo revelador e insumos.
- Probetas normalizadas.
- Películas radiográficas industriales.
- Medidor de radioactividad Geiger Müller.
- Dosímetro personal.

- Negatoscopio.

- **Tubo generador de rayos X:** el tubo generador de rayos X de la serie AXFQ son ideales para ensayos no destructivos (END), como por ejemplo en placas de hierro fino, en aluminio y aleaciones de algunos metales, nos permite obtener imágenes de excelente calidad y claridad [23]. El equipo generador de rayos X con el que se cuenta en el laboratorio de Ensayos No Destructivos de la carrera de Ingeniería Mecánica es de marca Angstrom con la serie AXFQ-2005, ver figura 1.28.



Figura 1.28 – Tubo generador de rayos X. **Fuente:** Autor.

A continuación ver tabla 1.2 de las especificaciones técnicas del tubo generador de rayos X :

Tabla 1.2 – Especificaciones técnicas del tubo generador de rayos X AXFQ-2005 [23].

Voltaje de salida (kV)	100 a 200
Potencia de entrada (kW)	2
Tamaño de punto focal (mm²)	1.5 × 1.5
Ángulo divergente	40 ± 5°
Máxima penetración en la profundidad de acero (mm)	30
Peso del tubo generador (kg)	23
Tamaño del tubo generador (mm³)	285 × 285 × 665

- **Unidad de control o consola de mando:** la unidad de control que se muestra en la figura

1.29, es de la marca Angstrom AXFQ-2005. Este equipo nos determina el tiempo de aplicación de la irradiación (entre 6 seg a 5 min), así como el kilovoltaje aplicado (entre 100 kV a 200 kV); cabe mencionar que la consola de mando nos proporciona el tiempo de preparación para el disparo que es de 1 min aproximadamente, lo cual es importante para el tema de seguridad de los operadores.



Figura 1.29 – Unidad de control. **Fuente:** Autor.

- **Equipo revelador e insumos:** el equipo revelador de la figura 1.30 con la marca JPI Automatic X-Ray Filmprocessor Model JP-33 cumple la función del revelado de la película obtenida del disparo realizado del tubo generador de rayos X. Para que funcione la impresora se requiere tener instalado los siguientes insumos: Líquido Fijador (A+B) y Líquido Revelador (A+B+C); ver figura 1.31. Estos líquidos se deben mezclar con agua, hasta obtener un preparado de 19 litros o 5 galones; ver las tablas 1.3 y 1.4.

Tabla 1.3 – Componentes químicos del Líquido Fijador (A+B). **Fuente:** Autor.

Líquido Fijador	Componentes Químicos
A	Ácido acético
B	Sulfato de aluminio - Ácido sulfúrico

Tabla 1.4 – Componentes químicos del Líquido Revelador (A+B+C). **Fuente:** Autor.

Líquido Revelador	Componentes Químicos
A	Hidroquinona - Hidróxido de potasio
B	1-Fenil-3-Pirazolidona - Ácido acético
C	Glutaraldehido



Figura 1.30 – Equipo revelador. **Fuente:** Autor.



Figura 1.31 – Líquido Fijador (A+B) y Líquido Revelador (A+B+C). **Fuente:** Autor.

- **Probetas normalizadas:** las probetas utilizadas en este trabajo están fabricadas de acuerdo a la norma AWS D1.1, para materiales metálicos como en el caso del acero ASTM A36. Los aspectos más relevantes para la elaboración de las probetas fueron los siguientes:

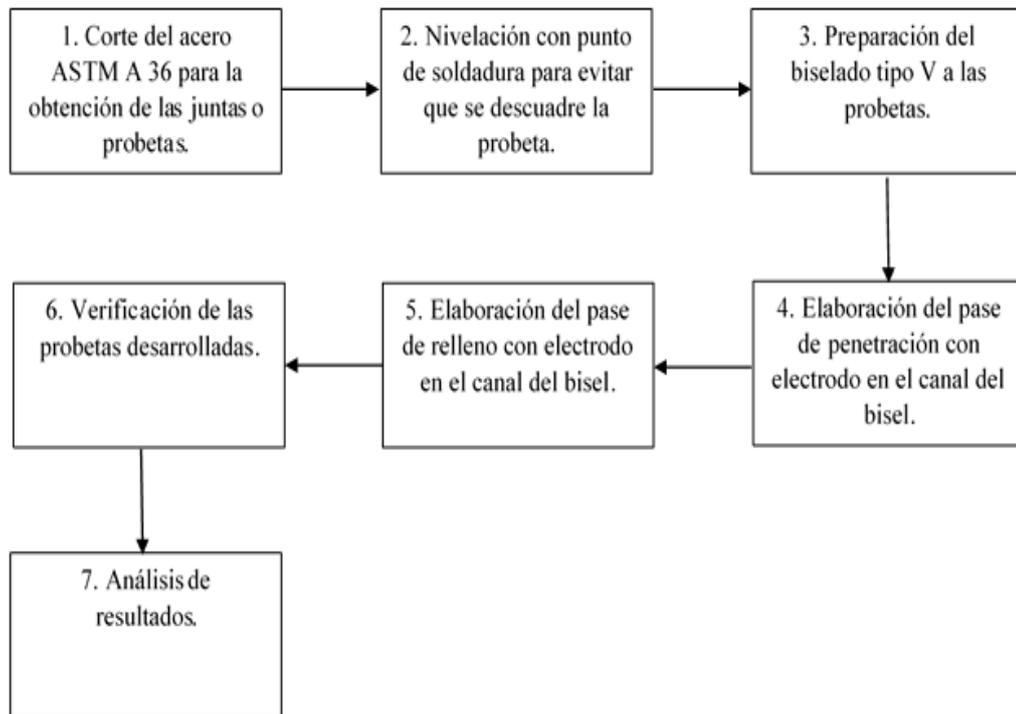


Figura 1.32 – Diseño del proceso para elaboración de las probetas. **Fuente:** Autor.

- **Películas radiográficas industriales:** esta película de alta velocidad, grano fino y alto contraste es adecuada para una amplia variedad de aplicaciones industriales; es la película D7 INDUSTREX (Carestream) AA400 con pantalla de plomo, tiene una emulsión T-GRAIN patentada de Carestream para conseguir una mayor sensibilidad, ofreciendo las características de manipulación como la resistencia a la humedad y a las altas temperaturas, ver figura 1.33.

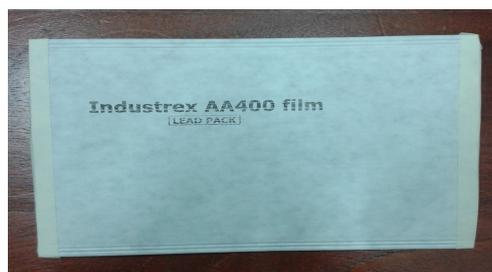


Figura 1.33 – Película radiográfica D7 INDUSTREX (Carestream) AA400 con pantalla de plomo. **Fuente:** Autor.

- **Medidor de radioactividad:** existe en el mercado varios instrumentos destinados a medir la radioactividad emitida por rayos X. Dentro del laboratorio de END, se dispone del instrumento GAMMA-SCOUT® (medidor de radioactividad Geiger-Müller); las principales características se las detallará en la tabla 1.5:

Tabla 1.5 – Datos técnicos del medidor de radioactividad digital Geiger-Müller de marca GAMMA-SCOUT® [24].

Pantalla Cristal líquido
Rango de medición ($\mu\text{Sv/h}$) 0.01 a 5000
Temperatura de operación ($^{\circ}\text{C}$) -20 a +60
Tipos de radiación α a partir de 4 MeV β a partir de 0.2 MeV γ a partir de 30 keV
Duración de la batería Aproximadamente 10 años
Memoria (kbyte) 64
Dimensiones (mm^3) $163 \times 72 \times 30$
Fecha de calibración 15/07/2016

El medidor de radioactividad dispone de un sistema alerta (w/ALERT), el mismo que emite un sonido en el instante que la radiación supera el límite de dosis permitido, pudiendo calibrarse hasta un límite permisible, ver figura 1.34.

**Figura 1.34** – Medidor de radioactividad digital Geiger-Müller de marca GAMMA-SCOUT®. **Fuente:** Autor.

- **Dosímetro personal:** otro de los instrumentos primordiales que debe llevar una persona que se encuentra expuesta a la radiación, es el dosímetro (DOSISRAD), el cual recepta las emisiones de radiación en un chip que se encuentra dentro del instrumento y es analizado cada 2 meses en el

laboratorio de dosimetría DOSISRAD Ecuador (Servicio Especializado en Seguridad Radiológica), ubicado en la ciudad de Quito. Cabe recalcar que este laboratorio emite un código para cada empresa, para el caso de la UPS Cuenca el código es 01U002-01-B, igualmente cada persona expuesta llevará su dosímetro con su respectivo número de serie, ver figura 1.35.



