

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **ESCUELA DE FORMACIÓN DE TECNÓLOGOS**

### **ESTABLECIMIENTO DE UN PROCEDIMIENTO PARA INSPECCIÓN DE SOLDADURAS ALUMINOTÉRMICAS DE CARRILES DEL METRO DE QUITO POR ULTRASONIDO DE ACUERDO CON LA NORMA NAV 3-0-5.1.**

#### **TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE TECNÓLOGO EN ELECTROMECAÁNICA**

**OSCAR JAVIER DELGADO CUMBAL**

oscar.delgado@epn.edu.ec

**DIRECTOR: ING. OSCAR SANTIAGO ORTIZ AVILA**

oscar.ortiz02@epn.edu.ec

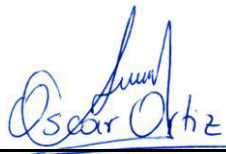
**CODIRECTOR: ING. WILSON LEOPOLDO MORÁN FLORES. MSc.**

wilson.moran@epn.edu.ec

**Quito, enero 2022**

# CERTIFICACIÓN

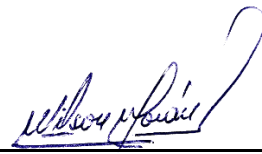
Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por el Sr: Oscar Javier Delgado Cumbal como requerimiento parcial a la obtención del título de TECNÓLOGO EN ELECTROMECAÁNICA, bajo nuestra supervisión.



---

**Ing. Oscar Santiago Ortiz  
Avila**

DIRECTOR DEL PROYECTO



---

**Ing. Wilson Leopoldo Morán  
Flores MSc.**

CODIRECTOR DEL PROYECTO

## DECLARACIÓN

Yo, Oscar Javier Delgado Cumbal con CI: 172524418 declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

Sin perjuicio de los derechos reconocidos en el primer párrafo del artículo 144 del Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación – COESC-, soy titular de la obra en mención y otorgo una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva de uso con fines académicos a la Escuela Politécnica Nacional.

Entrego toda la información técnica pertinente, en caso de que hubiese una explotación comercial de la obra por parte de la EPN, se negociará los porcentajes de los beneficios conforme lo establece la normativa nacional vigente.



---

**Oscar Delgado**

CI: 1722524418

Teléfono: 0989141388

Correo: oscar.delgado@epn.edu.ec

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar agradezco a Dios y a la Santísima Virgen María quienes día a día me han concedido la sabiduría y fortaleza para llegar a este punto de mi vida profesional.

A la Escuela Politécnica Nacional y a la Escuela de Formación de Tecnólogos por darme la oportunidad de estudiar y ser un profesional.

Quiero agradecer a mis maestros y compañeros de carrera y en especial a mi director y codirector de tesis Ing. Santiago Ortiz e Ing. Wilson Morán, MSc. respectivamente, quienes con su apoyo y conocimiento me guiaron a través de cada una de las etapas de este proyecto para alcanzar los resultados que buscaba.

También quiero agradecer a la empresa SINDESECUADOR S.A. por brindarme todos los recursos y herramientas que fueron necesarios para llevar a cabo el proceso de investigación. No hubiese podido arribar a estos resultados de no haber sido por su incondicional ayuda.

Por último, quiero agradecer a mi familia, por apoyarme aun cuando mis ánimos decaían. En especial, quiero hacer mención de mi esposa, que siempre estuvo ahí para darme palabras de apoyo y un abrazo reconfortante para renovar energías.

Bendiciones y muchas gracias a todos.

## **DEDICATORIA**

A Dios que cada día me concede salud y vida para alcanzar mis objetivos, a mis padres y familia en general que nunca perdieron la confianza en mí y siempre han sido ese apoyo incondicional en mi vida y de manera muy especial a mi bella esposa Carina Castro que desde que llegó a mi vida ha sido mi compañera fiel aquella que ha estado conmigo siempre en las buenas y en las malas dándome ese impulso, fuerza y ánimo que necesitaba para lograr este gran paso en mi carrera profesional. Te amo.

**Oscar Delgado**

## TABLA DE CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	Objetivo General.....	1
1.2	Objetivos Específicos .....	2
1.3	Fundamentos.....	2
2	METODOLOGÍA.....	5
2.1	Descripción de la metodología usada .....	5
3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	6
3.1	Selección del ensayo no destructivo adecuado .....	7
3.2	Procedimiento de Ultrasonido Industrial.....	8
3.3	Técnica de Ultrasonido para inspección en rieles .....	12
3.4	Calibración .....	15
3.5	Barrido para inspección de cabeza y alma, haz recto, 0°.....	19
3.6	Barrido para inspección de cabeza, haz angular, 70° .....	20
3.7	Barrido para inspección de pie, para defectos fisura, haz angular, 45°.....	21
3.8	Barrido para inspección de pie (flange), haz angular, 70°.....	22
3.9	Defectos límites aceptables .....	24
3.10	Limpieza posterior a la examinación.....	24
3.11	Seguridad y salud en el trabajo.....	24
3.12	Recursos utilizados.....	25
3.13	Cronograma ejecutado .....	25
3.14	Resultados obtenidos .....	26
4	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	29
4.1	Conclusiones.....	29
4.2	Recomendaciones.....	29
5	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	30
	ANEXOS.....	32

ANEXO 1: FORMULARIO PARA REPORTE DE INSPECCIÓN .....	33
ANEXO 2: CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES.....	35

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.1</b> Proceso de soldadura aluminotérmica. ....	3
<b>Figura 1.2</b> Tipos de rieles según norma Europea DIN 536.....	4
<b>Figura 3.1</b> Preparación y alineación de la junta a ser soldada mediante soldadura aluminotérmica. ....	9
<b>Figura 3.2</b> Colocación del molde en la junta a ser soldada mediante soldadura aluminotérmica. ....	10
<b>Figura 3.3</b> Precalentamiento de la junta. ....	10
<b>Figura 3.4</b> Encendido del crisol y recolección del material fundido desbordado. ....	11
<b>Figura 3.5</b> Acabado final mediante el uso de máquina en la junta soldada. ....	11
<b>Figura 3.6</b> Inspección de rieles mediante la técnica de ultrasonido industrial. ....	12
<b>Figura 3.7</b> Zapata y transductor para ultrasonido haz angular. ....	13
<b>Figura 3.8</b> Transductor para ultrasonido haz recto. ....	13
<b>Figura 3.9</b> Gel acoplante a utilizar en el ensayo.....	14
<b>Figura 3.10</b> Equipo de ultrasonido].....	14
<b>Figura 3.11</b> Posiciones para ajuste sobre bloque V1/IIW. ....	17
<b>Figura 3.12</b> Pieza carril para ajuste de sensibilidad.....	19
<b>Figura 3.13</b> Zona de inspección con la zapata haz recto 0°. ....	19
<b>Figura 3.14</b> Zona de inspección con la zapata haz angular 70 <sup>a</sup> .....	20
<b>Figura 3.15</b> Pieza carril para ajuste de sensibilidad, con defecto simulado en el pie..	22
<b>Figura 3.16</b> Zona de inspección con la zapata haz angular 70 <sup>a</sup> .....	23
<b>Figura 3.17</b> Equipo de protección personal adecuado.....	25



## ÍNDICE DE TABLAS

**Tabla 3.1** Resultados de inspección en la probeta patrón. ....27

**Tabla 3.2** Resultados de inspección de juntas soldadas en campo. ....27

## RESUMEN

El presente procedimiento se elaboró con el propósito de ser una guía, cuyo fin fue el de orientar y esclarecer lo relacionado con la inspección de unión de rieles en campo mediante soldadura aluminotérmica, se hizo uso del ultrasonido industrial como método de ensayo no destructivo, el cual, resultó un método idóneo de inspección para la detección de fallas internas en las juntas soldadas, debido a su fácil transportación en el sitio de inspección, su precisión, utilización de equipos no muy complejos y su bajo riesgo.

La construcción del primer sistema de transporte masivo subterráneo en el Ecuador, como lo es el Metro de Quito, trajo consigo técnicas de soldeo poco frecuentes en nuestro país, por tal razón dicho procedimiento recopiló información que se derivó de otros sistemas de transporte masivos subterráneos siendo en este caso sistemas ferroviarios europeos, que fueron de utilidad para el desarrollo del mismo y de esta forma ser un punto de partida para profesionales, técnicos o estudiantes que quieran incursionar en la inspección de uniones de rieles mediante soldadura aluminotérmica en sistemas ferroviarios utilizando el ultrasonido industrial como método de ensayo no destructivo.

