



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial

**DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN DE LA EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DEL
COMPORTAMIENTO DE DEFECTOS INDUCIDOS DE POROSIDAD, FALTA DE
PENETRACIÓN Y SOCAVACIÓN EN PROBETAS DE ACERO AL CARBONO ASTM A36
SOLDADAS CON SOLDADURA DE ARCO PROTEGIDO A TRAVÉS DE MÉTODOS DE
ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS (PT, MT, RT y UT) EN CONDICIONES DE NORMAS AWS**

Juan Pablo Pérez Noriega

Asesorado por el Msc. Ing. Rudy René Carías

Guatemala, marzo de 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN DE LA EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DEL
COMPORTAMIENTO DE DEFECTOS INDUCIDOS DE POROSIDAD, FALTA DE
PENETRACIÓN Y SOCAVACIÓN EN PROBETAS DE ACERO AL CARBONO ASTM A36
SOLDADAS CON SOLDADURA DE ARCO PROTEGIDO A TRAVÉS DE MÉTODOS DE
ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS (PT, MT, RT y UT) EN CONDICIONES DE NORMAS AWS**

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

JUAN PABLO PÉREZ NORIEGA
ASESORADO POR EL MSC. ING. RUDY RENÉ CARIÁS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO INDUSTRIAL

GUATEMALA, MARZO DE 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
VOCAL V	Br. Sergio Alejandro Donis Soto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Juan José Peralta Dardón
EXAMINADOR	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez
EXAMINADOR	Ing. Víctor Hugo García Roque
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN DE LA EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DEL
COMPORTAMIENTO DE DEFECTOS INDUCIDOS DE POROSIDAD, FALTA DE
PENETRACIÓN Y SOCAVACIÓN EN PROBETAS DE ACERO AL CARBONO ASTM A36
SOLDADAS CON SOLDADURA DE ARCO PROTEGIDO A TRAVÉS DE MÉTODOS DE
ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS (PT, MT, RT y UT) EN CONDICIONES DE NORMAS AWS**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Posgrado, con fecha 18 de febrero de 2013.


Juan Pablo Pérez Noriega

Universidad de San Carlos
de Guatemala



Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Teléfono 2418-9142

AGS-MIMPP-0002-2013

Guatemala, 18 de febrero de 2013.

Director:
César Ernesto Urquizú Rodas
Escuela de Mecánico Industrial
Presente.

Estimado Director:

Reciba un atento y cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado. El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado los cursos aprobados del primer año y el Diseño de Investigación del estudiante **Juan Pablo Pérez Noriega** con carné número **2004-12387**, quien opto la modalidad del **“PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO”**. Previo a culminar sus estudios en la **Maestría de Ingeniería en Mantenimiento**.

Y si habiendo cumplido y aprobado con los requisitos establecidos en el normativo de este Proceso de Graduación en el Punto 6.2, aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Decimo, Inciso 10.2, del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011, firmo y sello la presente para el trámite correspondiente de graduación de Pregrado.

Sin otro particular, atentamente,

“Id y enseñad a todos”

Rudy René Carías
INGENIERO MECÁNICO
COLEGIADO No. 11,125

Msc. Ing. Rudy René Carías
Asesor (a)

César Akú Castillo MSc.
INGENIERO INDUSTRIAL
COLEGIADO No. 4,073

Msc. Ing. César Augusto Akú Castillo
Coordinador de Área
Gestión y Servicios

Dra. Mayra Virginia Castillo Montes
Directora
Escuela de Estudios de Postgrado

Cc: archivo
/la



REF.DIR.EMI.078.013

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el Visto Bueno del Revisor y la aprobación del Área de Lingüística del trabajo de graduación en la modalidad Estudios de Postgrado titulado **DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN DE LA EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE DEFECTOS INDUCIDOS DE POROSIDAD, FALTA DE PENETRACIÓN Y SOCAVACIÓN EN PROBETAS DE ACERO AL CARBONO ASTM A36 SOLDADAS CON SOLDADURA DE ARCO PROTEGIDO A TRAVÉS DE MÉTODOS DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS (PT, MT, RT y UT) EN CONDICIONES DE NORMAS AWS**, presentado por el estudiante universitario **Juan Pablo Pérez Noriega**, aprueba el presente trabajo y solicita la autorización del mismo.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”


Ing. César Ernesto Urquizú Rodas
DIRECTOR

Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial



Guatemala, marzo de 2013.

/mgp

Universidad de San Carlos
de Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 189 .2013

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN DE LA EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE DEFECTOS INDUCIDOS DE POROSIDAD, FALTA DE PENETRACIÓN Y SOCAVACIÓN EN PROBETAS DE ACERO AL CARBONO ASTM A36 SOLDADAS CON SOLDADURA DE ARCO PROTEGIDO A TRAVÉS DE MÉTODOS DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS (PT, MT, RT y UT) EN CONDICIONES DE NORMAS AWS**, presentado por el estudiante universitario: **Juan Pablo Pérez Noriega**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Decano



Guatemala, 11 de marzo de 2013

/gdech

ACTO QUE DEDICO A:

Dios

Gracias Padre por estar presente a pesar de toda circunstancia, el honor y mérito que recibo por este trabajo es tuyo.

Mis padres

Juan Pérez y Yolanda Vásquez. Me siento privilegiado y orgulloso de que sean mis padres, gracias por creer en mí y brindarme la oportunidad de alcanzar esta meta, este triunfo es de ustedes. Las palabras se quedarían cortas para describir mi gratitud hacia ustedes, los amo.

Mis hermanos

Ana Lucía Pérez y Carlos Andrés Pérez. Me siento privilegiado y orgulloso de tenerlos en mi vida, gracias por ser unos buenos amigos y apoyarme en todo, este triunfo es de ustedes, los amo.

Mis amigos y compañeros

Gabriel Arriola, Adolfo Vásquez, Betsaida Olivares, Sergio López, Flor Chávez, Erick Ordóñez, Heydi Ambelis, Raymundo Morales, José Manuel Solís, Daniel Arriola y los compañeros que me han acompañado algunos años, tal vez solo meses o solamente días. Muchas gracias por ser parte de esta etapa de

mi vida, se les aprecia y quiere bastante.

**Mi demás
familia**

Muchas gracias por su apoyo y cariño brindado.

AGRADECIMIENTOS A:

**Al pueblo de
Guatemala**

Por el privilegio que me ha permitido de recibir la educación universitaria.