Figura 1.35 – Dosímetro personal. **Fuente:** Autor.

- **Negatoscopio:** el negatoscopio de la figura 1.36 marca Intertek nos ayuda a visualizar la película una vez realizado el proceso de revelado y verificar las fallas presentes que fue sometida la probeta.



Figura 1.36 – Negatoscopio. **Fuente:** Autor.

1.5.2.3 Diseño estadístico

En base a la referencia de la unidad de control o consola de mando disponible en el laboratorio de ensayos no destructivos de la Universidad Politécnica Salesiana, se pudo determinar los diferentes tipos de kilovoltajes y tiempos de exposición de acuerdo al espesor de la probeta, que nos detalla la curva de calibración que se encuentra en la consola de mando; tal como se puede apreciar en la figura 1.37.

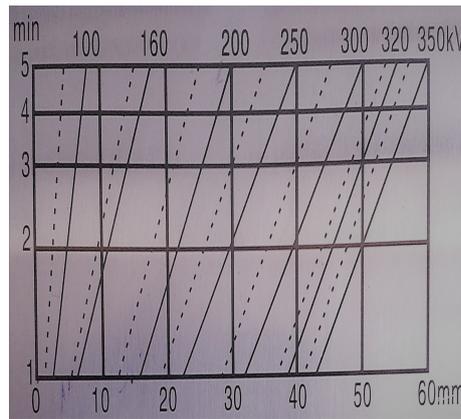


Figura 1.37 – Curva de calibración para el equipo generador de rayos X. **Fuente:** Autor.

Por ejemplo para el caso experimental, se utilizó una junta soldada a tope de canal simple con bisel tipo V de 10mm de espesor. Al analizar el diagrama de la curva de calibración, se tomó el debido kilovoltaje y el tiempo de exposición para la prueba radiográfica. De acuerdo al espesor de la probeta se fijó el kilovoltaje de 150kV y el tiempo de 1 min; el tipo de material de la junta soldada es un acero estructural ASTM A36.

1.5.2.4 Técnica de radiografía industrial

La técnica utilizada en este análisis fue el método de radiografía industrial mediante un tubo generador de rayos X, enfocada a captar las imágenes de probetas metálicas y el proceso de revelado mediante la impresora de revelado de la marca JPI Automatic X-Ray Filmprocessor Model JP-33. Con respecto a la técnica para la obtención de la distancia focal se determinó 600mm obtenida en el diagrama de la curva de calibración. Esta distancia es primordial por cuanto se puede visualizar en forma apreciable las imágenes y no existe ningún tipo de distorsión o penumbra geométrica.

1.6 Resultados

1.6.1 Selección del material para el análisis mediante la técnica de radiografía industrial

De acuerdo a la norma AWS D1.1 se hizo la selección del tipo de acero ASTM A36 para espesores mayores a 3mm y menores a 20mm, por ello se presenta la siguiente figura 1.38 que hace referencia a la tabla 3.1 de la norma AWS D1.1, donde se especifica el tipo de material y el proceso de soldadura utilizado.

Tabla 3.1
Metal de Base Precalificado—Combinaciones de Metales de Aporte (ver 3.3)

G r u p o	Requerimientos de la Especificación de Acero				Requerimientos de Metal de Aporte		
	Especificación de Acero	Mínima Resistencia a La Fluencia		Rango de Tracción		Especificación de Electrodo	
		ksi	MPa	ksi	MPa	Proceso	Clasificación de Electrodo
	ASTM A 36 (≤3/4 pulg. [20 mm])	36	250	58-80	400-550		
	ASTM A 53 Grado B	35	240	60 min.	415 min.	SMAW	A5.1 E60XX, E70XX
	ASTM A 106 Grado B	35	240	60 min.	415 min.		A5.5 ^e E70XX-X
	ASTM A 131 Grados A, B, CS, D, DS, E	34	235	58-75	400-520		
	ASTM A 139 Grado B	35	240	60 min.	414 min.		
	ASTM A 381 Grado Y35	35	240	60 min.	415 min.		
	ASTM A 500 Grado A	33	230	45 min.	310 min.	SAW	A5.17 P6XX-EXXX, P6XX-ECXXX, F7XX-EXXX, F7XX-ECXXX
	Grado B	42	290	58 min.	400 min.		
	Grado C	46	315	62 min.	425 min.		
	ASTM A 501	36	250	58 min.	400 min.		A5.23 ^f F7XX-EXXX-XX, F7XX-ECXXX-XX
	ASTM A 516 Grado 55	30	205	55-75	380-515		
	Grado 60	32	220	60-80	415-550		
	ASTM A 524 Grado I	35	240	60-85	415-586	GMAW	A5.18 ER70S-X, E70C-XC, E70C-XM (Los electrodos con sufijo -GS deben ser excluidos)
	Grado II	30	205	55-80	380-550		
I	ASTM A 573 Grado 65	35	240	65-77	450-530		
	Grado 58	32	220	58-71	400-490		A5.28 ^g ER70S-XXX, E70C-XXX
	ASTM A 709 Grado 36 (≤3/4 pulg. [20 mm])	36	250	58-80	400-550		
	ASTM A 1008 SS Grado 30	30	205	45 min.	310 min.		
	Grado 33 Tipo 1	33	230	48 min.	330 min.	FCAW	A5.20 E7XT-X, E7XT-XC, E7XT-XM (Los electrodos con el sufijo -2C, -2M, -3, -10, -13, -14, y -GS debe ser excluidos y los electrodos con el sufijo -11 debe ser excluidos para espesores mayores a 1/2 pulg. [12 mm])
	Grado 40 Tipo 1	40	275	52 min.	360 min.		
	Grado 30	30	205	49 min.	340 min.		
	ASTM A 1011 SS Grado 33	33	230	52 min.	360 min.		
	Grado 36 Tipo 1	36	250	53 min.	365 min.		
	Grado 40	40	275	55 min.	380 min.		
	Grado 45	45	310	60 min.	410 min.		
	API 5L Grado B	35	241	60	414		A5.29 ^h E60TX-X, E60TX-XC, E60TX-XM, E70TX-X, E70TX-XC, E70TX-XM
	Grado X42	42	290	60	414		
	ABS Grados A, B, D, CS, DS	34	235	58-75	400-520		
	Grado E ⁱ	34	235	58-75	400-520		

Figura 1.38 – Selección del metal base y metal de aportación [1].

La figura 1.39 hace referencia a la figura 3.4 de la norma AWS D1.1, donde especifica la geometría y las variantes que puede tener la junta de soldadura a tope de canal simple con bisel tipo V.

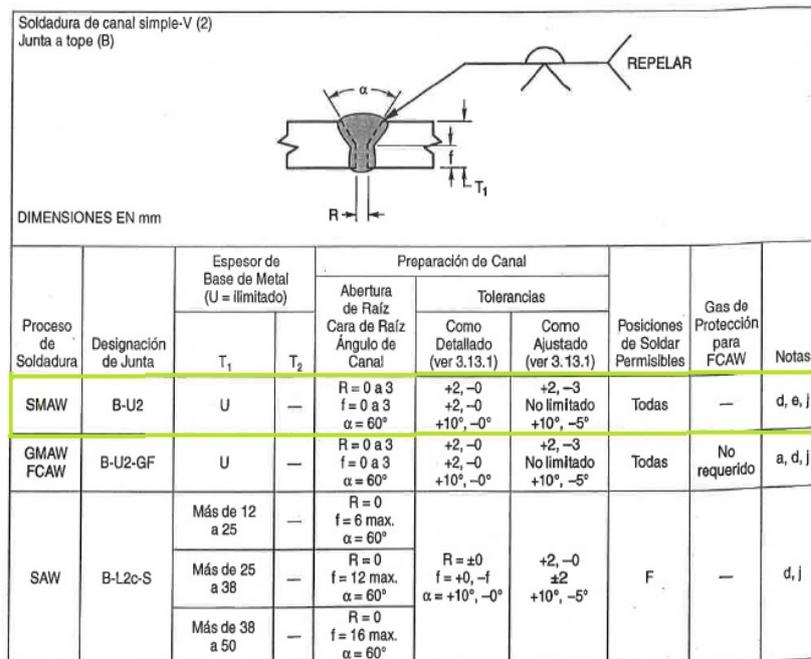
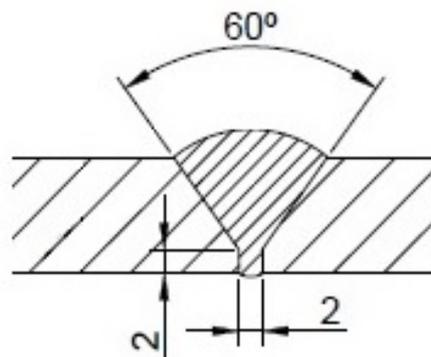


Figura 1.39 – Detalles para juntas soldadas a tope de canal simple con bisel tipo V [1].