En los primeros capítulos se describió lo mencionado en los párrafos anteriores como son la soldadura aluminotérmica y el ultrasonido industrial, además de la metodología usada, en el capítulo tercero se detalló todos los parámetros necesarios para la inspección de juntas soldadas en rieles mediante ultrasonido industrial así como los resultados obtenidos de las inspecciones en campo de las juntas soldadas.

**PALABRAS CLAVE:** Aluminotérmica, END, Ultrasonido, Rieles, Soldadura

## **ABSTRACT**

The present procedure was elaborated with purpose to be a guide, whose objective was to guide and clarify related with rails joint inspection on field through aluminothermic weld, it was done use of industrial ultrasound as non destructive testing, wich, it resulted a suitable method of inspection for detecting inside flaws on weld joints, because of its easy transportation on inspection site, its presition, utilization of no complex equipments and its low risk.

The construction of the first underground mass transit system in Ecuador, such as the Quito Metro, brought with it welding techniques that are infrequent in our country, for this reason said procedure collected information that was derived from other underground mass transportation systems being in this case, European railway systems, which were useful for its development and thus be a starting point for professionals, technicians or students who want to explore the inspection of rail joints by means of aluminothermic welding in railway systems using the ultrasound industrial as a non destructive testing method.

In the first chapters, what was mentioned in the previous paragraphs was described, such as aluminothermic welding and industrial ultrasound, in addition to the methodology used, in the third chapter all the parameters necessary for the inspection of welded joints in rails by means of industrial ultrasound were detailed as well. such as the results obtained from the field inspections of the welded joints.

**KEY WORDS:** Aluminothermic, NDT, Ultrasound, Rails, Weld

# 1 INTRODUCCIÓN

La inspección de estructuras soldadas, ya sean estructuras metálicas, tuberías, puentes o juntas ferroviarias en el caso de la presente investigación, se puede definir como una serie de actividades encaminadas a verificar un cierto grado de confiabilidad del sistema de soldadura. Incluso si se adoptan los medios adecuados en las diferentes etapas del proceso de producción, la importancia de esta inspección se centra en la calidad de los equipos y estructuras actualmente fabricados por soldadura, que a ciertas condiciones de fallo, afectarán seria y directamente la calidad de los equipos y estructuras actualmente fabricado mediante soldadura del mismo modo la seguridad ciudadana.

El transporte masivo moderno de hoy requiere un camino de rodadura suave y continua. Por ello, se recomienda soldar los carriles a tope para evitar golpear las juntas, evitando así posibles daños en las ruedas y otras partes mecánicas. La construcción del carril impide el uso de diversas tecnologías para conectarlos, de hecho se pueden utilizar dos métodos de soldadura, sobre suelo o elevada, soldadura por arco de electrodos o soldadura por termita, este último es el motivo de nuestra investigación.

Antes de aplicar la soldadura con termita, es importante verificar que el proceso de soldadura que se realiza en campo cuente con la documentación suficiente, esto ayudará en el control de calidad y proporcionará resultados precisos para conocer las verdaderas condiciones de las uniones soldadas.

La aplicación de ensayos no destructivos es una parte básica del aseguramiento de la calidad de las uniones soldadas. A su vez, se deben considerar otros aspectos, como la calibración de los equipos de inspección, la formulación de procedimientos de inspección, la determinación de estándares de aceptación y su aplicación. en campo, lo cual debe ser realizado en las mejores condiciones, que debe estar sujeto a estándares, normas y normas internacionales, así mismo, la evaluación e interpretación de los resultados de las inspecciones en campo determinarán el nivel de calidad y confiabilidad. El ultrasonido industrial se utilizó como método de inspección en las juntas de las vías del metro de Quito que se soldaron mediante el proceso de termita. [1]

## 1.1 Objetivo General

Establecer un procedimiento para inspección de soldadura aluminotérmica de carriles del Metro de Quito por ultrasonido de acuerdo con la norma NAV 3-0-5.1.

## 1.2 Objetivos Específicos

- Definir la aplicación del ultrasonido industrial para la inspección de soldadura aluminotérmica.
- Verificar la aplicación en campo del procedimiento de inspección no destructivo aprobado y calificado.
- Identificar los tipos de discontinuidades que se presentan en soldaduras aluminotérmicas de carriles.
- Establecer los criterios de aceptación de acuerdo con la norma NAV 3-0-5.1.
- Elaborar una guía para la aplicación en campo del procedimiento de inspección de soldadura.

## 1.3 Fundamentos

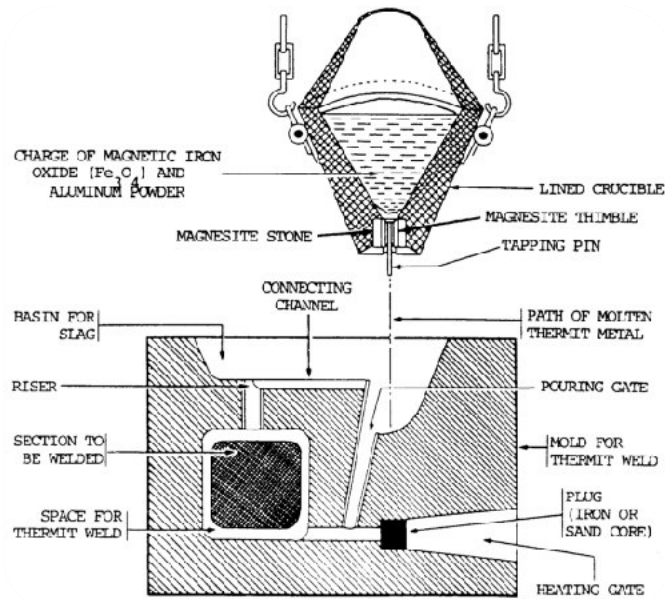
La construcción de la Línea 1 del Metro de Quito comprende una extensión de 22 km de línea férrea que implica la soldadura de alrededor de 7500 juntas ensambladas mediante un proceso de soldadura poco conocido en Ecuador, aplicado en las uniones de los extremos de las rieles individuales para formar una sola riel.

Siendo el primer sistema de transporte masivo metropolitano subterráneo implantado en el país, este proyecto de gran envergadura requiere altos niveles de control de calidad tanto en la fabricación como en el mantenimiento. Por ello, el ultrasonido industrial es uno de los métodos de ensayos no destructivos de gran confiabilidad a un bajo costo que puede ser aplicado para el control de calidad de uniones soldadas. Por lo cual es necesario contar con un procedimiento que oriente a la ejecución adecuada de inspecciones que garanticen la detección de discontinuidades de soldadura que a mediano plazo pudieran desembocar en pérdidas tanto humanas como económicas. [2]

### **Soldadura aluminotérmica (TW)**

Allá por el año de 1895, fue desarrollada por Hans Goldschmidt la soldadura exotérmica. El Dr. Charles Cadwell desarrolló la primera aplicación no ferrosa para la soldadura exotérmica en 1938, aunque años atrás en 1928 el método fue patentado por Jhon H. Deppeler. El uso original del proceso fue soldar uniones de señal de las vías del ferrocarril.

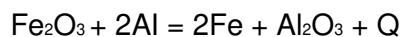
La soldadura aluminotérmica es un proceso de soldadura que emplea metal fundido para unir de forma permanente los materiales a ser soldados. En la Figura 1.1, se observa el proceso de soldadura aluminotérmica.



**Figura 1.1** Proceso de soldadura aluminotérmica. [3]

El principio básico en el que se basa la soldadura aluminotérmica es el desarrollo de la reacción química de transformación de los ferros óxidos en hierro. A la reacción le sigue la liberación de una cantidad importante de energía térmica, eso significa que la reacción es exotérmica y el calor liberado se usa para la soldadura de los extremos de dos rieles.

La principal reacción química se desarrolla de la siguiente manera:



La reacción química que genera calor es la reacción de la termita entre el polvo de aluminio y el óxido metálico, para lo cual no se requiere una fuente de calor externa o corriente eléctrica. [1]

### **Soldadura aluminotérmica para uniones de rieles.**

En el año de 1935, uno de los primeros ferrocarriles en evaluar el uso de la soldadura de termita fue el Delaware Hutson.

En la mezcla utilizada para la soldadura, se añaden los correspondientes elementos de aleación en función del tipo de carril para el que se destinan las mezclas.