**La Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Por ser el lugar que me ha permitido encontrar valiosos tesoros que van más allá de los conocimientos adquiridos.

Facultad de Ingeniería

Por brindarme los conocimientos y herramientas que me han formado como un excelente profesional.

Gabriel Arriola

Por ser como un hermano que siempre ha estado en mis buenos y malos momentos y también enseñarme con su ejemplo el valor de la amistad. Se te aprecia bastante.

Ing. Rudy Carías

Por brindarme su tiempo, su asesoría y todo el apoyo necesario para la realización de este trabajo de graduación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	III
LISTA DE SÍMBOLOS	V
GLOSARIO	VII
RESUMEN	IX
1. INTRODUCCIÓN	1
2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	5
3. OBJETIVOS	7
4. JUSTIFICACIÓN	9
5. ALCANCES	11
6. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL.....	13
6.1. Uso de los ensayos no destructivos (END)	13
6.2. Métodos de ensayos no destructivos (END).....	14
6.2.1. Ensayo de líquidos penetrantes.....	14
6.2.1.1. Fundamentos y principios físicos del método.....	15
6.2.1.2. Ventajas y limitaciones que presenta el método.....	16
6.2.2. Ensayo de partículas magnéticas	17
6.2.2.1. Fundamentos y principios físicos del método.....	18

	6.2.2.2.	Ventajas y limitaciones que presenta el método.....	19
6.2.3.		Ensayo de radiografía industrial	20
	6.2.3.1.	Fundamentos y principios físicos del método	21
	6.2.3.2.	Ventajas y limitaciones que presenta el método.....	22
6.2.4.		Ensayo de ultrasonido.....	23
	6.2.4.1.	Fundamentos y principios físicos del método	24
	6.2.4.2.	Ventajas y limitaciones que presenta el método.....	25
7.		CONTENIDO	27
8.		METODOLOGÍA Y TÉCNICAS CORRESPONDIENTES	31
9.		RECURSOS NECESARIOS	35
10.		BIBLIOGRAFÍA	39

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1. Fundamento del método de partículas magnéticas..... 19

TABLAS

- I. Recursos financieros..... 37

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
V	Bisel a 60°
cm	Centímetro
PT	Ensayo de líquidos penetrantes
MT	Ensayo de partículas magnéticas
RT	Ensayo de radiografía industrial
UT	Ensayo de ultrasonido
°	Grado sexagesimal
MHz	Mega Hertz
”	Pulgada
T	Unión básica de soldadura

GLOSARIO

Acero al carbono	Aleación de hierro-carbono cuyas concentraciones en peso de carbono van desde 0,02% hasta 2,0%.
ASTM International	Sociedad Americana de Pruebas y Materiales
AWS	Sociedad Americana de Soldadura
Capilaridad	Propiedad de los líquidos relacionada con el poder humectante y la tensión superficial.
Defecto	Es una discontinuidad inaceptable que debe ser reparada.
Discontinuidad	Es la pérdida de la homogeneidad del material.
Material ferromagnético	Material que puede ser magnetizado permanentemente por la aplicación de un campo magnético externo.
Permeabilidad	Es la capacidad que tiene un material de permitirle a un flujo que lo atraviese sin alterar su estructura interna.

Probeta	Muestra de material con dimensiones fijadas por una norma, la cual es sometida a un ensayo específico.
Radiación ionizante	Es aquella radiación con energía suficiente para ionizar la materia, extrayendo los electrones de sus estados ligados al átomo.
Socavación	Es una ranura fundida en el metal base, adyacente a la raíz de una soldadura o a la sobremonta, que no ha sido llenado por el metal de aporte.

RESUMEN

En Guatemala, el uso de uniones soldadas constituye un elemento principal en la industria de fabricación de piezas metálicas, construcción de estructuras, ensamble de partes y montajes de plantas industriales.

La presente investigación se realiza debido a la falta de aplicación del conocimiento teórico y práctico en el uso de los métodos de Ensayos No Destructivos (END) en condiciones de normas o códigos, que permitan una adecuada base para el análisis, evaluación y posterior aseguramiento de la calidad de uniones soldadas en tubos y chapas de acero al carbono.

En tal sentido, la falta de aplicación de una norma o código para el análisis y evaluación, repercute de forma directa en la toma de decisiones en cuanto al criterio de aceptación/rechazo de las discontinuidades detectadas por la aplicación de los métodos END, así como en el estado final de las uniones soldadas, ya que podrán provocarse anomalías que se traducen en variaciones de las propiedades mecánicas y resistencia mecánica exigida.

De modo que para lograr los objetivos de la investigación se realizará el diseño y elaboración de probetas soldadas; en las cuales se inducirán los defectos de porosidad, falta de penetración y socavación. Seguido, sobre las probetas se aplicarán los métodos de ensayo de Líquidos Penetrantes (PT), Partículas Magnéticas (MT), Ultrasonido (UT) y Radiografía (RT) en condiciones de normas de la Sociedad Americana de Soldadura (AWS, por sus siglas en inglés). Luego utilizando los criterios de aceptación y rechazo establecidos por la Norma AWS se determinará si las discontinuidades detectadas en las

probetas en la etapa anterior, son relevantes y se rechazan o son irrelevantes y se aceptan. Por último, se evaluarán los defectos y se realizará el análisis del comportamiento de los defectos encontrados en las probetas.

1. INTRODUCCIÓN

Los Ensayos No Destructivos (END) o en inglés Nondestructive Testing (NDT) se definen como aquellos métodos de ensayo utilizados para la detección, análisis y evaluación de discontinuidades, defectos y caracterización de los materiales, con el propósito de garantizar su operación segura y confiable, sin alterar su integridad y sus propiedades. Los Ensayos No Destructivos (END), son herramientas fundamentales y esenciales para el control de calidad de materiales de ingeniería, procesos de manufactura, confiabilidad de productos en servicio y mantenimiento de sistemas, entre otros, en donde la falla prematura de alguno de estos, puede resultar muy costosa.