Se presenta la tabla 1.6, detallada para la selección de la geometría de la junta de soldadura, respaldada por la figura 1.39.

Tabla 1.6 – Características del diseño de la junta de soldadura. **Fuente:** Autor.

Material base ASTM A36
Proceso SMAW
Tipo de junta A tope en V
Espesor (mm) 10
Separación de la raiz (mm) 2
Cara de la raiz (mm) 2
Ángulo del bisel 60°

**Figura 1.40** – Detalle del diseño de la junta de soldadura. **Fuente:** Autor.

1.6.2 Elaboración del procedimiento de práctica en inspección por radiografía industrial en juntas soldadas

1.6.2.1 Objetivos

- Realizar la inspección utilizando el método de radiografía industrial en juntas soldadas.
- Determinar los fallos en juntas soldadas aplicando la norma AWS D1.1.

1.6.2.2 Alcance

- Este procedimiento describe los métodos y técnicas de calibración del equipo para la inspección radiográfica empleado fuentes de radiación ionizante (rayos X).

- Es aplicable solo para detección de discontinuidades en el interior de las piezas o juntas soldadas, como: grietas, fisuras, incrustaciones, porosidades, etc.
- Esta aplicación es solo general y con fines de manejo del equipo generador de rayos X, para poder detectar discontinuidades internas en piezas o juntas soldadas.

1.6.2.3 Método

- Determinación de los fallos en juntas soldadas utilizando los rayos X.
- Visualización de imágenes mediante el procesamiento de revelado automático.

1.6.2.4 Responsabilidades

- Es responsabilidad del personal que ejecuta el equipo generador de rayos X de cumplir con lo estipulado dentro de este procedimiento.
- Es responsabilidad del instructor revisar al personal que está utilizando el equipo generador de rayos X.

1.6.2.5 Norma de referencia

- AWS D1.1 2010.

1.6.2.6 Equipo y materiales

- **Equipo de rayos X**
 - Anotar la marca, el modelo, el miliamperaje (en este caso el equipo cuenta con 5 mA), el kilovoltaje y el tiempo es de acuerdo al espesor de la probeta para luego identificar en la curva de calibración del equipo.
- **Equipo revelador e insumos**
 - La impresora reveladora es automática y los insumos son los líquidos: fijador (A+B) y revelador (A+B+C) de la marca Carestream.
- **Película radiográfica**
 - Película D7 Industrex AA400 (Carestream), ancho de 100mm, longitud de acuerdo a la probeta a analizar, bolsa con pantallas de plomo de 0.030mm de espesor.
- **Negatoscopio**
 - Para poder interpretar y evaluar las discontinuidades en la probeta.

- **Medidor de radioactividad**

- Medidor Geiger Müller de marca GAMMA-SCOUT con sistema de alerta (w/ALERT).

1.6.2.7 Desarrollo

- **Preparación del material**

- Selección del material.
- Medir el espesor de la probeta que se empleará en la práctica.
- Colocar debidamente la probeta en la mesa de soporte a una altura de 600mm con respecto al foco (punto focal).
- Disposición de las películas radiográficas para la práctica.
- Determinar correctamente la posición del objeto a estudiar respecto al haz de los fotones.

- **Ajuste del equipo**

- Asegúrese de que haya una buena conexión entre el cable y el enchufe del cable, el zócalo del cable debe estar limpio.
- Compruebe la presión del gas SF₆ (Hexafluoruro de Azufre), del tubo generador de rayos X a través del verificador de presión ubicado al costado derecho. El sistema no debe utilizarse si la presión es inferior a 0.25 MPa.
- No apague la consola de mando cuando el tubo generador de rayos X, esté funcionando, en tal caso por emergencia presione el botón verde (OFF).
- Observar la curva de calibración en la consola de mando para realizar el ajuste en el equipo.

- **Preparación para la práctica**

- Para comenzar el desarrollo de la práctica se deberá tener en cuenta que el búnker se encuentra a oscuras (se puede utilizar luz guía de color rojo).
- Se coloca en la mesa de soporte la película radiográfica y encima la probeta a ensayar.
- Se conecta el cable del zócalo del tubo generador de rayos X a la consola de mando.
- Conectar el cable de la consola de mando hacia la fuente de alimentación (220 V).
- Para ajustar el disparo se mide el espesor de la probeta y con la curva de calibración establecemos el kilovoltaje y el tiempo requerido.
- Verificar antes del disparo la condición de seguridad y personal autorizado.
- Procedemos a pulsar el botón rojo (ON) para iniciar el disparo, verificamos que la luz verde de preparación (PREPARE) se encienda. Esta luz permanecerá encendida durante 1 min.

- Después de haberse completado 1 min, se enciende la luz roja (HV), el cual nos indica que está a punto de hacerse el disparo. Inmediatamente se enciende la luz amarilla (mA) que nos indica que el proceso de irradiación ha comenzado; esta luz permanecerá encendida durante todo el tiempo que se programó el disparo.
- Una vez finalizado el tiempo de disparo se escucha un sonido, indicando que el proceso culminó. Para realizar un nuevo disparo se tiene que esperar un tiempo establecido de enfriamiento del equipo, este tiempo es igual al tiempo programado en el inicio de la prueba.
- Ingresamos al búnker y procedemos a retirar la película radiográfica para pasar al proceso de revelado automático.
- El proceso de revelado automático dura aproximadamente 2 min.
- Una vez que haya finalizado el tiempo de revelado automático se toma de un extremo de la película radiográfica posicionándola verticalmente y se la deja secar por 5 min, con la finalidad de no alterar la imagen de la película radiográfica.
- Finalmente se hace la interpretación y evaluación de las discontinuidades que presente la imagen de la película radiográfica en el negatoscopio.

1.6.2.8 Informes de los resultados en inspección por radiografía industrial en juntas soldadas (Probeta 1 y Probeta2)

Probeta 1

- **Información general**

- **Lugar:** Universidad Politécnica Salesiana - Sede Cuenca
- **Laboratorio:** Ensayos No Destructivos
- **Operador:** Laboratorista capacitado
- **Responsable:** Docente capacitado

- **Identificación de la pieza**

- **Descripción:** Soldadura de canal simple de una junta a tope con bisel tipo V de proceso SMAW para 10mm de espesor
- **Identificación:** P1 (Probeta 1)
- **Tipo de material:** Acero ASTM A36
- **Tipo de probeta:** Junta

- **Equipo**

- **Fuente:** Rayos X

- **Marca:** Angstrom
- **Modelo:** AXFQ-2005
- **N° de serie:** 150583ASFJ1215
- **mA:** 5
- **kV:** 150
- **Tiempo de exposición:** 1 min
- **Distancia focal a la pieza:** 600mm
- **Distancia focal a la película:** 610mm

- **Película**

- **Marca:** Industrex AA400 (Carestream) con pantallas de plomo
- **Tipo:** 2
- **Espesor:** 0.030mm
- **Dimensiones:** 220mm x 100mm

- **Esquema de la pieza**

- **Imagen fotográfica:**

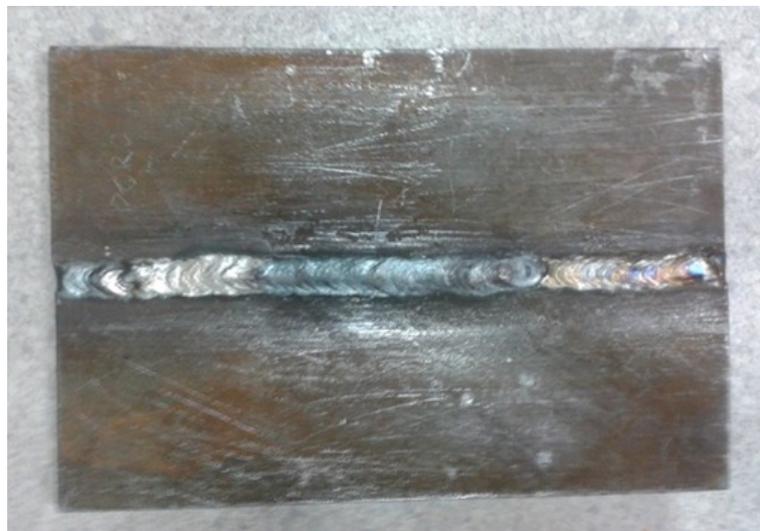


Figura 1.41 – Imagen fotográfica de la probeta 1 . **Fuente:** Autor.