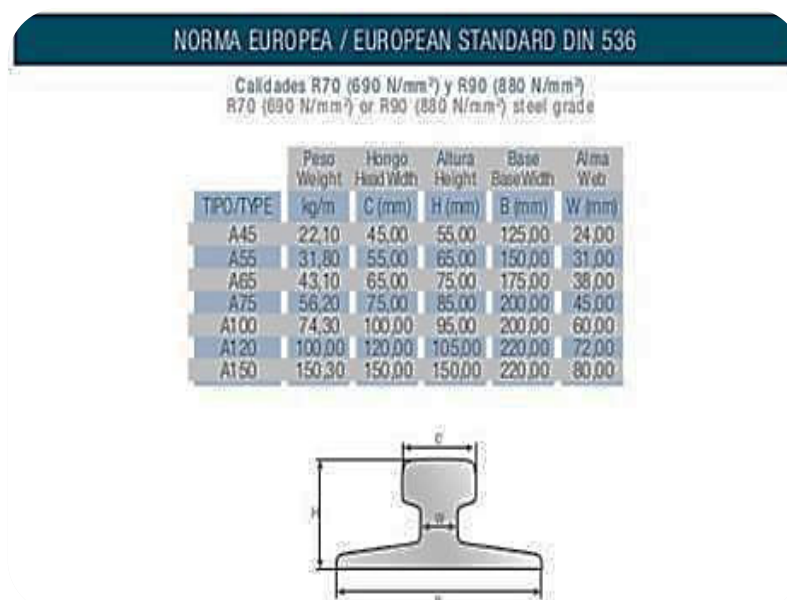
Para iniciar la reacción es necesario proporcionar el llamado encendido inicial, eso significa que si la mezcla preparada se enciende en “un punto”, la reacción comenzará con la liberación de una cantidad importante de calor. Aumentando la temperatura del molde o en otras palabras precalentando a 2200 °C y permitiendo la reacción posterior, entonces se produce la fusión de los rieles. El proceso de reducción de ferro óxidos se desarrolla en un crisol, ubicado encima del molde en la junta a ser soldada.

La olla o molde se recubre con material ignífugo, durante el proceso mencionado, los productos de reacción son hierro y escoria, el hierro cae al fondo del molde y la escoria compuesta principalmente por óxido de aluminio sale a la superficie del molde.

Es necesario prever el final del proceso químico porque por el contrario, la parte no activada de la mezcla con aluminio elemental, podría caer en el espacio intermedio, y perturbar la compacidad del material de soldadura. La distancia entre los dos extremos de los rieles es también importante porque si esta distancia no es suficiente, se podría presentar discontinuidades. Una mala penetración o una cantidad insuficiente de hierro fundido no pueden derretir las partes de contacto de los rieles y no proporcionan la conexión orgánica del material de soldadura con el material base, además de eso un papel importante tiene la calidad de preparación de la mezcla, como el enriquecimiento de los componentes particulares de la mezcla, su pureza, humedad etc. Antes de realizar la operación de fundición, es necesario realizar la operación de precalentamiento de extremo de los rieles que debe ser soldado.

El periodo de tiempo para los rieles y el precalentamiento depende de varios factores, como el tipo de rieles, la distancia de dilatación, la regulación de la llama y las condiciones climáticas. [3]

A continuación en la Figura 1.2, se muestra los diferentes tipos de rieles de acuerdo a la norma Europea DIN 536:



**Figura 1.2** Tipos de rieles según norma Europea DIN 536. [1]

## **Prueba de Ultrasonido (UT)**

La prueba de ultrasonido (UT), es un método de ensayo no destructivo que usa sonidos de alta frecuencia (ultrasonido), que se encuentran en un rango superior al del oído humano, para medir propiedades físicas y geométricas en materiales.

Existen muchas maneras en las que el sonido viaja a través de los materiales. Un tipo de onda llamada onda longitudinal viaja alrededor de 330 metros por segundo en el aire y a 6400 metros por segundo en el aluminio o en el acero viaja alrededor de 5960 metros por segundo aproximadamente.

El ultrasonido convierte la energía eléctrica en energía mecánica en forma de onda de sonido mediante un transductor. El transductor logra esta conversión de energía debido a un fenómeno referido como el efecto piezoeléctrico, este efecto ocurre en algunos materiales tanto naturales como artificiales. El cuarzo por ejemplo es un material piezoeléctrico natural.

Un material piezoeléctrico experimentará un cambio mecánico de dimensión es decir, se deforma cuando se excita con un pulso eléctrico, de la misma manera, este mismo material producirá un pulso eléctrico cuando actuó mecánicamente. [1]

## **2 METODOLOGÍA**

### **2.1 Descripción de la metodología usada**

Para encontrar la solución al problema de no contar en el Ecuador con un procedimiento para inspección de soldadura aluminotérmica de carriles del Metro de Quito de acuerdo a la norma NAV 3-0-5.1, se siguió la investigación aplicada.

#### **Método Hipotético – Deductivo**

Este método lógico relacionó en gran parte el desarrollo del proyecto debido a la importancia de cumplir con todas las normas necesarias requeridas para la elaboración del procedimiento, que incluyó, el correspondiente análisis del proceso de soldadura aluminotérmica, el ultrasonido industrial como método de ensayo no destructivo utilizado para el control de calidad, los tipos de discontinuidades presentes en uniones soldadas por proceso aluminotérmico en carriles y los criterios de aceptación y rechazo de acuerdo a la norma NAV 3-0-5.1 con el fin de garantizar soldaduras de calidad en futuros proyectos de soldaduras de carriles en el Ecuador.

Ya que existen defectos internos en la soldadura que no son detectables mediante técnicas de inspección superficiales, como son: el método de inspección visual, el



método de líquidos penetrantes o el método de partículas magnéticas, se estableció el uso del ultrasonido industrial como método de ensayo no destructivo para la inspección volumétrica de las juntas soldadas, puesto que es una técnica muy utilizada para la inspección de las juntas por soldadura aluminotérmica..

Una vez definido el ultrasonido industrial como método de ensayo no destructivo para la inspección de juntas soldadas en rieles mediante soldadura aluminotérmica, se elaboró el procedimiento respectivo para la ejecución en campo de dicha técnica, misma que fue aprobada por un inspector nivel III certificado por la Sociedad Americana de Ensayos no Destructivos – ASNT.

En el procedimiento elaborado se menciona, los diferentes tipos de discontinuidades que podrían presentarse al momento de realizar la inspección en campo de las juntas soldadas en rieles mediante ultrasonido industrial, como son: incrustaciones, porosidades, fisuras y faltas de fusión, sin embargo dichas discontinuidades solo pudieron observarse mediante macrografías, previamente extraídas las juntas defectuosas.

Una vez que se detectaron las discontinuidades, en el procedimiento se encuentra los criterios de aceptación y rechazo bajo la norma NAV 3-0-5.1, que sirvieron de contraste al momento de evaluar una discontinuidad en las juntas soldadas en rieles mediante soldadura aluminotérmica y determinar si es o no un defecto.

Después de que se hayan determinado las etapas que comprenden la inspección de soldadura aluminotérmica; mediante instrucciones precisas, se elaboró una guía que instruya de manera ordenada cada uno de los pasos a aplicar para llevar a cabo una inspección de carriles en campo mediante ultrasonido. [1]

### **3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

A continuación se detalla las actividades realizadas durante el desarrollo del procedimiento de inspección de juntas soldadas en rieles, el cual se enfoca en el ultrasonido como método de ensayo no destructivo para dicha inspección.

Antes de definir al ultrasonido como método de ensayo no destructivo para la inspección de juntas soldadas en rieles, es necesario mencionar que existen otros métodos de ensayos no destructivos complementarios tales como la prueba visual (VT), la prueba de tintas penetrantes (PT) y la prueba de partículas magnetizables (MT), que también se utilizan para la inspección de juntas soldadas en rieles, sin embargo estas últimas tienen como desventaja que solo se utilizan para inspección superficial, a diferencia del

ultrasonido que se utiliza para inspección volumétrica, la cual es muy útil para la detección de fallas internas.