Las técnicas de Ensayos No Destructivos (END) que se aplicarán en el presente estudio, se describen a continuación:

- Ensayo con líquidos penetrantes: consiste en aplicar un líquido coloreado o fluorescente a la superficie a examinar, el cual penetra en las discontinuidades del material debido al fenómeno de capilaridad. Se distingue porque es prácticamente independiente de la forma o geometría de la pieza a examinar, requiere un equipamiento mínimo y permite gran sensibilidad en la detección de fisuras superficiales, defectos abiertos a la superficie (grietas, poros, erosiones, etcétera.); en todo tipo de materiales metálicos, no metálicos y materiales que no sean porosos ni presenten escamado o rugosidad excesiva.
- Ensayo con partículas magnéticas: se basa en la detección de un campo de fuga o fuga de flujo, el cual es producto de la saturación de un campo

magnético que se aplica al material examinado. Es un método aplicable solo a materiales ferromagnéticos y el medio de detección está constituido por partículas magnetizables de alta permeabilidad y baja retentividad, finamente divididas para su mayor movilidad. Estas partículas son retenidas y acumuladas en las discontinuidades superficiales y subsuperficiales que presenta el material ferromagnético examinado, logrando así la detección de los defectos.

- Ensayo ultrasónico: se basa en los fenómenos que se producen en la propagación de vibraciones mecánicas con frecuencias entre 0,25 y 25 MHz. El intervalo de frecuencias se inscribe muy por encima de lo que constituye el sonido y, al no ser detectadas por el oído humano, se las designa como ultrasonido. Una de las aplicaciones más utilizada de este método, es la de determinar la integridad estructural de los materiales, basándose en la reflexión del ultrasonido en la interfase producida por defectos o discontinuidades que se encuentran en estos.
- Ensayo radiográfico: se basa en el uso de la radiación ionizante de alta energía que atraviesa un material sólido. Parte de esta energía es atenuada por las diferencias de espesor, densidad o presencia de discontinuidades por lo que las variaciones de atenuación o absorción son detectadas y registradas en una película radiográfica o pantalla fluorescente, obteniéndose una imagen de la estructura interna de una pieza o componente.

Este método se aplica en el examen volumétrico para la detección de discontinuidades internas que pueden estar constituidas por solución del continuo, por variaciones en densidad o por segregaciones de distintos elementos. Este método también permite detectar variaciones de espesor

y posición de piezas internas o insertos en componentes sin acceso interior.

El presente estudio tiene como propósitos; contribuir con el desarrollo teórico y práctico en el uso de las técnicas de Ensayos No Destructivos (END), en condiciones de normas de la Sociedad Americana de Soldadura (AWS, por sus siglas en inglés), que se estudian en el curso de Técnicas de Ensayos No Destructivos de la Maestría de Ingeniería en Mantenimiento; y ayudar a que el egresado adquiera los conocimientos básicos en detección y evaluación de discontinuidades y defectos en uniones soldadas en tubos y chapas de acero al carbono, así como analizar el comportamiento de defectos en las mismas.

El estudio inicia con el diseño y elaboración de probetas; en las cuales se inducirán los defectos de porosidad, falta de penetración y socavación; utilizando tubos y chapas de acero al carbono ASTM A36 de diferentes dimensiones y uniones de tipo T, y variantes de uniones a tope soldadas con soldadura de arco eléctrico protegido (SMAW).

Seguido, sobre las probetas se aplicarán los métodos de ensayo de Líquidos Penetrantes (PT), Partículas Magnéticas (MT), Ultrasonido (UT) y Radiografía (RT) en condiciones de la Norma AWS D1.1, con la finalidad de identificar discontinuidades en las probetas. Luego utilizando los criterios de aceptación y rechazo establecidos por la Norma AWS D1.1, se determinará si las discontinuidades detectadas en las probetas en la etapa anterior, son relevantes y se rechazan o son irrelevantes y se aceptan. Por último, se evaluarán los defectos y se realizará el análisis del comportamiento de los defectos encontrados en las probetas.

Estos ensayos serán supervisados y avalados por la empresa Servicios Industriales Especializados (SIE Ltda.), la cual se especializa en control de calidad por técnicas END y hace uso de las normas, códigos y especificaciones que se han propuesto para realizar esta investigación.

2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La falta de conocimiento teórico y práctico en la aplicación, en condiciones de una norma o código técnico, de los métodos END, ha ocasionado que no se cuente con una adecuada base para el análisis y evaluación de uniones soldadas en tubos y chapas; repercutiendo de forma directa en la toma de decisiones en cuanto al criterio de aceptación/rechazo de las discontinuidades detectadas por la aplicación de los métodos END, así como en el estado final de las uniones soldadas ya que podrán provocarse anomalías que se traducen en variaciones de las propiedades mecánicas y resistencia mecánica exigida.

Si bien, el análisis y evaluación de una unión soldada, también posee como base la experiencia del inspector, la confiabilidad de los resultados se garantiza al contar con el respaldo y criterio de una norma o código técnico, logrando con ello que la decisión de aceptación/rechazo de una discontinuidad detectada, sea la más adecuada y precisa; de lo contrario, todo quedará sujeto a un análisis y evaluación empírica y representará una deficiencia por alcanzar ahorros económicos significativos en aspectos como: control de calidad, diseño, proceso o mantenimiento, según sea el caso.

Con el propósito de que los resultados obtenidos puedan replicarse en uniones soldadas de tubos y chapas en la industria, el presente estudio está orientado a encontrar respuesta a las siguientes interrogantes:

- ¿Cómo se debe diseñar, elaborar e inducir defectos de porosidad, falta de penetración y socavación en probetas soldadas de tubos y chapas de acero al carbono ASTM A36?

- ¿Cómo deben aplicarse los métodos de líquidos penetrantes, partículas magnéticas, radiografía y ultrasonido en uniones soldadas en probetas de tubos y chapas de acero al carbono ASTM A36 en condiciones de la Norma AWS D1.1?
- ¿Según la Norma AWS D1.1, cuál es el criterio que debe aplicarse para aceptar/rechazar las discontinuidades y defectos detectados en las uniones soldadas en probetas de tubos y chapas de acero al carbono ASTM A36?
- ¿Cómo debe realizarse un análisis y evaluación del comportamiento de defectos de porosidad, falta de penetración y socavación en uniones soldadas en probetas de tubos y chapas de acero al carbono ASTM A36 mediante métodos END?

3. OBJETIVOS

General

Elaborar a través de métodos de Ensayos No Destructivos (END) y en condiciones de Normas AWS, un análisis y evaluación del comportamiento de los defectos inducidos de porosidad, falta de penetración y socavación en probetas soldadas de acero al carbono ASTM A36.