- **Plano:** Escala 1:1

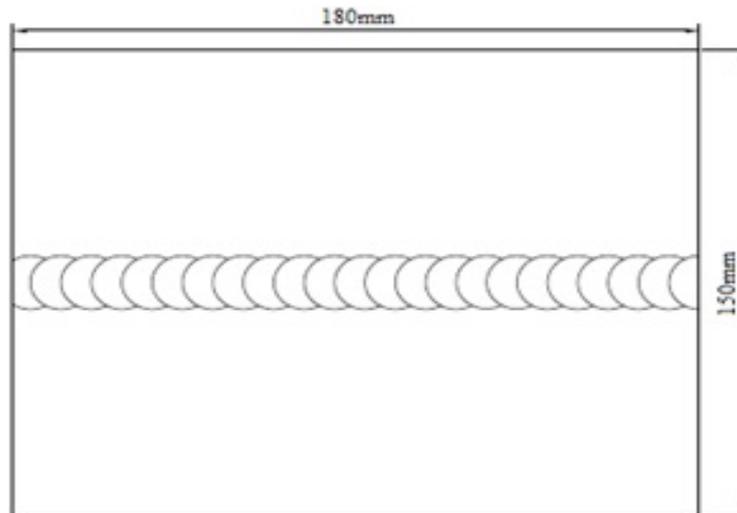


Figura 1.42 – Plano de la probeta 1. **Fuente:** Autor.

- **Proceso de revelado**

- **Tiempo de preparación de la impresora de revelado:** 10 min
- **Tiempo de preparación de la impresora de revelado:** 2 min aproximadamente

- **Imagen radiográfica**

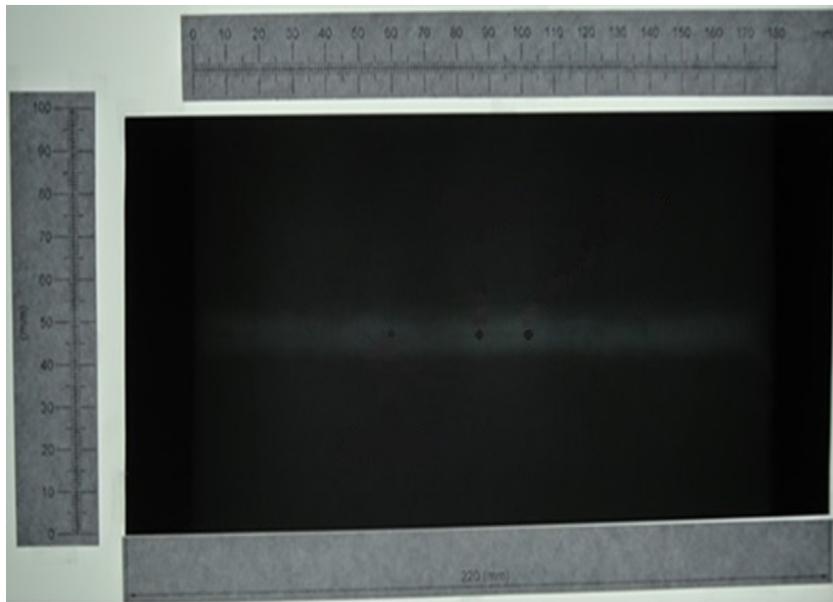


Figura 1.43 – Imagen radiográfica de la probeta 1. **Fuente:** Autor.

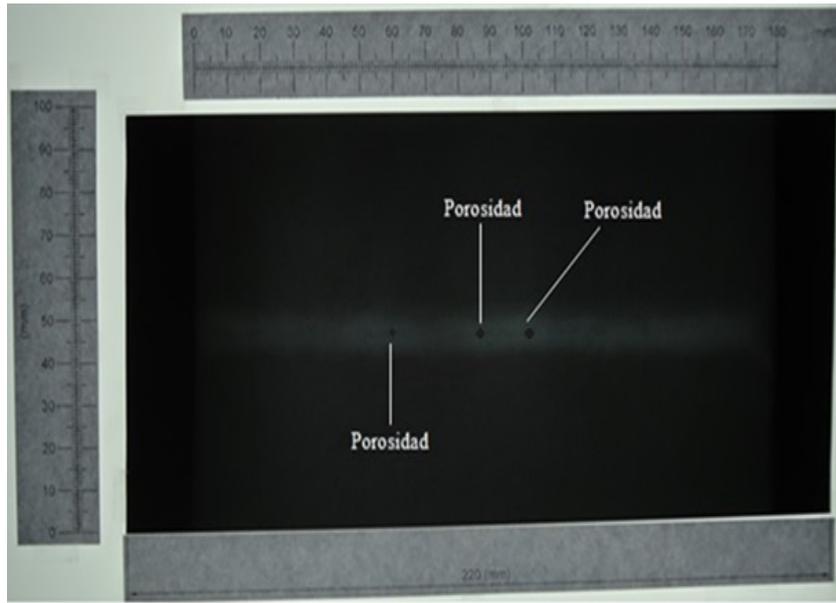


Figura 1.44 – Imagen radiográfica detallada de la probeta 1. **Fuente:** Autor.

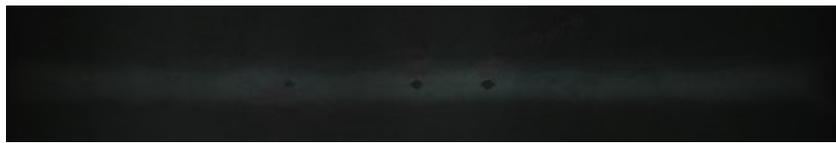


Figura 1.45 – Imagen radiográfica ampliada de la probeta 1. **Fuente:** Autor.

- **Análisis de resultados por inspección de radiografía industrial**

Tabla 1.7 – Análisis de resultados de la probeta 1. **Fuente:** Autor.

N° de falla	Tipo de falla	Rango recomendado de la falla (AWS D1.1)	Dimensión de la falla (mm)	Cumple o No Cumple
1	Porosidad	Hasta 6mm	2	Cumple
2	Porosidad	Hasta 6mm	3	Cumple
3	Porosidad	Hasta 6mm	4	Cumple

- **Observación**

La probeta P1 cumple con los requerimientos de la norma AWS D1.1 de acuerdo a la parte 6.12 que indica la suma de porosidades no debe exceder a 10mm, por cuanto es aceptada pese a tener discontinuidades.

Probeta 2

- **Información general**

- **Lugar:** Universidad Politécnica Salesiana - Sede Cuenca
- **Laboratorio:** Ensayos No Destructivos
- **Operador:** Laboratorista capacitado
- **Responsable:** Docente capacitado
- **Identificación de la pieza**
- **Descripción:** Soldadura de canal simple de una junta a tope con bisel tipo V de proceso SMAW para 10mm de espesor
- **Identificación:** P2 (Probeta 2)
- **Tipo de material:** Acero ASTM A36
- **Tipo de probeta:** Junta

- **Equipo**
 - **Fuente:** Rayos X
 - **Marca:** Angstrom
 - **Modelo:** AXFQ-2005
 - **N° de serie:** 150583ASFJ1215
 - **mA:** 5
 - **kV:** 150
 - **Tiempo de exposición:** 1 min
 - **Distancia focal a la pieza:** 600mm
 - **Distancia focal a la película:** 610mm

- **Película**
 - **Marca:** Industrex AA400 (Carestream) con pantallas de plomo
 - **Tipo:** 2
 - **Espesor:** 0.030mm
 - **Dimensiones:** 220mm x 100mm

- **Esquema de la pieza**
 - **Imagen fotográfica:**



Figura 1.46 – Imagen fotográfica de la probeta 2 . **Fuente:** Autor.

– **Plano:** Escala 1:1

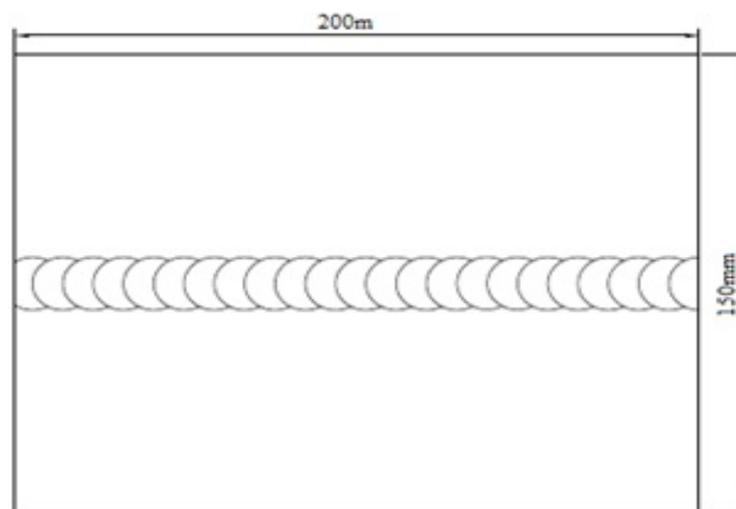


Figura 1.47 – Plano de la probeta 2. **Fuente:** Autor.