Este procedimiento preverá los requerimientos para la inspección, mediante ultrasonido de soldaduras aluminotérmicas en rieles, por exploración manual, inmediatamente después de su terminación. A su vez que se utilizará para calibrar equipos de ultrasonido y permitirá detectar, localizar y evaluar discontinuidades en juntas soldadas en rieles.  
[1]

### **3.1 Selección del ensayo no destructivo adecuado**

Los ensayos no destructivos (END), tienen la particularidad de no modificar de forma permanente las propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales de un material, debido a esto no alteran las piezas que son sometidas a ensayos. Los ensayos no destructivos de acuerdo a su aplicación se dividen en:

- Técnica de inspección superficial
- Técnica de inspección volumétrica

#### **Técnica de inspección superficial**

Esta técnica se aplica cuando es necesario detectar discontinuidades que están en la superficie por tal razón mediante esta se comprueba la integridad superficial de un material, pudiendo estar abiertas a la superficie, o una profundidad no mayor de 3 (mm).

Dentro de este grupo se tienen los siguientes tipos de ensayos no destructivos:

- Líquidos Penetrantes (PT), por sus siglas en inglés *Penetrant Testing*.
- Inspección Visual (VT), por sus siglas en inglés *Visual Testing*.
- Partículas Magnetizables (MT), por sus siglas en inglés *Magnetic Testing*.

#### **Técnica de inspección volumétrica**

Esta técnica permite conocer la integridad de un material en su espesor y su aplicación es útil para detectar discontinuidades internas que a simple vista no se notan en la superficie de la pieza.

Dentro de este grupo se tienen los siguientes tipos de ensayos no destructivos:

- Radiografía Industrial (RT), por sus siglas en inglés *Radiographic Testing*.
- Ultrasonido Industrial (UT), por sus siglas en inglés *Ultrasonic Testing*.

Donde por motivo de estudio se ha seleccionado a la técnica de ultrasonido industrial como método de ensayo no destructivo para la inspección de soldadura aluminotérmica en rieles. [4]

### **3.2 Procedimiento de Ultrasonido Industrial**

Antes de empezar con la elaboración del procedimiento de inspección mediante la técnica de ultrasonido industrial se necesita tener bien definidas ciertas características del componente a ensayar como pueden ser tipo de material, configuración de la junta, espesor a ensayar, dimensiones.

#### **Configuración de la junta soldada mediante soldadura aluminotérmica**

Para lograr la necesaria integridad del riel y garantizar la seguridad del riel en la vía, se establece que todos los carriles deben producirse en el marco de un sistema global de control de la producción de fábrica que debe garantizar la confianza en lo conforme del producto acabado.

Dado lo anterior se inspeccionarán soldaduras aluminotérmicas de carriles fabricados bajo los requerimientos de la norma EN 13674-1.

#### **Procedimiento para soldadura aluminotérmica:**

Los rieles son cortados y la brecha a ser soldada es preparada. El corte de las caras debe ser limpiado, para remover cualquier material contaminante, este proceso se lo puede realizar con aceite de kerosene y cepillo metálico, ya que si no se realiza dicha limpieza previa, estas impurezas se pueden fusionar con la junta soldada y en lo posterior convertirse en un defecto.

Se emplea el uso de una regla metálica de un metro con el fin de conseguir la alineación de los bordes de los rieles. Como se observa en la Figura 3.1.



**Figura 3.1** Preparación y alineación de la junta a ser soldada mediante soldadura aluminotérmica.

Los extremos de los rieles a ser soldadas, se acomodan dando espacio a la solidificación y enfriamiento del material aluminotérmico. Es necesario prever el sistema de escape de los rieles caso contrario, la junta se puede hundir debido a que en la cabeza del riel con respecto al patín habrá una diferencia de enfriamiento porque es donde se encuentra gran cantidad de material lo que ocasiona un enfriamiento más lento.

La consecuencia de una junta hundida es que provocaría un rodamiento malo dando paso a un problema de mantenimiento, tomando en cuenta que la junta se expone a grandes esfuerzos debido al aumento dinámico de la carga vertical, que es la carga aplicada por la pisada de la rueda a todo el riel bajo condiciones nominales de operación.

Para la alineación tanto vertical como lateral, son usadas cuñas. Seguido a esto el crisol y la torcha son fijados en la parte superior de la cabeza del riel, es decir en el lado opuesto de la brecha de soldadura. La posición y la altura del espacio donde va ubicada la torcha es revisada y ajustada, colocando el soplete de precalentamiento, que luego se retira para ser usado con posterioridad.

Luego se procede a la selección y examinación de un conjunto de moldes prefabricados, idóneos para la sección del riel. Una manera para supervisar el perfil de riel del molde es, colocando el molde contra el lado del riel a ser soldado. Si se requiere de pequeños ajustes en el molde se los realiza frotando el molde contra el lado del riel.

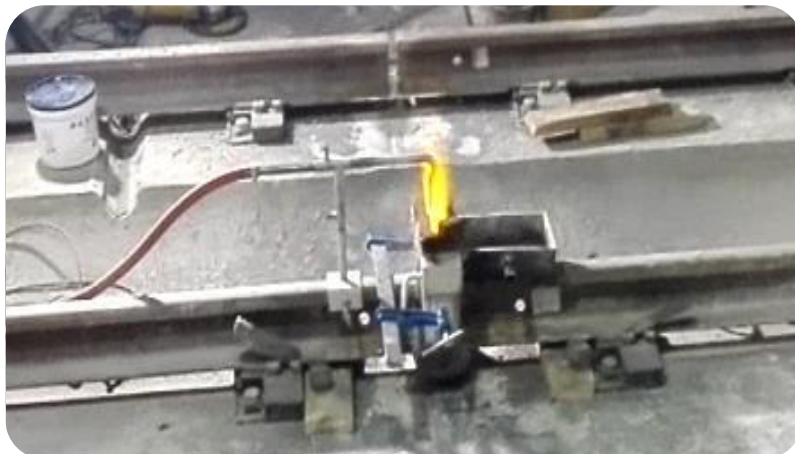
Después que los moldes son debidamente ubicados, como se observa en la Figura 3.2, se emplea el uso de una especie como de encofrado y se les fija con arena de cementación. La ubicación del molde debe ser en el centro de la brecha, de no ser así cuando se vierta el metal fundido se podría presentar un desequilibrio de temperatura en uno de los rieles dando paso a una fusión incompleta en el otro riel.



**Figura 3.2** Colocación del molde en la junta a ser soldada mediante soldadura aluminotérmica.

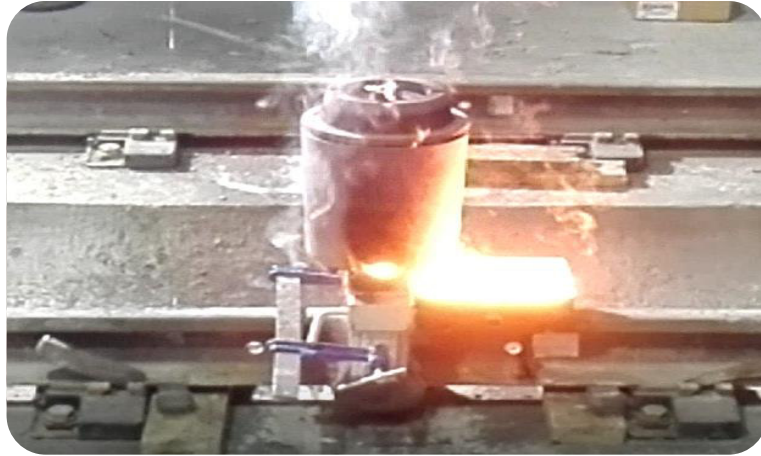
En el caso que se presenten espacios abiertos entre el molde y el perfil de riel estos serán sellados con arena de cementación. Para la recolección de toda la escoria desbordante y metal fundido durante el vertido se necesitan depósitos de escoria que irán ubicados en el molde.

Antes de proceder con la soldadura aluminotérmica en rieles es necesario un precalentamiento previo, como se observa en la Figura 3.3, usando gas licuado de petróleo (GLP), (uso comercial en cilindros) y oxígeno, el soplete se enciende y la llama es ajustada. Esta antorcha se ubica en su soporte, que se fija sobre la abertura, y la llama actúa en el molde a través de la abertura central. La llama calienta los extremos de cada riel a ser unido y esto se realiza durante un tiempo especificado para cada junta a ser soldada.



**Figura 3.3** Precalentamiento de la junta.

Una vez que el precalentamiento haya culminado, la reacción aluminotérmica es iniciada encendiendo una bengala y poniéndola en el crisol. La reacción se deja un tiempo determinado para que la escoria sea desechada del metal fundido. El pasador de cierre se vierte desde el exterior, descargando así el metal en la cavidad central superior del molde. En la Figura 3.4, se muestra el encendido del crisol y el vertido del material desbordado.