Específicos

1. Diseñar, elaborar e inducir defectos de porosidad, falta de penetración y socavación en probetas soldadas de tubos y chapas de acero al carbono ASTM A36.
2. Aplicar los métodos de líquido penetrantes, partículas magnéticas, radiografía y ultrasonido en uniones soldadas en probetas de tubos y chapas de acero al carbono ASTM A36 en condiciones de la Norma AWS D1.1.
3. Aplicar el criterio de la Norma AWS D1.1 para aceptar/rechazar las discontinuidades y defectos detectados en las uniones soldadas en probetas de tubos y chapas de acero al carbono ASTM A36.
4. Analizar y evaluar el comportamiento de defectos de porosidad, falta de penetración y socavación en uniones soldadas en probetas de tubos y chapas de acero al carbono ASTM A36 a través de métodos END.

4. JUSTIFICACIÓN

En Guatemala, el uso de uniones soldadas constituye un elemento principal en la industria de fabricación de piezas metálicas, construcción de estructuras, ensamble de partes y montajes de plantas industriales.

Por consiguiente, la investigación se realiza debido a la falta de aplicación del conocimiento teórico y práctico en el uso de los métodos de Ensayos No Destructivos (END) en condiciones de normas o códigos, que permitan una adecuada base para el análisis, evaluación y posterior aseguramiento de la calidad de uniones soldadas en tubos y chapas de acero al carbono.

En tal sentido, la falta de aplicación de una norma o código para el análisis y evaluación, repercute de forma directa en la toma de decisiones en cuanto al criterio de aceptación/rechazo de las discontinuidades detectadas por la aplicación de los métodos END, así como en el estado final de las uniones soldadas en tubos y chapas de acero al carbono, ya que podrán provocarse anomalías que se traducen en variaciones de las propiedades mecánicas y resistencia mecánica exigida.

Realizar el presente estudio, representaría que en ingeniería, a nivel de Postgrado, los métodos END tendrían un amplio y adecuado desarrollo; obteniéndose de su aplicación, beneficios sobre conocimientos básicos de detección, análisis y evaluación de discontinuidades y defectos en uniones soldadas en tubos y chapas de acero al carbono; utilizando normas o códigos; así como efectividad al momento de buscar ahorros económicos significativos en el control de calidad, el diseño, proceso, en el costo de fabricación de

materiales (los cuales serían rechazados en la inspección final por defectos) o en el mantenimiento según sea el caso, en uniones soldadas en tubos y chapas de acero al carbono.

5. ALCANCES

Los alcances de la presente investigación están dirigidos a:

- Estudiantes de la maestría de Ingeniería en Mantenimiento.
- Industria de fabricación de piezas metálicas, construcción de estructuras, ensamble de partes y montajes de plantas industriales.
- Empresas donde intervienen o desarrollan procesos metalúrgicos.
- Estudiantes de pregrado de las distintas áreas de la ingeniería.
- Proyectos de investigación tanto de la Escuela de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, como de las Escuelas de la Facultad de Ingeniería de las diferentes universidades del país.
- Cualquier persona interesada en aplicar los métodos de Ensayos No Destructivos (END) en condiciones de Normas AWS, en uniones soldadas en tubos y chapas de acero al carbono.

6. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

6.1. Uso de los Ensayos No Destructivos (END)

Los Ensayos No Destructivos (END), constituyen una herramienta de fundamental importancia para la evaluación de estructuras, componentes y materiales, permitiendo detectar y corregir en forma temprana distintos tipos de defectos que, de permanecer en el componente bajo estudio, podrían derivar en fallas, a veces catastróficas, con el consiguiente perjuicio económico debido a la salida imprevista de servicio del componente, como también con el riesgo de ocasionar tanto pérdida de vidas humanas como daños al medio ambiente (Comisión Nacional de Energía Atómica [CNEA], s.f.).

En los últimos años, los Ensayos No Destructivos han llegado a ser una herramienta indispensable en la industria, siendo el medio primordial para determinar el nivel de calidad alcanzado por los diferentes productos (Ospina, Trujillo y Parra, 2011). Además la caracterización de materiales mediante el uso de END se encuentra en constante crecimiento y se aplica a temas como identificación de materiales y características microestructurales, que tienen influencia directa sobre la vida en servicio del objeto ensayado (CNEA, s.f.).

El panorama de los Ensayos No Destructivos y estructurales, está evolucionando constantemente y día con día a los métodos y aplicaciones clásicas se les van sumando otros nuevos en sintonía con los avances tecnológicos, por lo que cada vez se hace más necesario un mayor conocimiento específico de las distintas técnicas que estos involucran (CNEA, s.f.).

La aplicación de los END en la investigación y análisis de fallas, constituye una gran herramienta, ante todo para la caracterización de las mismas. Si bien estas técnicas no son capaces de indicar cuáles son las causales, ni de predecir su ocurrencia, contribuyen con gran precisión a su identificación (Aguilar y Soria, 2009).

En el campo de los END “nuestros jóvenes estudiosos tienen una gran oportunidad de completar su formación profesional y ejercer su vocación científica y técnica en una actividad de singular atractivo y de gran interés para el desarrollo industrial” (Ramírez et al., 1972, p. XXXI); de modo que hoy en día es necesario captar la atención y estimular el estudio de esta disciplina entre los estudiantes y profesionales procedentes de las más variadas especialidades.

6.2. Métodos de Ensayos No Destructivos (END)

Las técnicas de Ensayos No Destructivos de ahora en adelante denominados END, pueden clasificarse según sus fundamentos, aplicaciones o estado actual de desarrollo (Ramírez et al., 1972). A continuación se describe su clasificación bajo el estado actual de desarrollo.

6.2.1. Ensayo de líquidos penetrantes

El método de Ensayo No Destructivo por líquidos penetrantes, es empleado para detectar e indicar discontinuidades que afloran a la superficie de los materiales examinados, tales como fisuras, juntas, pliegues, cierres en frío, laminaciones, faltas de fusión, entre otros (Ramírez et al., 1972).

Se pueden utilizar efectivamente en todo tipo de materiales metálicos y no metálicos, ferrosos y no ferrosos, que no sean porosos ni presenten escamado

o rugosidad excesiva, también se utilizan en materiales no metálicos como ciertos plásticos no porosos y vidrios; y es aplicable en proceso, al final del proceso o en mantenimiento (American Society for Testing and Materials [ASTM], 2002).

Este método se distingue porque es prácticamente independiente de la forma o geometría de la pieza a examinar, requiere un equipamiento mínimo y permite obtener una gran sensibilidad en la detección de fisuras superficiales, superior a la que suele obtenerse con otros métodos, como radiografía industrial o ultrasonido.