- **Proceso de revelado**

- **Tiempo de preparación de la impresora de revelado:** 10 minutos
- **Tiempo de preparación de la impresora de revelado:** 2 minutos aproximadamente

- **Imagen radiográfica**

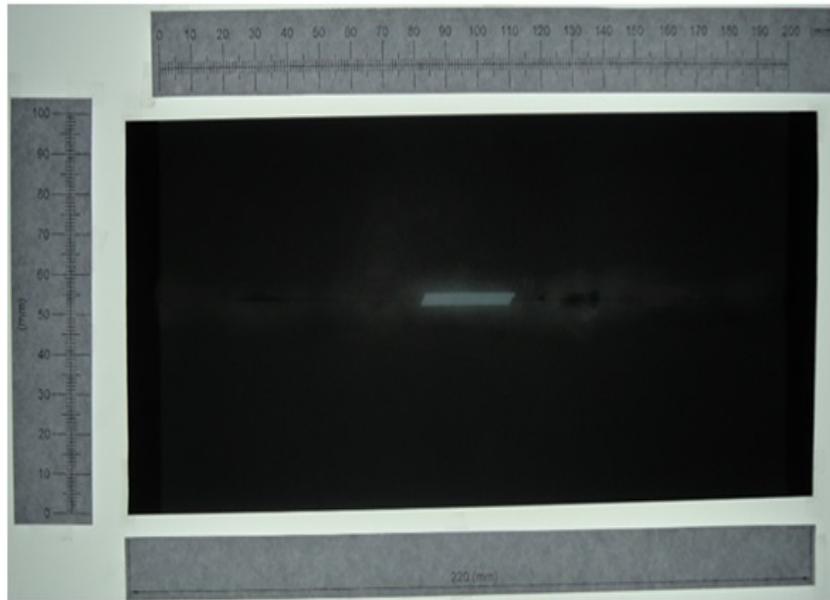


Figura 1.48 – Imagen radiográfica de la probeta 2. **Fuente:** Autor.

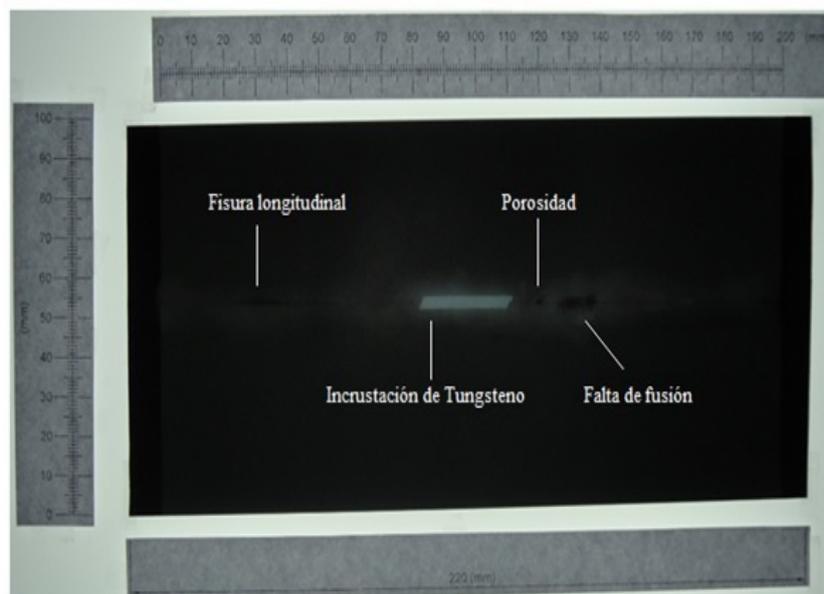


Figura 1.49 – Imagen radiográfica detallada de la probeta 2. **Fuente:** Autor.

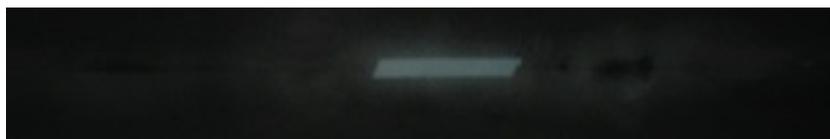


Figura 1.50 – Imagen radiográfica ampliada de la probeta 2. **Fuente:** Autor.

- **Análisis de resultados por inspección de radiografía industrial**

Tabla 1.8 – Análisis de resultados de la probeta 2. **Fuente:** Autor.

N° de falla	Tipo de falla	Rango recomendado de la falla (AWS D1.1)	Dimensión de la falla (mm)	Cumple o No Cumple
1	Fisura longitudinal	No debe existir	12	No Cumple
2	Incrustación de Tungsteno	No debe existir	30	No Cumple
3	Porosidad	Hasta 6mm	2	Cumple
4	Falta de fusión	No debe existir	11	No Cumple

- **Observación**

La probeta P2 no cumple con los requerimientos de la norma AWS D1.1 de acuerdo a la parte 6.12 que indica la prohibición de fisuras, falta de fusión, por cuanto es rechazada.

1.6.3 Protocolo de seguridad radiológica para la utilización del equipo generador de rayos X

1.6.3.1 Introducción

El laboratorio de Ensayos No Destructivos de la Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca con R.U.C.: 0190151530001, es una institución de Servicio dedicada a la Educación Superior en el país y brinda servicios de enseñanza a la juventud. Por lo que le hace necesario definir mediante un manual los pasos necesarios y las respectivas precauciones que deberán ser adoptados en el transporte y utilización del equipo de rayos X industrial. Para establecer los parámetros de seguridad radiológica nos basamos en el manual de procedimientos de operaciones normales y en caso de emergencia que es aplicable a todo el personal de Autoridades, Docentes, Administrativos y Estudiantes del Laboratorio de Ensayos No Destructivos de la Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca, que se encuentren involucrados en las instalaciones y áreas de trabajo del Laboratorio.

- Se tomarán las precauciones necesarias para que los trabajos propuestos no causen daños a terceros.
- Todas las personas que trabajen con radiaciones ionizantes se someterán anualmente a un examen médico.
- Está prohibido que el personal femenino en estado de gravidez reconocido por diagnóstico médico esté en contacto con radiación.
- Se colocará el símbolo internacional de radiación ionizante, además de señales de precaución en cada área donde se utilice esta radiación.
- Los insumos químicos para revelado deberán almacenarse en un lugar seguro y con ventilación adecuada.

1.6.3.4 Descripción del entrenamiento específico del POE

Todo el Personal Ocupacionalmente Expuesto perteneciente al Laboratorio de Mecánica, ha realizado y aprobado el curso dictado por el MINISTERIO DE ELECTRICIDAD Y ENERGÍA RENOVABLE, SUBSECRETARÍA DE CONTROL Y APLICACIONES NUCLEARES-CUENCA. Igualmente dos Ingenieros serán calificados como Oficiales de Seguridad Radiológica.

1.6.3.5 Descripción de los medios con que cuenta el Oficial de Seguridad Radiológica para realizar el monitoreo individual con el de área y listado de equipos de monitoreo

Los Ingenieros Fran Reinoso Avecillas y Wilson Calle Guamantario, en calidad de Oficiales Seguridad Radiológica, cuenta con un dosímetro personal y a su disposición tienen un equipo Geiger Müller de las siguientes características:

Tabla 1.9 – Características del medidor de radioactividad Geiger Müller. **Fuente:** Autor.

Tipo	Marca	Modelo	Serie	Fecha de calibración	Próxima calibración	Institución que calibra	Estado
GEIGER MULLER	GAMMA SCOUT	W/ALERT	62499	15/07/2016	16/07/2018	INSTITUTE FOR RADIO CHEMISTRY AND RADIATION	Funcionando desde Enero de 2016

1.6.3.6 Límites de dosis para el POE y miembros del público

Tabla 1.10 – Límites de dosis para el POE y público en general. **Fuente:** Autor.