**Figura 3.4** Encendido del crisol y recolección del material fundido desbordado.

Finalmente el exceso de acero aluminotérmico sobre la cabeza del carril, es desechado después de la solidificación (pero cuando el metal está todavía al rojo vivo), ya sea por cincelado manual o usando otro tipo de herramientas.

Se retira el material refractario restante y se eliminan las cuñas, el crisol, la bandeja de recolección de la colada desbordada, por último la cabeza del carril se maquina a mano o con máquinas. [1]

En la Figura 3.5, se muestra el acabado final de la junta soldada mediante el uso de máquina.



**Figura 3.5** Acabado final mediante el uso de máquina en la junta soldada.

### 3.3 Técnica de Ultrasonido para inspección en rieles

Se empleará la técnica de contacto pulso eco, de la siguiente manera:

- a. Haz recto (onda longitudinal): para detectar discontinuidades tipo poros, sopladuras (blow hole), e inclusiones de escoria en la cabeza y alma de la junta soldada.
- b. Haz angular (onda de corte): para detectar discontinuidades tipo falta de fusión, poros, sopladuras (blow hole), inclusión de escoria y fisuras en la cabeza y pie de la junta soldada.

En la Figura 3.6, se muestra un ejemplo de inspección en campo mediante el método de ultrasonido industrial.



**Figura 3.6** Inspección de rieles mediante la técnica de ultrasonido industrial.

#### Ángulos y modos de propagación de onda

- a. Haz recto (onda longitudinal): 0 grados.
- b. Haz angular (onda de corte): 45°, 70°; se escogerá el ángulo apropiado considerando la zona de la soldadura que se desea inspeccionar, ver numerales 3.5, 3.6 y 3.7.

#### Palpador y cuñas (zapatatas)

- a. Haz recto (onda longitudinal): palpadores duales, con frecuencia nominal de 2 a 5 (MHz); el tamaño nominal del elemento transductor estará restringido por la configuración de junta y espacio para manipular. Como se muestra en la Figura 3.8.
- b. Haz angular (onda de corte): palpadores de un solo elemento con cuña (desmontable o no) para generar la onda de corte angular; con frecuencia



nominal de 2 a 5 (MHz); el tamaño nominal del elemento transductor estará restringido por la configuración de junta y espacio para manipular. Como se muestra en la Figura 3.7.



**Figura 3.7** Zapata y transductor para ultrasonido haz angular. [5]



**Figura 3.8** Transductor para ultrasonido haz recto. [6]

### **Acoplante**

Cualquier acoplante comercial como agua, metil celulosa (gel), como se muestra en la Figura 3.9, o aceite podrá ser utilizado; siempre que la misma sustancia sea utilizada para la calibración y examinación. Para la ejecución de la inspección se garantizará que el acoplante seleccionado sea técnica y químicamente compatible con los materiales involucrados en la junta soldada.





**Figura 3.9** Gel acoplante a utilizar en el ensayo. [7]

### **Equipo de ultrasonido**

Se utilizarán equipos de ultrasonido de tipo pulso-eco capaces de operar en el rango de frecuencias de 2 a 5 (MHz) y equipados con control de ganancia en pasos de 2,0 (dB) o menos. En la Figura 3.10, se muestra un modelo de equipo de ultrasonido.

Si el equipo posee un control de amortiguación, podrá ser utilizado siempre que no reduzca la sensibilidad de barrido. El control de “rechazo” deberá estar en la posición “off” para todas las inspecciones, a menos que pueda demostrarse que no afecte a la linealidad del examen. El equipo estará equipado con puertos, para envío y recepción, que serán utilizados para la conexión de palpadores simples y duales.



**Figura 3.10** Equipo de ultrasonido. [8]

## **Superficie de inspección**

Posterior a la ejecución de la soldadura aluminotérmica, la zona de soldadura será limpiada y acondicionada para facilitar la ubicación de los palpadores de ultrasonido. La cara superior de la cabeza del carril será acondicionada (pulida) para obtener una superficie razonablemente plana. La superficie superior del pie de la junta será limpiada con cepillo de alambre para asegurar inexistencia de polvo, escamas, escoria, suciedad o materiales extraños.

Previa a la inspección con ultrasonido, toda la junta soldada será limpiada y examinada visualmente para detectar cualquier discontinuidad visible como fisuras, o sopladuras (blow hole). Cualquier junta soldada que muestre las mencionadas discontinuidades será rechazada. [4]

### **3.4 Calibración**

#### **a) Calibración general del equipo de ultrasonido (linealidad)**

La verificación de la “linealidad de la altura de la pantalla” y de la “linealidad del control de amplitud” del equipo de ultrasonido será realizada en intervalos de un año. [9]

#### **b) Calibración por cada examinación (puesta a punto) – Requerimientos Generales**

- **Sistema de Ultrasonido**

La calibración para examinación o “puesta a punto” incluirá al sistema completo de ultrasonido y será realizada por el operador del equipo en el lugar de trabajo, antes de examinar las soldaduras. Una comprobación de la calibración o re-calibración será realizada posterior al cambio de operadores, al inicio de cada jornada de trabajo (cada día) o cuando el circuito eléctrico sea perturbado por:

- (1) Cambio de transductor.
- (2) Cambio de baterías.
- (3) Cambio de toma eléctrica
- (4) Cambio de cable coaxial.
- (5) Falla de alimentación.

- **Superficie de Calibración**

La calibración será realizada desde una superficie plana similar a la del componente donde se aplicará la inspección por ultrasonido. Para efectuar lo mencionado, se utilizará un bloque patrón V1 (IIW)

- **Acoplante**

El mismo acoplante que se empleará en la inspecciones de producción, será utilizado para la calibración.

- **Cuñas de contacto**

Las mismas cuñas (zapatitas) que se utilizarán en la inspección, serán usadas en la calibración.

- **Controles del instrumento (equipo)**

Cualquier control que afecte a la linealidad de equipo (filtros, control de rechazo, etc.) serán ubicados en la misma posición para el chequeo de la calibración, chequeo de la linealidad del equipo, e inspección en producción.

- **Temperatura**

La diferencia de temperaturas entre el bloque de calibración y la superficie a inspeccionarse no será mayor a 14 (°C).

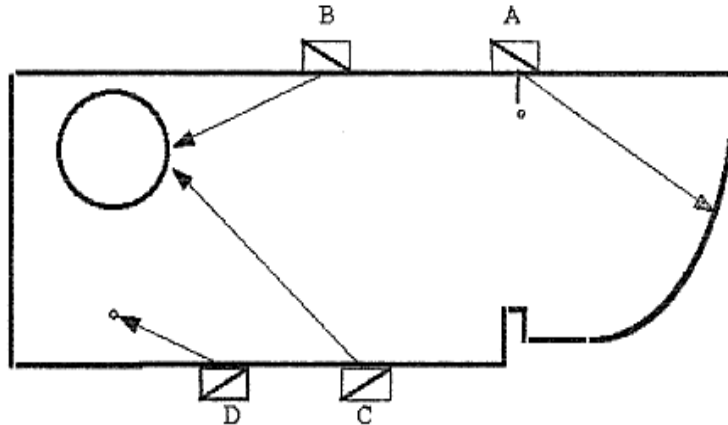
### **c) Calibración para cada examinación – Palpador de Haz Recto**

Se colocará el palpador, con suficiente acoplante, sobre un espesor conocido del bloque de prueba (V1/IIW), luego se ajustan los controles (rango, barrido o velocidad) hasta que la pantalla de visualización del equipo, presente la lectura del espesor apropiado. Posteriormente, las lecturas deben ser verificadas y ajustadas en el mismo bloque de prueba, sobre un espesor de menor valor conocido, interactuando con el propósito que se mejore el ajuste total del sistema.

El rango será ajustado, de manera que se exhiba en la pantalla del equipo de ultrasonido, el equivalente a un mínimo de 2 veces el espesor elegido para la calibración. La sensibilidad será ajustada de modo que el primer eco posterior del lado lejano del bloque de calibración, alcance un altura del 50 al 80% de la pantalla.

#### d) Calibración para cada examinación – Palpadores de Haz Angular

La calibración para transductores angulares será realizada tomando como referencia las posiciones indicadas en la Figura 3.11.



**Figura 3.11** Posiciones para ajuste sobre bloque V1/IW.

- **Determinación del punto índice de emisión del haz:**

Aplicar acoplante sobre el bloque V1/IW y colocar el palpador sobre la muesca en la posición A de la Figura 3.11.