6.2.1.1. Fundamentos y principios físicos del método

El fundamento del método reside en la capacidad de ciertos líquidos para penetrar (por capilaridad, no por gravedad), y ser retenidos en discontinuidades estrechas abiertas a la superficie como fisuras y poros. No existe una característica física que, por sí sola, determine terminantemente la bondad de un líquido penetrante (Echevarría, 2003).

Las principales propiedades físicas a considerar son: capilaridad, mojabilidad o ángulo de contacto entre líquido y sólido, tensión superficial, viscosidad (de estas últimas tres propiedades depende la capacidad de un líquido para penetrar), densidad, volatilidad y punto de inflamación (Echevarría, 2003).

6.2.1.2. Ventajas y limitaciones que presenta el método

Las ventajas que presenta este método son:

- Inspeccionar áreas y volúmenes grandes de manera rápida y a bajo costo.
- Configuración de las piezas a inspeccionar no representa un problema para la inspección.
- Son relativamente fáciles de emplear.
- Son económicos.
- Son razonablemente rápidos en cuanto a la aplicación, además de que el equipo puede ser portátil.
- Se requiere de pocas horas de capacitación de los inspectores.
- Se pueden detectar discontinuidades superficiales muy pequeñas. Es un método muy sensible para detectar defectos superficiales.
- Puede utilizarse en una amplia variedad de materiales: metálicos y no metálicos, magnéticos y no magnéticos, conductivos y no conductivos, cerámica, vidrio y algunos materiales orgánicos.

Las limitaciones que presenta este método son:

- Sólo son aplicables a defectos superficiales y a materiales no porosos.
- Se requiere de una buena limpieza previa a la inspección.
- El inspector deberá tener acceso directo a la superficie a revisar.
- Se requiere de una limpieza al finalizar las pruebas.
- El acabado de la superficie puede afectar la inspección.
- Algunos materiales no metálicos pueden ser atacados como el hule y el plástico. También pueden teñir los materiales porosos o pintados.

- Es difícil quitarlo de roscas, ranuras, huecos escondidos y superficies ásperas.
- No se proporciona un registro permanente.
- Los inspectores deben tener amplia experiencia en el trabajo.
- Una selección incorrecta de la combinación de revelador y penetrante puede ocasionar falta de sensibilidad en el método.

6.2.2. Ensayo de partículas magnéticas

El ensayo por partículas magnéticas permite detectar discontinuidades e impurezas superficiales en materiales ferromagnéticos. También es posible, con ciertas limitaciones, la detección de discontinuidades e inclusiones no metálicas subsuperficiales (Ramírez et al., 1972).

Es un método aplicable solamente a materiales ferromagnéticos que utiliza principalmente corriente eléctrica para crear un flujo magnético en una pieza, y al aplicar una cantidad de partículas ferromagnéticas finamente divididas sobre la superficie, estas producen una indicación y detectan una distorsión o discontinuidad (campo de fuga) de las líneas de fuerza magnética. Esta acumulación de partículas ferromagnéticas forma un contorno de la discontinuidad y generalmente indican su ubicación, tamaño, forma y extensión (American Society for Metals [ASM], 1989).

La detección de una discontinuidad dependerá de muchas variables, tales como la permeabilidad del material; tipo, localización y orientación de la discontinuidad; cantidad y tipo de corriente magnetizante empleada, tipo de partículas, etc.

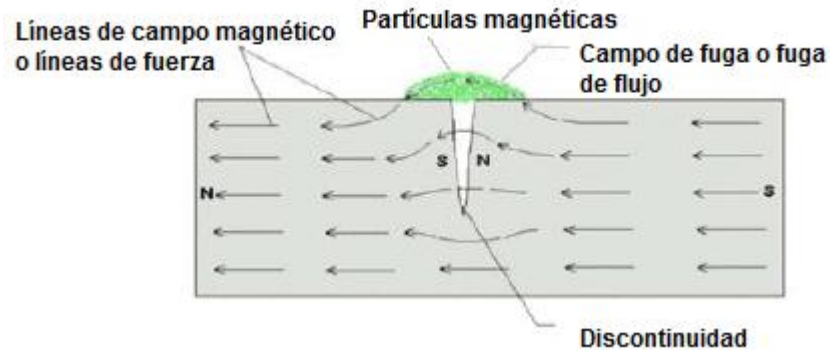
6.2.2.1. Fundamentos y principios físicos del método

El principio físico, en el que se fundamenta este método, consiste en la magnetización o inducción de un campo magnético en un material ferromagnético.

Líneas de fuerza, presentes por el campo magnético, forman distorsiones si el material presenta una zona en la que existen discontinuidades perpendiculares a las líneas del campo magnetizable, por lo que éstas se deforman o se producen polos, a esta condición se le denomina “campo de fuga o fuga de flujo”, figura 1. Estas distorsiones o polos atraen a las partículas ferromagnéticas que son aplicadas en forma de polvo o suspensión en la superficie a examinar, y por acumulación producen las indicaciones que se observan visualmente de manera directa o empleando luz ultravioleta (Ruiz, 2010).

Si bien hay variaciones en el método de partículas magnéticas, todas estas variaciones dependen de este principio, en que las partículas ferromagnéticas serán retenidas en las ubicaciones de la fuga de flujo magnético (ASTM, 2001).

Figura 1. **Fundamento del método de partículas magnéticas**



Fuente: elaboración propia, con programa SnagIt versión 8.2.3.

6.2.2.2. Ventajas y limitaciones que presenta el método

Las ventajas que presenta este método son:

- Detecta discontinuidades superficiales y subsuperficiales.
- Las indicaciones son producidas directamente en la superficie de la pieza, indicando la longitud, localización, tamaño y forma de las discontinuidades.
- Rápido y simple.
- La inspección es económica.
- Equipo relativamente simple, provisto de controles para ajustar la corriente.
- Portabilidad y adaptabilidad a muestras pequeñas o grandes.
- No requiere extremar la limpieza de la superficie a inspeccionar.
- El equipo no requiere de un mantenimiento extensivo.

- Mejor examen de las discontinuidades que se encuentran llenas de carbón, escorias u otros contaminantes y que no pueden ser detectadas con otros métodos.
- Es el mejor de los métodos para fisuras finas superficiales poco profundas.