Magnitud	POE (Personal Ocupacionalmente Expuesto)	Público en general
Dosis efectiva	20 mSv / año oficial	1 mSv / año oficial
Cristalino	150 mSv / año oficial	15 mSv / año oficial
Extremidades y/o piel	500 mSv / año oficial	50 mSv / año oficial

1.6.3.7 Protocolo de seguridad en operaciones normales con el equipo generador de rayos X

- Planificar los horarios y fechas para el uso del Laboratorio de rayos X industrial.
- Comunicar y solicitar permiso al Vicerrector y autoridades competentes.
- Determinar un área segura a 50m a la redonda (laboratorios, aulas, oficinas, etc.).
- Contar con los instrumentos de medición de radiación ionizante debidamente calibrados.
- Inspeccionar el equipo de rayos X.
- Colocar en la mesa portaplacas, a la muestra o probeta para el ensayo radiográfico y se procede a cerrar la puerta del búnker.
- La puerta del búnker activa el circuito de seguridad y da paso de corriente eléctrica a la consola de mando del equipo de rayos X industrial.
- Encender el equipo desde la consola de mando.
- Proceder al ensayo que tiene una duración acorde a la pieza a estudiar según la tabla que viene en la consola del equipo dependiendo del espesor, el máximo kilovoltaje del equipo es de 200 kV.
- Una vez activado el botón de disparo se dispone de un periodo de tiempo de 1 min de espera para empezar la irradiación.
- Una vez terminada la exposición de la placa, se podrá retirarla inmediatamente sin temor a sufrir efectos de las radiaciones ionizantes.
- El equipo posee una alarma, la misma que se activa en el momento en que termina el ensayo.
- Realizar periódicamente (cada año) mantenimiento y pruebas de fuga por personal debidamente autorizado para brindar este mantenimiento con licencia vigente de la SCAN-MEER.
- Siempre llevar el medidor de radioactividad en todas las prácticas para controlar el nivel de radiación.

1.6.3.8 Dispositivos de seguridad de los equipos (señalización y enclavamientos)

El equipo generador de radiaciones ionizantes, rayos X, propiedad de la Universidad Politécnica Salesiana Sede Matriz Cuenca, marca ANGSTROM, se encuentra ubicado en un búnker en el Laboratorio de Ensayos No Destructivos, no cuenta con barreras primarias debido a que es fijo y está apuntando al suelo pero sí con barreras secundarias de ladrillo y hormigón, además, está dotado de una puerta con el blindaje adecuado con plomo en paredes y puertas del búnker. Está junto a otros laboratorios de las Áreas de Mecánica y de Ciencias de la Vida. El lugar cuenta con seguridades físicas en sus puertas y Servicio de Guardianía Privada, 24/7, para evitar robos. Está aislado de las otras áreas de laboratorios y está rodeado de una estructura apropiada. Dentro de este sitio se cuenta con la señalética informativa y preventiva sobre equipos generadores de radiaciones ionizantes. Cuenta con un sistema de seguridad de y alarma “último hombre”, mediante el cual la consola de mando no recibe alimentación de energía eléctrica mientras la puerta del búnker no se encuentre cerrada. Además de alarma luminosa y sonora durante la prueba. A futuro, cuando el equipo vaya a ser utilizado en campo abierto se requerirá de cintas plásticas de peligro, cintas adhesivas, conos de seguridad, detector Geiger Müller.

1.6.3.9 Características técnicas del equipo generador de rayos X

Tabla 1.11 – Características técnicas del tubo generador de rayos X. **Fuente:** Autor.

Tipo	Marca	Modelo	Serie	Estado
Portátil	Angstrom	AXFQ-2005	150583ASFJ1215	Funcionando

1.6.3.10 Ubicación del equipo de rayos X

El equipo se encuentra ubicado en el Laboratorio de Ensayos No Destructivos del área de Mecánica, el mismo que se encuentra bajo condiciones fiables de seguridad, además:

- Se cuenta con la señalización adecuada y en buenas condiciones.
- A pesar de ser portátil, por el momento es fijo, no sale fuera del búnker.
- El lugar se considera como zona restringida para personal no autorizado.
- El lugar del búnker se encuentra ubicado en un sitio alejado del tráfico cotidiano del personal que labora en la institución.

1.6.3.11 Normas de protección y seguridad para los trabajadores

El equipo se encuentra ubicado en el Laboratorio de Ensayos No Destructivos del área de Mecánica, el mismo que se encuentra bajo condiciones fiables de seguridad, además:

- Posea siempre disponible un plan de trabajo, protección y emergencias en forma escrita.
- Tenga a la mano todos los elementos de protección y úselos en los procedimientos de emergencia.
- Mantenga el equipo en el búnker destinado para esas labores.
- Realizar inspecciones cotidianas del equipo de protección personal para evitar deterioro del mismo.
- Use el dosímetro personal siempre que se trabaje con fuentes emisoras de radiaciones ionizantes.
- Utilice señales convencionales durante el trabajo con fuentes de radiación.
- No coma, no beba y no fume durante el trabajo con fuentes de radiación ionizante.
- Mantenga un inventario actualizado de los equipos en el lugar de trabajo.
- Seguir las instrucciones de las fichas de seguridad para el manejo de químicos.

1.6.3.12 Procedimiento para el monitoreo de la radiación ionizante

En cada día de uso del equipo, el personal está obligado a utilizar el medidor. Geiger Müller, el mismo que nos va a ayudar a detectar los niveles de radiación en el entorno de operación del equipo.

1.6.3.13 Procedimientos para la evaluación de dosis individuales

Para la evaluación de la dosis individual el operador portará siempre su dosímetro personal. La institución informará a cada uno de los operadores del Equipo de Rayos X Industrial los resultados obtenidos en el período de utilización del dosímetro, que es enviado a la empresa DOSISRAD para su evaluación cada 2 meses.

1.6.3.14 Procedimientos para la investigación de casos que sobrepasen los niveles de referencia o límite de dosis

En caso de que los valores dosimétricos del POE superen el límite de dosis mensual (1,5 mSv), se deberá realizar una investigación con la finalidad de determinar si la dosis reportada fue recibida

por el operador. El usuario deberá ser sometido a exámenes completos para determinar su estado de salud, además el personal deberá estar aislado de toda operación que contenga radiaciones ionizantes por un tiempo determinado. Para estos casos los rangos de dosis se clasifican en nivel de actuación, nivel de intervención, nivel de investigación y nivel de registro. Estos niveles se pueden establecer para cualquiera de las magnitudes determinadas en la práctica de la protección radiológica.

1.6.3.15 Procedimientos para la vigilancia médica (incluyendo los casos de accidentes o incidentes radiológicos)

La Universidad Politécnica Salesiana tiene el compromiso de realizar los exámenes médicos respectivos anualmente como: análisis clínicos de biometría hemática y recuento de plaquetas, un chequeo médico y otros chequeos que fuesen necesarios a sus trabajadores. Los resultados serán registrados en este manual y archivados en las carpetas personales. Deberá informarse de manera inmediata a la SCAN entidad que pertenece al M.E.E.R., respecto al accidente e informar acerca del comportamiento del trabajador mediante informes entregados por el profesional a cargo del caso.

1.6.3.16 Procedimiento para entrenar y actualizar al personal

De forma periódica se entrenará al personal a cargo del equipo para que esté enterado del funcionamiento del aparato y las reglas de seguridad antes de usar, en operación y luego del trabajo realizado. Para cumplir con este objetivo se organizarán talleres dirigidos por personal especializado en el área, se deberá documentar y archivar adecuadamente esta información.

1.6.3.17 Procedimiento para llevar el registro dosimétrico del POE

Una vez que el dosímetro ha sido entregado al proveedor del servicio de dosimetría, para realizar las lecturas de control y se ha recibido el informe respectivo, dicha información será recopilada en el formulario respectivo para evaluar el comportamiento del personal en contacto con el equipo. Se deberá prestar especial interés en la dosis máxima permitida, la cual no deberá sobrepasar de 1,5 mSv/mes, se aplicará la restricción de dosis efectiva para esta práctica que es de 5.0 mSv/año. Es obligación del trabajador expuesto a las radiaciones ionizantes, llevar el registro de su dosimetría personal el mismo que es entregado cada 2 meses.

1.6.3.18 Control del área donde se realizará la práctica de rayos X

Al determinar los límites de toda zona controlada, los titulares registrados y los titulares licenciados deberán tener en cuenta la magnitud de las exposiciones normales previstas, la probabilidad y magnitud de las exposiciones potenciales, y a la naturaleza y alcance de los procedimientos de protección y seguridad requeridos. Los titulares registrados y los titulares licenciados deberán:

- Delimitar por medios físicos las zonas controladas o, cuando esto no sea razonablemente factible, por otros medios adecuados.
- Cuando el equipo/fuente se ponga en funcionamiento se deberá delimitar una zona controlada adecuada por medios idóneos en las circunstancias existentes y especificar los tiempos de exposición.
- Colocar un símbolo de advertencia, tal como el recomendado por la Organización Internacional de Normalización, y las instrucciones apropiadas en los puntos de acceso y otros lugares adecuados del interior de las zonas controladas.
- Establecer medidas de protección y seguridad ocupacional inclusive reglas y procedimientos locales apropiados para las zonas controladas.
- Restringir el acceso a las zonas controladas por medio de procedimientos administrativos, tales como el uso de permisos de trabajo, y mediante barreras físicas, que incluirán dispositivos de cierre o enclavamiento, siendo el grado de restricción proporcionando a la magnitud y probabilidad de las exposiciones previstas.
- Proporcionar, en los puntos de entrada de las zonas controladas: de ropa y equipo de protección, equipo de vigilancia radiológico.
- Proporcionar, en los puntos de salida de las zonas controladas: de un lugar adecuado para guardar la ropa y el equipo de protección.
- Examinar periódicamente las condiciones para determinar la posible necesidad de revisar las medidas de protección o las disposiciones de seguridad, o bien los límites de las zonas controladas.