Ajustar el control de rango y con el control de ganancia, sin desacoplar el palpador, hasta observar que la reflexión proveniente del radio de 4" o 100 (mm), aparezca en la pantalla del equipo.

Ajustar el control de ganancia hasta una amplitud de aproximadamente del 80%, ubicándola en la división 4 o 6 de la EHP (Escala Horizontal de Pantalla) con el Control de Retardo.

Mover suavemente el palpador (manteniendo uniforme su orientación hacia el frente) hacia atrás o hacia adelante, hasta obtener la máxima amplitud de la indicación sobre la pantalla, sin incrementar la ganancia.

Una vez obtenida la máxima amplitud, sin mover el palpador, observar si la marca de la zapata del punto de salida del haz coincide con la marca "cero" (centro de radio de curvatura de 4") grabada en el bloque. En caso de no coincidir se debe remarcar la zapata en el punto que coincida con la marca del cero. Donde sea aplicable, colocar a ambos lados de la zapata cinta adhesiva (masking) y marcar sobre esta.

- **Verificación del ángulo refractado:**

Colocar el palpador, en los grados que corresponda (posición B o C de la Figura 3.11.) con el ángulo marcado en la zapata, dirigiéndola hacia el inserto circular (normalmente de plexiglass) contenido en el bloque V1/IIW.

Mover suavemente el palpador hacia adelante o hacia atrás hasta obtener la máxima amplitud de la indicación en la pantalla

Ajustar el control de ganancia hasta una amplitud de aproximadamente el 80%, ubicándola en la división 4 o 6 de la EHP con el control de retardo.

Una vez obtenida la máxima amplitud, sin mover el palpador, observar el valor (en grados) que se ha obtenido en el lugar donde coinciden el punto índice de emisión (anteriormente determinado) y la escala del bloque. En caso de que el ángulo obtenido no coincida con el ángulo marcado en la zapata, registrar este nuevo valor para insertar en la configuración del equipo de ultrasonido.

- **Calibración en distancia del recorrido del haz:**

Para un rango total en la pantalla de 10" o 250 (mm), se procederá como sigue.

Colocar el palpador en la posición A, como se indica en la Figura 3.11., haciendo coincidir el punto índice de emisión con el centro del radio de curvatura de 4" o 100 (mm), marcado en el bloque.

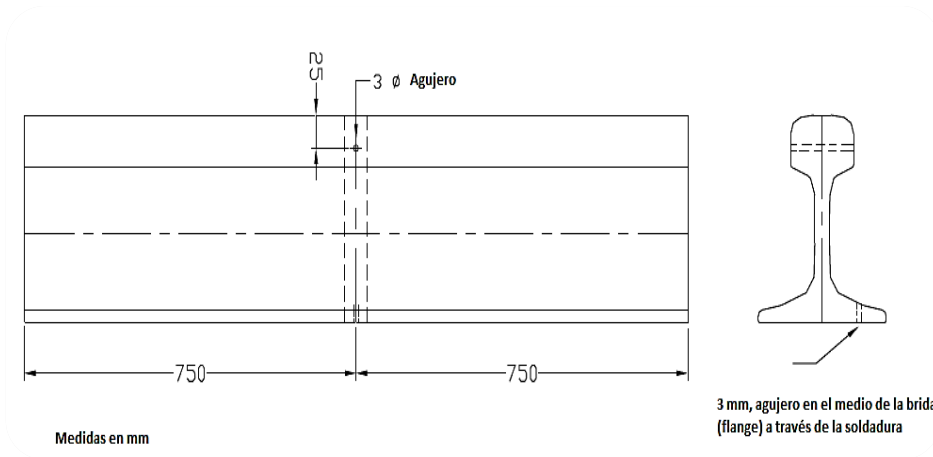
Ajustar convenientemente los controles Longitud de Barrido (rango) y el de Ganancia para observar dos indicaciones en la pantalla.

Con el Control de Barrido, colocar la primera indicación en la división 2 de la EHP. Con el Control de Longitud de Barrido, colocar la segunda indicación en la división 4 de la EHP.

Repetir las operaciones descritas en los párrafos anteriores hasta lograr el ajuste final.

### **Ajuste de sensibilidad**

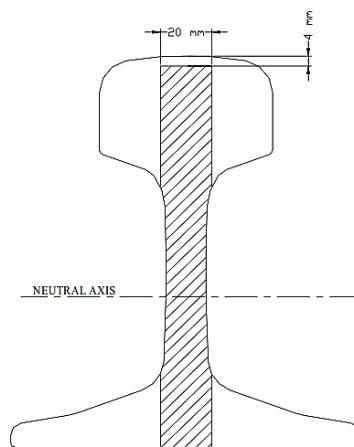
La sensibilidad del equipo de ultrasonido (sistema completo) será ajustado con una pieza soldada (carril) con defectos simulados ubicados a las distancias mostradas en la Figura 3.12. [4]



**Figura 3.12** Pieza carril para ajuste de sensibilidad. [4]

### 3.5 Barrido para inspección de cabeza y alma, haz recto, 0°.

Este barrido será utilizado para detectar fisuras, porosidad, soplado (blow hole) e inclusiones de escoria en la cabeza y alma de la junta soldada. En la Figura 3.13, se muestra las zonas de inspección mediante haz recto.



**Figura 3.13** Zona de inspección con la zapata haz recto 0°. [4]

#### Calibración y ajuste de sensibilidad.

El equipo será ajustado (calibrado) de acuerdo a lo estipulado en el numeral 3.4 literal c), de este documento, para un rango de trabajo de 300 (mm) aprox.

El ajuste de sensibilidad se realizará ubicando el transductor de 0°, sobre la cabeza de la soldadura de la “pieza carril para ajuste de sensibilidad”. La reflexión generada por el agujero de 3 (mm) de la cabeza será ajustada en el equipo de ultrasonido (mediante el

control de ganancia) de manera que alcance el 60% de altura de pantalla completa; este será el nivel de referencia para evaluación.

### **Barrido ultrasónico.**

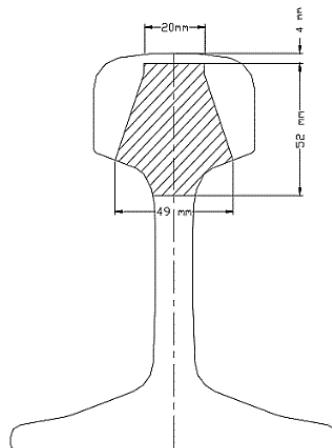
El palpador será ubicado sobre la cabeza de la soldadura que se desea inspeccionar asegurando un adecuado acoplamiento, luego será movido longitudinalmente sobre el centro de la soldadura cubriendo el ancho soldado.

### **Clasificación de defectos, aceptación y rechazo.**

Cualquier indicación obtenida desde la región de la cabeza soldada, que alcance o sobrepase el 40% de altura de pantalla será tratada como un defecto de rechazo. Cualquier indicación obtenida desde la región del alma o pie de la soldadura, que alcance o sobrepase el 20% de la altura de pantalla, será considerada como un defecto de rechazo. [4]

### **3.6 Barrido para inspección de cabeza, haz angular, 70°.**

Este barrido será utilizado para detectar falta de fusión, porosidad, soplado (blow hole), inclusiones de escoria y fisuras en la cabeza de la junta soldada. En la Figura 3.14, se muestra la zona de inspección mediante haz angular.



**Figura 3.14** Zona de inspección con la zapata haz angular 70°. [4]

### **Calibración y ajuste de sensibilidad.**

El equipo será ajustado (calibrado) de acuerdo a lo estipulado en el numeral 3.4 literal d), de este documento, para un rango de trabajo de 300 (mm) aprox.

El ajuste de sensibilidad se realizará ubicando el transductor de 70° sobre la cabeza de la “pieza carril para ajuste de sensibilidad”, direccionando el haz de sonido hacia el agujero de 3 (mm), en dirección longitudinal hasta obtener la indicación de la reflexión del sonido en la pantalla del equipo de ultrasonido; esta indicación será ajustada en el equipo (mediante el control de ganancia) de manera que alcance el 60% de altura de pantalla completa; este será el nivel de referencia para evaluación.

### **Barrido ultrasónico.**

El palpador de 70° será ubicado sobre la cabeza del carril a un lado de la soldadura que se desea inspeccionar asegurando un adecuado acoplamiento, luego será movido en zig-zag apuntando hacia la soldadura; este ejercicio será repetido tres veces. Todo lo mencionado será realizado para ambos lados de la soldadura.