Las limitaciones que presenta este método son:

- Es aplicable solamente a materiales ferromagnéticos. En soldadura, el metal depositado debe ser también ferromagnético.
- Su uso requiere de una fuente de poder.
- La orientación del campo y la intensidad es crítica para la detección.
- Se debe magnetizar el elemento examinado.
- Pueden existir quemaduras.
- No detecta defectos internos, solo discontinuidades que se encuentren en profundidades mayores de 1/4".
- La rugosidad superficial puede distorsionar las líneas de flujo.
- Generalmente después de la inspección se requiere de una desmagnetización.
- Aunque las indicaciones formadas con partículas magnéticas son fácilmente observables, la experiencia del operador es necesaria para la interpretación de las indicaciones.
- Para evaluar un componente de gran tamaño, podrá ser necesario utilizar gran cantidad de corriente.

6.2.3. Ensayo de radiografía industrial

Este método se utiliza para determinar las características de un componente o sistema que presenta una diferencia en el espesor o densidad en

comparación con el material circundante. En general, la radiografía puede detectar sólo aquellas características que tienen un espesor apreciable en una dirección paralela al haz de radiación. Esto significa que la capacidad del proceso para detectar discontinuidades planas, tales como grietas, depende de la orientación adecuada de la pieza de prueba durante la inspección. Discontinuidades tales como; agujeros e inclusiones pueden detectarse mientras no sean demasiado pequeñas en relación al espesor de la sección (ASM, 1989).

Aunque no se limita a la detección de defectos internos, el método de radiografía se aplica satisfactoriamente en el examen volumétrico, para la detección de discontinuidades internas que pueden estar constituidas por solución del continuo, por variaciones en densidad o por segregaciones de distintos elementos. Permite además detectar variaciones de espesor y posición de piezas internas o insertos en componentes sin acceso interior.

6.2.3.1. Fundamentos y principios físicos del método

El fundamento de este método consiste en la absorción diferencial de radiación penetrante -ya sea radiación electromagnética de longitud de onda muy corta o radiación de partículas- por la pieza que se inspecciona. Debido a las diferencias en la densidad y variaciones en el espesor de la pieza o las diferencias en las características de absorción causada por variaciones en la composición, diferentes partes de la pieza o elemento inspeccionado, absorben diferentes cantidades de radiación penetrante. Estas variaciones, en la absorción de la radiación penetrante, pueden monitorizarse mediante la detección de la radiación no absorbida que pasa a través de la pieza de prueba (ASM, 1989).

Las variaciones de atenuación o absorción resultantes, son detectadas y registradas en una película radiográfica o pantalla fluorescente, obteniéndose una imagen de la estructura interna de una pieza o componente. Una radiografía es entonces la proyección plana de un cuerpo volumétrico, por lo tanto para cualquier evaluación de tamaño y forma, se debe tener en cuenta el ángulo, plano y distancia de proyección.

6.2.3.2. Ventajas y limitaciones que presenta el método

Las ventajas que presenta este método son:

- Es más fácil poder identificar el tipo de discontinuidad que se detecta.
- Puede usarse en materiales metálicos y no metálicos, ferrosos y no ferrosos.
- Proporciona un registro permanente de la condición interna de un material.
- Revela discontinuidades estructurales y errores de ensamble.
- Registro permanente de la imagen.
- La dirección del haz no es afectado por la geometría.
- No se necesita calibración en el lugar de trabajo.

Las limitaciones que presenta este método son:

- Difícil de aplicar en piezas de geometría compleja o zonas poco accesibles.
- La pieza o zona debe tener acceso en dos lados opuestos.
- No detecta discontinuidades de tipo laminar.

- Se requiere observar medidas de seguridad para la protección contra la radiación.
- Peligro de irradiación.
- No indica la profundidad del defecto.
- La orientación de las discontinuidades planares es importante.
- Profundidad de penetración limitada.

6.2.4. Ensayo de ultrasonido

Es un método no destructivo en el cual haces de ondas de alta frecuencia de sonido, se introducen en piezas o elementos para la detección de defectos superficiales y subsuperficiales. Las ondas sonoras viajan a través del material con alguna pérdida intrínseca de energía (atenuación) y se reflejan en las interfaces. El haz reflejado se muestra y luego se analiza para definir la presencia y localización de discontinuidades o defectos (ASM, 1989).

Grietas, laminaciones, rechupes, ráfagas, copos, poros, faltas de adherencia, y otras discontinuidades que producen interfaces reflectantes pueden ser fácilmente detectadas. Inclusiones y otras heterogeneidades también pueden ser detectadas al causar reflexión parcial o dispersión de las ondas ultrasónicas o mediante la producción de algún otro efecto detectable de las ondas ultrasónicas (ASM, 1989).

6.2.4.1. Fundamentos y principios físicos del método

El ensayo ultrasónico de los materiales, está basado en los fenómenos que se producen en la propagación de vibraciones mecánicas en un intervalo de frecuencias. Este intervalo de frecuencias se inscribe muy por encima de lo que constituye el sonido y, al no ser detectadas por el oído humano, se las designa como ultrasonido. Las frecuencias utilizadas para el control de heterogeneidades en los materiales, comienzan en la proximidad de la zona audible y se extienden hasta los 25 Mega Hertz. En el caso de los materiales metálicos las frecuencias utilizables varían entre 0,2 Mega Hertz y 25 Mega Hertz (Ramírez et al., 1972).

Los principales fenómenos físicos y principios acústicos que intervienen en los ensayos de ultrasonido, son (Del Valle, 2009):

- Oscilación o ciclos: se define como el cambio periódico de la condición o el comportamiento de un cuerpo.
- Amplitud: es el desplazamiento máximo de una partícula desde su posición cero.
- Período: es el tiempo necesario para llevar a cabo una oscilación.
- Frecuencia: se define como el número de veces que ocurre un evento repetitivo (ciclo) por unidad de tiempo. Es la inversa del período.
- Longitud de onda (λ): es la distancia ocupada por una onda completa y es igual a la distancia a través de la cual se mueve la onda por período de ciclo. Amplitud.
- Velocidad de propagación o velocidad acústica: es la velocidad de transmisión de la energía sonora a través de un medio.

- Impedancia acústica: es la resistencia de un material a las vibraciones de las ondas ultrasónicas. Es el producto de la velocidad máxima de vibración por la densidad del material.