1.6.3.19 Control de equipos de monitoreo

- Verificar el encendido del equipo.
- Baterías en buen estado.
- Chequear con equipos similares la bondad de funcionamiento.
- Calibrar el equipo cada año.

1.6.3.20 Control de la documentación

- Llevar los registros de manera adecuada y ordenada.
- Usar carpetas y separadores para guardar la información recopilada.

- Llevar registros de monitoreo personal de cada uno de los operadores del equipo de rayos X en los que conste la dosis personal.
- Llevar un control de los niveles de radiación ionizante en el área donde se realice el trabajo.
- Bitácora de utilización del equipo.
- Controlar las fechas en las cuales se debe realizar mantenimiento de los equipos y determinar el control de calidad que certifique la idoneidad del equipo.
- Calibraciones periódicos de los detectores.
- Llevar registros de control rutinario de existencia del equipo.
- Capacitación inicial periódica y entrenamiento del personal.
- Registros de los simulacros de emergencias.
- Registros de incidentes y/o accidentes.
- Inventario de los equipos generadores de radiación.
- Detalle del personal ocupacionalmente expuesto.
- Registro de las licencias vigentes.
- Evaluaciones médicas.
- Registros de las inspecciones realizadas por la SCAN.
- Registros de mantenimiento incluyendo pruebas de fuga.

1.6.3.21 En caso de sobreexposición

- Paralizar los trabajos y aislar la zona.
- Dirigirse a una zona segura.
- Llamar al Oficial responsable e informar la situación respectiva.
- Reportar al MINISTERIO DE ELECTRICIDAD Y ENERGÍA RENOVABLE, SUBSECRETARÍA DE CONTROL Y APLICACIONES NUCLEARES-CUENCA.

1.6.3.22 En caso de robo

- Denunciar a la Policía.
- Publicar en la prensa.
- Alertar a la ciudadanía el peligro de manipular el equipo de Rayos X Industrial por los medios de comunicación, indicando los efectos de la sobreexposición radiactiva.
- La caja de transporte dispondrá de la siguiente etiqueta.
- Comunicar a la SCAN-MEER.

1.6.3.23 En caso de incendio

- Evacuar la zona y dirigirse al punto de encuentro.
- Comunicar a las autoridades (Policía, Bomberos, etc.)

1.6.3.24 Direcciones y teléfonos de personas e instituciones a las cuales acudir en casos de emergencia

En caso de haber alguna anomalía con el equipo o área de trabajo el operador debe comunicar al Oficial de Seguridad Radiológica, el cual debe implementar las acciones correctivas apropiadas con sus propios recursos, cuando se superen sus capacidades, se comunicará al MINISTERIO DE ELECTRICIDAD Y ENERGÍA RENOVABLE, SUBSECRETARIA DE CONTROL Y APLICACIONES NUCLEARES-CUENCA.

1.6.3.25 Normas básicas para el trabajo con fuentes de radiación y precauciones de seguridad

- Mantener el equipo de Rayos X en el búnker destinado para ello.
- El equipo debe ser operado por personal que sea calificado y autorizado por el MINISTERIO DE ELECTRICIDAD Y ENERGÍA RENOVABLE, SUBSECRETARIA DE CONTROL Y APLICACIONES NUCLEARES-CUENCA.
- Colocar señalización en el área de trabajo (a 5m a la redonda).
- Colocar señalización con leyenda: "PELIGRO RAYOS X".
- No debe haber ninguna persona junto a las paredes del búnker de trabajo.
- Utilizar el medidor de radioactividad Geiger Müller y dosímetro personal.

1.7 Conclusiones

- Al ejecutar el procedimiento bajo norma estándar internacional AWS D1.1 mediante la técnica de radiografía industrial se logró determinar los siguientes fallos en las juntas soldadas como: porosidad, fisura longitudinal, falta de fusión e incrustación de tungsteno, las mismas que nos llevaron a determinar la aceptación o rechazo de las probetas.
- Se seleccionó al material el mismo que es el acero ASTM A36 bajo la norma AWS D1.1, el cual es utilizado mayormente para la fabricación y el montaje de estructuras metálicas para espesores mayores a 3mm y menores a 20mm.
- Para la elaboración del procedimiento de práctica deben establecerse objetivos y responsabilidades, tendientes al manejo y utilización correcto de los equipos y materiales para la preparación y el desarrollo idóneo de la práctica del laboratorio; así mismo con la adecuada utilización de los equipos de protección personal que garantice un adecuado manejo de equipos y seguridad para el personal ocupacionalmente expuesto a radiaciones ionizantes.
- El protocolo de seguridad radiológico es indispensable aplicarlo cuando se realizan prácticas con el tubo generador de rayos X, mediante el cual se establecen criterios y procedimientos de seguridad para el manejo de fuente de rayos X. Todo enmarcado en el ámbito de la protección hacia el trabajador y que este reciba la menor dosis posible de radiación ionizante.

1.8 Recomendaciones

- El gobierno nacional por medio del MEER establezca un reglamento para el manejo y control de radiaciones ionizantes, en industrias y entidades de educación superior que emiten este tipo de fuentes de radiaciones ionizantes.
- Para ejecutar un procedimiento de ensayo de rayos X, los operarios deberán estar completamente capacitados en el manejo del equipo generador de rayos X. Los equipos deberán estar debidamente calibrados así como llevar un control de mantenimiento anual de los mismos con la finalidad de que todos los procesos se lleven a cabo de manera idónea con la máxima seguridad posible para evitar accidentes laborales.
- Brindar capacitaciones a los estudiantes de las ingenierías afines a la utilización de las técnicas de radiografía industrial, para que puedan desarrollar investigaciones, proyectos y contribuir al desarrollo industrial del país.
- Toda institución que trabaje con radiaciones ionizantes deberán tener un manual de procedimiento debidamente aprobado por el organismo que regula estas actividades (MEER). El protocolo de seguridad deberá estar enfocado principalmente a la protección de los trabajadores expuestos a las radiaciones ionizantes; se deberán llevar registros como: utilización de

los equipos, procedimientos de práctica, registros de accidentabilidad, planes de emergencia, simulacros, etc.

- De acuerdo a los límites de exposición permitidos (1,5 mSv al mes), se recomienda a los operadores expuestos a este tipo de radiaciones, siempre llevar consigo el dosímetro personal y el medidor de radioactividad (Geiger Müller), u otros medidores como la cámara de ionización que nos sirven para controlar los niveles de radiación y así evitar riesgos para la salud.
- Se recomienda que en el procedimiento de práctica se utilice la normativa establecida para cada institución, tomando en cuenta básicamente al factor humano siempre con la tendencia que esté debidamente protegido siguiendo todas las normas básicas de seguridad y protección radiológica.

1.9 Trabajos futuros

- Realizar un procedimiento de práctica para la determinación de fallos en tuberías soldadas usando la radiografía industrial.

Referencias bibliográficas

- [1] AWS, *AWS D1.1/D1.1M:2010 Código de Soldadura Estructural – Acero*, Miami, 2010.
- [2] A. González Zambrano, “Aplicación de los rayos X en la industria como prueba No-Destructiva,” México, 1995.
- [3] G. S. Chimarro Navas and J. P. Malitaxi Urresta, “Comparación entre los métodos de ultrasonido y radiografía industrial para la interpretación y evaluación de discontinuidades en juntas soldadas con bisel tipo V y proceso SMAW según norma AWS D1.1,” Quito - Ecuador, 2016.
- [4] A. Goñi Córdoba and J. Fernández Carrasquilla, “Ensayos no destructivos para localización de grietas en piezas estampadas,” 2014.
- [5] CIDESI, “Curso Internacional de Ensayos No Destructivos,” p. 161, 2008.
- [6] H. Ruiz Caballero, “Inspección Radiográfica de Soldaduras,” México, 1993.
- [7] F. P. Incropera and D. P. DeWitt, *Fundamentos de transferencia de calor*. Pearson Educación, 1999.
- [8] AWS, *AWS QCI: 2007 Norma para la certificación de inspectores de soldaduras de la AWS*, 2007.
- [9] AWS, *AWS A3.0 Standard Welding Terms and Definitions*, Miami, 2010.
- [10] J. Sun, Q. Yan, Z. Li, and J. Huang, “Effect of bevel angle on microstructure and mechanical property of al/steel butt joint using laser welding-brazing method,” *Materials & Design*, vol. 90, pp. 468–477, 2016.
- [11] P. T. Houldcroft, *Tecnología de los procesos de soldadura*. Grupo Planeta (GBS), 1980.
- [12] AWS, *AWS A2.4:2012 Símbolos estándar para la soldadura, la soldadura fuerte y los ensayos no destructivos*, 2012.
- [13] J. W. Giachino and W. Weeks, *Técnica y práctica de la soldadura*. Reverté, 1997.
- [14] M. P. Groover, *Fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas*. Pearson Educación, 1997.