### **Clasificación de defectos, aceptación y rechazo.**

Cualquier indicación obtenida, que alcance o sobrepase el 40% de altura de pantalla, será tratada como un defecto de rechazo. [4]

## **3.7 Barrido para inspección de pie, para defectos fisura, haz angular, 45°.**

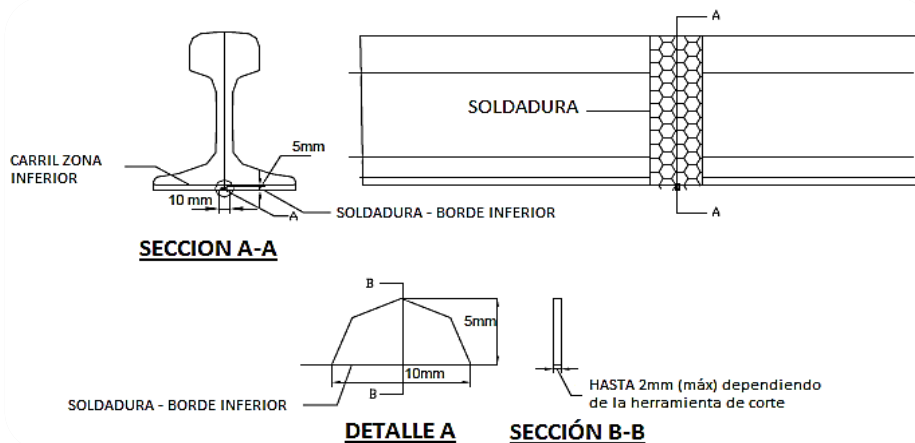
Este barrido será realizado para inspeccionar la zona inferior del pie de soldadura, para detectar defectos tipo fisura (forma de media luna).

### **Calibración y ajuste de sensibilidad.**

El equipo será ajustado (calibrado) de acuerdo a lo estipulado en el numeral 3.4 literal d), de este documento, para un rango de trabajo de 500 (mm) aprox.

El ajuste de sensibilidad será realizado con la utilización de un defecto simulado maquinado en la “pieza carril para ajuste de sensibilidad”, tal como se muestra en la Figura 3.15. Se ubicará el palpador de 45° sobre la cabeza, a una distancia aproximada a la altura del carril, desde el centro de la soldadura; se moverá el palpador a cada lado de esta posición hasta encontrar el defecto “media-luna” simulado en la región central inferior de la soldadura. Este ejercicio será realizado a cada lado de la soldadura y la señal mayor obtenida será ajustada (mediante el control de ganancia) al 60% de altura de pantalla completa; este será el nivel de referencia para evaluación. [10]





**Figura 3.15** Pieza carril para ajuste de sensibilidad, con defecto simulado en el pie. [4]

### **Barrido ultrasónico.**

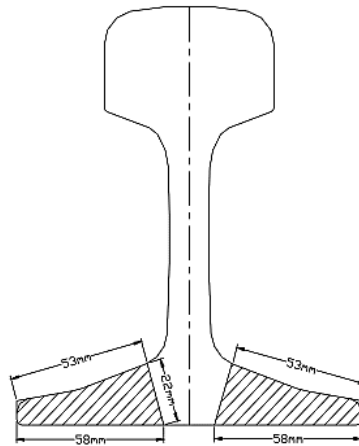
El palpador de 45° será ubicado sobre la cabeza del carril a un lado de la soldadura que se desea inspeccionar asegurando un adecuado acoplamiento, a una distancia aproximada a la altura del carril, desde el centro de la soldadura; se moverá el palpador a cada lado de esta posición una distancia de 20 (mm), (o aquella determinada experimentalmente al realizar el ajuste de sensibilidad) considerando que el objetivo es barrer la zona inferior de la soldadura en su parte central.

### **Clasificación de defectos, aceptación y rechazo.**

Cualquier indicación obtenida, que alcance o sobrepase el 20% de altura de pantalla, será tratada como un defecto de rechazo. [4]

### **3.8 Barrido para inspección de pie (flange), haz angular, 70°.**

Este barrido será realizado para detectar, fisuras, faltas de fusión, porosidad, soplado (blow hole) e inclusión de escoria en la soldadura del pie del carril (flange). Como se muestra en la Figura 3.16.



**Figura 3.16** Zona de inspección con la zapata haz angular 70°. [4]

### **Calibración y ajuste de sensibilidad.**

El equipo será ajustado (calibrado) de acuerdo a lo estipulado en el numeral 3.4 literal d), de este documento, para un rango de trabajo de 300 (mm) aprox.

El ajuste de sensibilidad se realizará ubicando el transductor de 70° sobre el pie de la “pieza carril para ajuste de sensibilidad”, direccionando el haz de sonido hacia el agujero de 3 (mm), taladrado en la mitad del reborde (flange), hasta obtener y ajustar la indicación de la reflexión del sonido (mediante el control de ganancia del equipo de ultrasonido) de manera que alcance el 60% de altura de pantalla completa; este será el nivel de referencia para evaluación.

### **Barrido ultrasónico.**

El palpador de 70° será ubicado sobre el pie del carril, a un lado de la soldadura que se desea inspeccionar a una distancia aproximada de 180 (mm), (o aquella determinada experimentalmente con la pieza carril para ajuste de sensibilidad), asegurando un adecuado acoplamiento. El haz ultrasónico será apuntado hacia la soldadura y se moverá el palpador en zig-zag de modo que se cubra todo el ancho posible del reborde soldado (flange). Esta operación será repetida para ambos lados de la soldadura y para ambos rebordes (flanges).

### **Clasificación de defectos, aceptación y rechazo.**

Cualquier indicación obtenida, que alcance o sobrepase el 40% de altura de pantalla, será tratada como un defecto de rechazo. [4]

### **3.9 Defectos límites aceptables**

La importancia de los ecos detectados y el modo de actuar, como consecuencia, se fijará mediante el código NAV. 3-0-5.1. numeral 6 que indica lo siguiente:

**Cabeza del carril.-** No se admite ningún defecto vertical interno de unión entre la soldadura y el carril.

Se admite una sola porosidad menor de 2 (mm) de diámetro en el soldeo con precalentamiento corto y en el de cala ancha y 4 como máximo, del mismo tamaño, en el precalentamiento normal.

**Patín del carril.-** Se admite una sola porosidad menor de 2 (mm) de diámetro situada en su eje longitudinal y siempre que no exista en la cabeza.

**Alma del carril.-** Puede admitirse una cavidad longitudinal siempre que no exista ningún otro defecto en el carril. [11]

### **3.10 Limpieza posterior a la examinación**

El inspector deberá acatar lo indicado por la entidad que solicitare la inspección misma que detallará, en los documentos contractuales, los requerimientos de limpieza luego de que se ha realizado la inspección.

### **3.11 Seguridad y salud en el trabajo**

Para la ejecución de los trabajos relacionados a este procedimiento y en concordancia con los requisitos legales, de la entidad que solicitare la inspección, y lo indicado en la matriz de riesgos del organismo que está prestando el servicio de inspección, se identificaría en primera instancia la necesidad de:

- 1) Llenar el formulario de análisis seguro del trabajo de acuerdo al organismo que está prestando el servicio de inspección.
- 2) Llevar el equipo de protección personal descrito a continuación: (ver Figura 3.17).

USO	EPP	USO	EPP	USO	EPP	USO	EPP	USO	EPP
<input checked="" type="checkbox"/>	 USO DEL EQUIPO DE PROTECCIÓN DE CABEZA	<input checked="" type="checkbox"/>	 USO DEL EQUIPO DE PROTECCIÓN OCULAR	<input checked="" type="checkbox"/>	 USO DEL EQUIPO DE CALZADO DE SEGURIDAD	<input checked="" type="checkbox"/>	 USO DEL EQUIPO DE PROTECCIÓN INTEGRAL	<input type="checkbox"/>	 USO DEL EQUIPO DE PROTECCIÓN DE CARA
<input checked="" type="checkbox"/>	 USO DEL EQUIPO DE PROTECCIÓN AUDITIVA	<input checked="" type="checkbox"/>	 USO DEL EQUIPO DE PROTECCIÓN DE EXTREMIDADES SUPERIORES	<input checked="" type="checkbox"/>	 USO DEL EQUIPO DE TRABAJO DE SEGURIDAD	<input type="checkbox"/>	 USO DEL EQUIPO DE PROTECCIÓN FACIAL	<input checked="" type="checkbox"/>	 USO DEL EQUIPO DE PROTECCIÓN RESPIRATORIA

**Figura 3.17** Equipo de protección personal adecuado.

### 3.12 Recursos utilizados

Los recursos utilizados para la realización del presente procedimiento de inspección de soldaduras aluminotérmicas de carriles del metro de Quito por ultrasonido de acuerdo con la norma NAV 3-0-5.1, fueron facilitados por la empresa SINDESECUADOR S.A. la cual brinda servicios de inspección de soldadura mediante ensayos no destructivos y que cuenta con los insumos necesarios para la inspección de uniones soldadas en rieles.