Asimismo, las ondas ultrasónicas se pueden clasificar de acuerdo a su desplazamiento como (Del Valle, 2009):

- Ondas longitudinales: el desplazamiento de las partículas es paralelo a la propagación del ultrasonido.
- Ondas transversales: los desplazamientos de las partículas son en forma perpendicular a la dirección del haz ultrasónico.
- Ondas superficiales: son aquellas que se desplazan sobre la superficie del material y penetran a una profundidad máxima de una longitud de onda, también son conocidas como ondas de Rayleigh.

6.2.4.2. Ventajas y limitaciones que presenta el método

Las ventajas que presenta este método son:

- Un gran poder de penetración, lo que permite la inspección de grandes espesores.
- Gran sensibilidad, lo que permite la detección de discontinuidades extremadamente pequeñas.
- Su aplicación no afecta en operaciones posteriores.
- Los equipos actuales proporcionan la capacidad de almacenar información en memoria, la cual puede ser procesada digitalmente por una computadora para caracterizar la información almacenada.
- La prueba se efectúa rápidamente obteniendo resultados inmediatos.

- Se tiene mayor exactitud al determinar la posición de las discontinuidades internas; estimando sus dimensiones, orientación y naturaleza.
- Buena resolución que permite diferenciar dos discontinuidades próximas entre sí.
- Solo requiere acceso por un lado del objeto a inspeccionar.
- No requiere de condiciones especiales de seguridad.

Las limitaciones que presenta este método son:

- La operación del equipo y la interpretación de los resultados requiere técnicos experimentados.
- Es necesario el uso de un material acoplante.
- Son necesarios patrones de referencia, para la calibración del equipo y caracterización de discontinuidades.
- Las superficies rugosas causan problemas
- Interpretaciones dificultosas.
- Baja velocidad de inspección cuando se emplean métodos manuales, si se tienen que revisar cantidades grandes de productos.
- Dificultad para inspeccionar piezas con geometría compleja, espesores muy delgados o de configuración irregular.
- Alto costo del equipo.

7. CONTENIDO

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

OBJETIVOS

INTRODUCCIÓN

DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

1. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

1.1. Uso de los Ensayos No Destructivos (END)

1.2. Métodos de Ensayos No Destructivos (END)

1.2.1. Ensayo de líquidos penetrantes

1.2.1.1. Fundamentos y principios físicos del método

1.2.1.2. Ventajas y limitaciones que presenta el método

1.2.2. Ensayo de partículas magnéticas

1.2.2.1. Fundamentos y principios físicos del método

1.2.2.2. Ventajas y limitaciones que presenta el método

1.2.3. Ensayo de radiografía industrial

1.2.3.1. Fundamentos y principios físicos del método

- 1.2.3.2. Ventajas y limitaciones que presenta el método
 - 1.2.4. Ensayo de ultrasonido
 - 1.2.4.1. Fundamentos y principios físicos del método
 - 1.2.4.2. Ventajas y limitaciones que presenta el método
- 2. DISEÑO, ELABORACIÓN E INDUCCIÓN DE DEFECTOS EN PROBETAS
 - 2.1. Principios básicos del diseño de uniones soldadas
 - 2.1.1. Conceptos básicos de soldadura
 - 2.1.2. Diseño de soldadura
 - 2.1.2.1. Tipos básicos de uniones
 - 2.1.2.2. Selección del tipo de unión
 - 2.1.2.3. Simbología de soldadura
 - 2.1.3. Defectología en soldadura de arco protegido (SMAW)
 - 2.2. Diseño, elaboración e inducción de defectos de porosidad, falta de penetración y socavación en las uniones soldadas en probetas de chapas de acero al carbono ASTM A36
 - 2.3. Diseño, elaboración e inducción de defectos de porosidad, falta de penetración y socavación en las uniones soldadas en probetas de tubos de acero al carbono ASTM A36
- 3. INSPECCIÓN DE DISCONTINUIDADES EN PROBETAS POR MÉTODOS END EN CONDICIONES DE NORMA AWS D1.1
 - 3.1. Métodos de inspección superficial
 - 3.1.1. Método de líquidos penetrantes
 - 3.1.2. Método de partículas magnéticas

- 3.2. Métodos de inspección volumétrica
 - 3.2.1. Método de radiografía industrial
 - 3.2.2. Método de ultrasonido

- 4. ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE DEFECTOS INDUCIDOS EN PROBETAS
 - 4.1. Aplicación del criterio de aceptación/rechazo de la Norma AWS D1.1 para el análisis de discontinuidades
 - 4.1.1. Aplicación del criterio para el método de líquidos penetrantes
 - 4.1.2. Aplicación del criterio para el método de partículas magnéticas
 - 4.1.3. Aplicación del criterio para el método de radiografía industrial
 - 4.1.4. Aplicación del criterio para el método de ultrasonido
 - 4.2. Análisis y evaluación del comportamiento de los defectos inducidos de porosidad, falta de penetración y socavación encontrados en las probetas soldadas
 - 4.3. Presentación de resultados finales

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

8. METODOLOGÍA Y TÉCNICAS CORRESPONDIENTES

- Diseño y tipo de la investigación

La investigación que se realizará es descriptiva y de tipo cualitativa, las variables en estudio serán las siguientes:

- X_1 = probeta: chapa, tubo
 - X_2 = unión soldada: tipo T, variantes de uniones a tope
 - X_3 = comportamiento de defecto: porosidad, falta de penetración, socavación
- Unidad de análisis
 - Uniones soldadas en probetas de tubos y chapas de acero al carbono ASTM A36
 - Tipo de muestra
 - No probabilística
 - Secuencia de las fases
 - Diseño, elaboración e inducción de defectos de porosidad, falta de penetración y socavación en 4 probetas distintas de acero al carbono ASTM A36 con las siguientes características:

- Dos probetas de tubos de conducción de acero al carbono ASTM A36. Una probeta con soldadura a tope biselada a 60 grados y otra probeta con medio bisel a 30 grados, ambas probetas con dimensiones de $\frac{1}{4}$ pulgadas de espesor y entre 2 a 3 pulgadas de diámetro.
- Dos probetas de chapas de acero al carbono ASTM A36. Una probeta con unión en T y soldadura de filete, y otra con unión a tope biselada a 60 grados o en V, ambas probetas con dimensiones de $\frac{1}{2}$ pulgada de espesor y de 20 x 20 centímetros.

En todas las probetas se utilizará soldadura de arco protegido (SMAW) y en distintas probetas se aplicarán los electrodos E6010, E6013 y E7018.