- [15] Soldexa, “Manual de soldadura,” p. 295, 2015.
- [16] P. Kah, B. Mvola, J. Martikainen, and R. Suoranta, “Real time non-destructive testing methods of welding,” in *Advanced Materials Research*, vol. 933. Trans Tech Publ, 2014, pp. 109–116.
- [17] N. Boaretto and T. M. Centeno, “Automated detection of welding defects in pipelines from radiographic images dwdi,” *NDT & E International*, vol. 86, pp. 7–13, 2017.
- [18] G. Liling and Z. Yingjie, “Weld defect detection in industrial radiography based on image segmentation,” *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, vol. 53, no. 5, pp. 263–269, 2011.
- [19] R. O. López, H. P. Lara, and C. H. Trujillo, “Aplicación y selección de ensayos no destructivos para la evaluación de uniones soldadas,” *Scientia et Technica*, vol. 2, no. 48, pp. 196–201, 2011.
- [20] M. Consonni, C. F. Wee, and C. Schneider, “Manufacturing of welded joints with realistic defects,” *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, vol. 54, no. 2, pp. 76–81, 2012.
- [21] D. S. Noroña Venegas, “Elaboración de un plan de protección radiológica para el laboratorio de ensayos no destructivos de la Escuela Politécnica Nacional,” Quito - Ecuador, 2016.
- [22] IAEA, “Seguridad radiológica en la radiografía industrial,” p. 135, 2014.
- [23] A. Advanced Inc., “AXFQ Series.” [Online]. Disponible en: <http://www.angstrom-advanced.com/index.asp?page=XXQ>.
- [24] GAMMA-SCOUT[®], “Mesurar la radioactividad confiable.” [Online]. Disponible en: <https://www.gamma-scout.com/ES/Technische-Daten.php>.

Anexos

Anexo A.1 Licencia institucional



Ministerio de Electricidad y Energía Renovable



LICENCIA INSTITUCIONAL - OPERACIÓN - C							
MEER N° C - 0611				Fecha de expedición: 24 Noviembre 2016			
Validez: 4 años				Fecha de expiración: 23 Noviembre 2020			
INSTITUCIÓN:		UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA					
RUC:		0190151530001					
REPRESENTANTE LEGAL:		PADRE DR. JAVIER HERRÁN GÓMEZ SDB.					
PRÁCTICA:		RADIOGRAFÍA INDUSTRIAL					
DIRECCIÓN:		CALLE VIEJA 12-30 Y ELIA LIUT					
PROVINCIA:		AZUAY					
CIUDAD:		CUENCA					
TELÉFONO:		072862213					
ESTA INSTALACIÓN ESTÁ AUTORIZADA PARA EL USO DE:							
EQUIPOS GENERADORES DE RADACIÓN IONIZANTE (1)	CAMPO		Kv máximo		mA máximo		
	RADIOGRAFÍA INDUSTRIAL		200 Kv		15		
FUENTES RADIACTIVAS SELLADAS	CAMPO		RADIOISÓTOPOS		ACTIVIDAD/PRÁCTICA		
	XXXXXXXX		XXXXXXXX		XXXXXXXX		
FUENTES RADIACTIVAS ABIERTAS	CAMPO		RADIOISÓTOPOS		ACTIVIDAD/PRÁCTICA		
	XXXXXXXX		XXXXXXXX		XXXXXXXX		
El Servicio de Radiografía Industrial del Laboratorio de Ensayos No Destructivos de la UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA, está autorizado para dar servicio con el siguiente equipo:							
No	TIPO	MARCA		MODELO		SERIE	
		EQUIPO	TUBO	EQUIPO	TUBO	EQUIPO	TUBO
1	RX INDUSTRIAL	ANGSTROM	ANGSTROM	AXFG 2005	AXFG 2005	N.R.	N.R.
EL REPRESENTANTE LEGAL es el responsable de supervisar y dar cumplimiento a lo que estipula el Reglamento de Seguridad Radiológica publicado en el Registro Oficial N° 891, del 08 de agosto de 1979.							
LA PRESENTE LICENCIA podrá cancelarse o suspenderse si se comprueba que existiera violación al Reglamento de Seguridad Radiológica.							

Natali Chávez
Biofis. Natali Chávez O.
DIRECTORA DE LICENCIAMIENTO Y PROTECCIÓN RADIOLÓGICA

Nathaly Mora
Ing. Nathaly Mora H.
RESPONSABLE ZONAL

Francisco A. Enríquez Guerra
Dr. Francisco A. Enríquez Guerra
INSPECTOR DE SEGURIDAD RADIOLÓGICA



Ministerio de Electricidad y Energía Renovable

Dirección de Licenciamiento y Protección Radiológica

Subsecretaría de Control y Aplicaciones Nucleares

José Tamayo E10-25 y Lizardo García
 Tel.: + (593 2) 397 6000
 www.energia.aob.ec

Anexo A.2 Licencia del personal ocupacionalmente expuesto

AUTORIZACION PARA OFICIAL
DE SEGURIDAD RADIOLOGICA

REPÚBLICA DEL ECUADOR
MINISTERIO DE ELECTRICIDAD Y ENERGIA RENOVABLE
SUBSECRETARIA DE CONTROL Y APLICACIONES NUCLEARES

LICENCIA N°: 0102257425

RENOVACION N°: 0

NOMBRE: REINOSO AVECILLAS FRAN ZHOVANI

N° DE CÉDULA: 0102257425

PROFESION: INGENIERO MECÁNICO

ESPECIALIDAD: MASTER EN INVESTIGACIÓN EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

EXPEDICIÓN: 15/11/2016

ACTUALIZACIÓN: XXXXX

EXPIRACIÓN: 14/11/2018

CÓDIGO: C-1032

El portador de esta autorización posee los conocimientos necesarios para la aplicación de las normas de seguridad radiológica, como Oficial de Seguridad Radiológica.

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA			
	CAMPO DE APLICACIÓN	ENERGÍA MÁXIMA	UMA MÁXIMO
EQUIPOS GENERADORES DE RADIACIÓN	RAYOS X INDUSTRIAL	200 KV	XXXXX
	CAMPO DE APLICACIÓN	RADIOISÓTOPO	ACTIVIDAD MÁXIMA
FUENTES RADIATIVAS SELLADAS	XXXXX	XXXXX	XXXXX
FUENTES RADIATIVAS ABIERTAS	XXXXX	XXXXX	XXXXX



Ministerio de Electricidad y Energía Renovable

Natali Chavez

BI. NATALI CHAVEZ
DIRECTORA DE LICENCIAMIENTO Y PROTECCIÓN RADIOLOGICA

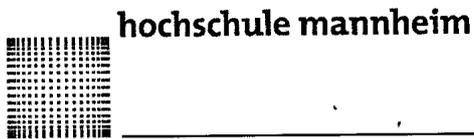
Nathaly Mora

ING. NATHALY MORA
RESPONSABLE ZONAL

Francisco A. Enríquez G.

DR. FRANCISCO A. ENRÍQUEZ G.
INSPECTOR DE SEGURIDAD RADIOLOGICA

Anexo A.3 Certificado de calibración del equipo medidor de rayos X



hochschule mannheim



Fachhochschule Mannheim Windeckstraße 110 68163 Mannheim

Institute for Radiochemistry and Radiation Protection

Certificate

The GAMMA-SCOUT® unit No. 62499 was used to measure the environmental radiation for three days. The results were compared with those of a reference device and found to deviate from these by less than $\pm 5\%$.

The reference devices were measured at the Institute for Radiochemistry and Radiation Protection of the public College of Technology and Design in a dose equivalent range up to 10 $\mu\text{Sv/h}$, and determined suitable.

The reference devices are regularly checked.

The measuring performance of the GAMMA-SCOUT® unit No. 62499 can therefore be certified as being very good.

Prof. Dr. E. Fohrtag

- Head of the Institute -