- Aplicación de los métodos de líquidos penetrantes, partículas magnéticas, radiografía y ultrasonido en las uniones soldadas en probetas de tubos y chapas de acero al carbono ASTM A36 en condiciones de la Norma AWS D1.1.
- Aplicación del criterio de aceptación/rechazo establecido por la Norma AWS D1.1 para determinar si las discontinuidades y defectos detectados en las uniones soldadas en probetas de tubos y chapas de acero al carbono ASTM A36 son relevantes y se rechazan o son irrelevantes y se aceptan.
- Evaluación y análisis del comportamiento de los defectos (establecidos en la fase tres) de porosidad, falta de penetración y

socavación en las uniones soldadas en probetas de tubos y chapas de acero al carbono ASTM A36 por métodos END ya aplicados en la fase dos.

- Presentación de los resultados finales obtenidos de cada uno de los métodos END aplicados, formulación de conclusiones y recomendaciones.

9. RECURSOS NECESARIOS

- Humanos

Dentro del recurso humano que se necesita para desarrollar el presente estudio, están los siguientes:

- 1 asesor de tesis
- 1 soldador calificado

- Materiales e insumos

Los materiales e insumos necesarios para la elaboración de las probetas, donde se aplicaran los métodos de Ensayos No Destructivos, son los siguientes:

- ½ chapa de acero al carbono ASTM A36, de ½" de espesor.
- ½ tubo de conducción de acero al carbono ASTM A36, de ¼" de espesor y entre 2" a 3" de diámetro.
- ½ libra de electrodo E 6010
- ½ libra de electrodo E 6013
- ½ libra de electrodo E 7018

- Ensayos de inspección en probetas de tubos y chapas

Los ensayos necesarios para la inspección de las probetas de tubos y chapas, realizados por la empresa SIE Ltda., se describen a continuación:

- Ensayo de líquidos penetrantes
 - Ensayo de partículas magnéticas
 - Ensayo de radiografía
 - Ensayo de ultrasonido
-
- Financieros

Los recursos financieros que se utilizarán para llevar a cabo la investigación, ascienden a un total estimado de Q. 4 719,25; los cuales se detallan a continuación:

Tabla I. Recursos necesarios

RECURSOS FINANCIEROS	CANTIDAD	COSTO POR UNIDAD	COSTO TOTAL
Costo recursos humanos			
Asesor	-	-	Q 2 500,00
Soldador*	-	-	Q 200,00
Imprevistos RRHH (5%)	-	-	Q 135,00
Total RRHH			Q 2 835,00
Costo materiales e insumos			
Chapa de acero al carbono ASTM A36	½	Q 250,00	Q 125,00
Tubo de conducción de acero al carbono ASTM A36	½	Q 150,00	Q 75,00
Electrodo E 6010	½ lb.	Q 65,00	Q 32,50
Electrodo E 6013	½ lb.	Q 60,00	Q 30,00
Electrodo E 7018	½ lb.	Q 64,00	Q 32,00
Imprevistos Mat. e insumos (5%)	-	-	Q 14,75
Total materiales e insumos			Q 309,25
Costo ensayos de inspección en probetas**			
Ensayo de líquidos penetrantes	2	Q 125,00	Q 250,00
Ensayo de partículas magnéticas	2	Q 125,00	Q 250,00
Ensayo de radiografía	2	Q 250,00	Q 500,00
Ensayo de ultrasonido	2	Q 250,00	Q 500,00
Imprevistos por inspección (5%)	-	-	Q 75,00
Total inspección de probetas			Q 1 575,00
COSTO TOTAL			Q 4 719,25
*El costo es para un día.			
**Las inspecciones serán realizadas por la empresa SIE Ltda. El costo de la inspección está relacionado directamente con la pieza o elemento que se evalúa.			

Fuente: elaboración propia, con programa MS Word 2010.

10. BIBLIOGRAFÍA

1. AGUILAR RIVAS, R. A. y SORIA LEMUS, E. H. *Inspección y reparación de fallas de un horno de clinker en la Industria cementera*. Presentado al Centro de Investigaciones de Ingeniería de la FIUSAC. Guatemala: Universitaria, 2009. 6 p.
2. American Society for Metals International. *ASM Handbook Volume 17: Nondestructive Evaluation and Quality Control*. 9a. ed. USA: ASM International, 1989. 1608 p. ISBN 0-87170-007-7 (v. 1)
3. ASTM International. *Guide for Magnetic Particle Examination*. Designation: E 709. USA: ASTM International, 2001.
4. ASTM International. *Standard Test Method for Liquid Penetrant Examination*. Designation: E 165. USA: ASTM International, 2002.
5. CNEA. *Aplicaciones tradicionales* [en línea]. ENDE, República de Argentina [ref. de septiembre de 2012]. Disponible en Web: <<http://www.cnea.gov.ar/cac/ende/tradicionales.asp>>
6. DEL VALLE ALBUREZ, M. E. *Aumento de confiabilidad y disponibilidad de motores de combustión interna en plantas de generación de energía eléctrica mediante la detección de grietas por ensayos no destructivos (ultrasonido) en válvulas de admisión y escape*. Trabajo de graduación de Maestría en Ciencias en Ing. de Mantenimiento. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala: 2009. 117 p.

7. ECHEVARRÍA, R. *Líquidos Penetrantes* [en línea]. Universidad Nacional del Comahue, Argentina 2003 [ref. de diciembre de 2012]. Disponible en Web: <<http://www.sistendca.com/DOCUMENTOS/LP.pdf>>
8. OSPINA LÓPEZ, R., TRUJILLO, C. H., y PARRA, H. “Aplicación y selección de ensayos no destructivos para la evaluación de uniones soldadas”. *Scientia et Technica* [en línea]. 2011, vol. 1, núm. 48, p. 196-201. [ref. de febrero de 2012] Disponible en Web: <<http://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/1283/855>>. ISSN 0122-1701
9. RAMÍREZ GÓMEZ, F., et al. *Introducción a los Métodos de Ensayos No Destructivos de Control de la Calidad de los Materiales*. 2a. ed. Madrid: INTA, 1972. 766 p. ISBN 84-500-2237-1
10. RUIZ ARCHILA, R. R. *Análisis y comparación de los métodos de inspección por partículas magnéticas y por líquidos penetrantes para la detección de defectos en materiales ferromagnéticos*. Trabajo de graduación de Ing. Eléctrica. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala: 2010. 101 p.