Dichos insumos como el equipo de inspección, la probeta patrón, transductores, cables, zapatas, acoplante y el EPP necesario para la realización de la inspección en campo ya fueron descritos previamente en el presente documento. Adicional se tuvo que utilizar marcadores para superficies metálicas, flexómetro, guaiques mismos que se utilizaron para la limpieza posterior a la inspección si en caso fuere necesario y el uso de suministros de oficina como hojas, esferos mismos que se utilizaron para tomar apuntes de lo que fuera necesario antes y durante la inspección.

Todo lo descrito anteriormente tendría una inversión aproximada de \$18.000, si se quisiera incursionar por cuenta propia en el tema de inspección de soldadura mediante ultrasonido industrial por esta razón un día de inspección utilizando este método de inspección tiene un valor aproximado de \$350 incluido los valores de logística y recurso humano.

### 3.13 Cronograma ejecutado

En la elaboración del cupón de prueba así como las macrográficas realizadas en el mismo, se elaboró un planteamiento de tiempos que sería la base para el control y seguimiento del proyecto el cual consiste en el establecimiento de un procedimiento

para inspección de soldaduras aluminotérmicas de carriles del Metro de Quito por ultrasonido de acuerdo con la norma NAV 3-0-5.1., sin embargo, el cronograma del proyecto tuvo una ligera variación que a la final no afectó al cronograma inicial, este ligero retraso se presentó en los tiempos de entrega tanto del cupón de prueba como las macrografías por parte de las entidades encargadas de la realización de dichos elementos.

Una vez obtenidos los elementos antes mencionados, el resto de actividades se cumplieron en los tiempos establecidos ya que la mayoría de estas requerían el uso y análisis de documentación.

En el Anexo 2, se muestra un desglose del cronograma final ejecutado.

### **3.14 Resultados obtenidos**

La investigación sobre el control de calidad de las uniones soldadas mediante ensayos no destructivos es uno de los estudios más populares de la industria. Como se conoce, las empresas han invertido mucho dinero en estos estudios porque están estrechamente relacionados con la evaluación de riesgos y el análisis de probabilidad de la integridad de las piezas soldadas.

Los siguientes resultados muestran en este caso, la probabilidad de detección que brindan los ensayos no destructivos mediante ultrasonido industrial, la naturaleza de las discontinuidades que existan estará relacionada con las posibles causas de las mismas o la parte del proceso de soldadura. Se debe tomar las medidas necesarias para evitar estas discontinuidades y controlar cuidadosamente las variables de evaluación del proceso de soldadura. Además, se proporciona pautas prácticas para el control de calidad de las uniones soldadas con termita para garantizar y asegurar la sanidad de las uniones soldadas. [1]

#### **Resultados obtenidos de la inspección de la probeta patrón**

La probeta patrón soldada con el proceso de soldadura aluminotérmica, con la misma especificación de materiales y variables de proceso fue otorgada por el organismo o entidad que requirió los servicios de inspección en las juntas soldadas, con el fin de verificar el procedimiento de soldeo y su efectividad al ser aplicado en campo y al mismo tiempo, posterior a la inspección esta probeta será maquinada para generar discontinuidades intencionalmente que será de utilidad para calibrar nuestro equipo de ultrasonido.

A dicha probeta se le realiza la prueba de Ultrasonido Industrial, para observar si existe la presencia de discontinuidades como fisuras internas y también sirve para evaluar la calidad y solidez de la junta.

Los resultados obtenidos en la probeta patrón fueron (ver Tabla 3.1.)

**Tabla 3.1** Resultados de inspección en la probeta patrón.

COMPONENTENTE	MÉTODO DE INSPECCIÓN	RESULTADO
PROBETA PATRÓN DE RIEL	ULTRASONIDO INDUSTRIAL (UT)	No se detectaron la presencia de fallas relevantes

Finalizada la inspección de la probeta patrón mediante ensayos no destructivos se pudo observar con claridad que esta probeta es la adecuada para elaborar en base a ella la probeta de calibración para el método de ensayo no destructivo aplicado en este estudio que es el ultrasonido industrial, de la misma manera se demostró que las personas encargadas de ejecutar la soldadura cuentan con la habilidad necesaria para la producción de juntas de buena calidad ya que el resultado en la probeta patrón no presentó indicaciones relevantes.

El resultado de la evaluación de la probeta patrón asegura que la primera parte del control de calidad está completo, ya que la producción de uniones de rieles mediante soldadura aluminotérmica se está desarrollando en condiciones ideales y se obtuvo los resultados esperados. [1]

### **Resultados obtenidos de la inspección en campo de las uniones soldadas.**

Se procedió a evaluar las juntas soldadas en campo teniendo en cuenta condiciones ambientales favorables y siguiendo todos los pasos de los procedimientos elaborados y revisados antes de las actividades de soldeo, se evaluaron un total de quince juntas escogidas al azar tanto en la vía 1 y vía 2 del sistema ferroviario además se dividió la actividad de soldeo e inspección de 3 juntas por semana, como se muestra en la Tabla 3.2, los resultados obtenidos fueron los siguientes:

**Tabla 3.2** Resultados de inspección de juntas soldadas en campo.

COMPONENTE	MÉTODO DE INSPECCIÓN	FECHA	RESULTADO
J1 VÍA 1	UT	26-07-2021	No se detectaron indicaciones relevantes.
J2 VÍA 2	UT	28-07-2021	No se detectaron indicaciones relevantes.
J3 VÍA 1	UT	29-07-2021	No se detectaron indicaciones relevantes.
J4 VÍA 2	UT	02-08-2021	No se detectaron indicaciones relevantes.
J5 VÍA 1	UT	03-08-2021	No se detectaron indicaciones relevantes.
J6 VÍA 2	UT	04-08-2021	No se detectaron indicaciones relevantes.
J7 VÍA 1	UT	11-08-2021	No se detectaron indicaciones relevantes.
J8 VÍA 2	UT	12-08-2021	No se detectaron indicaciones relevantes.
J9 VÍA 1	UT	13-08-2021	No se detectaron indicaciones relevantes.
J10 VÍA 2	UT	20-08-2021	No se detectaron indicaciones relevantes.
J11 VÍA 1	UT	22-08-2021	No se detectaron indicaciones relevantes.
J12 VÍA 2	UT	24-08-2021	No se detectaron indicaciones relevantes.
J13 VÍA 1	UT	27-08-2021	No se detectaron indicaciones relevantes.
J14 VÍA 2	UT	28-08-2021	No se detectaron indicaciones relevantes.
J15 VÍA 1	UT	29-08-2021	No se detectaron indicaciones relevantes.

Con los resultados obtenidos en la inspección por Ultrasonido Industrial se observó que las juntas inspeccionadas cuentan con una soldadura de calidad y que el soldador realizó debidamente el procedimiento de soldadura [1]

## **4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **4.1 Conclusiones**

- Con el presente estudio se verificó la efectividad de los métodos de ensayos no destructivos aplicados en campo, siendo el Ultrasonido Industrial uno de los métodos de inspección idóneo por su capacidad de detección de discontinuidades internas en este proceso de soldeo mediante soldadura aluminotérmica.
- En la mayoría de los casos previo a la inspección de las juntas soldadas en campo, se verificó la aplicación del presente procedimiento dada la importancia del control de calidad de los materiales a utilizar en el proceso de inspección y la importancia de comprobar la habilidad de los técnicos de inspección.
- El presente procedimiento específico para la inspección de soldadura aluminotérmica en las rieles del Metro de Quito, se elaboró para identificar los diferentes tipos de fallas presentes en las juntas soldadas mediante el proceso aluminotérmico, mismas que fueron detectadas aplicando el ultrasonido industrial como método de ensayo no destructivo y se basó en los procedimientos ya definidos.
- Las discontinuidades identificadas serán evaluadas en base a los criterios de aceptación definidos en el procedimiento de inspección de acuerdo con la norma NAV 3-0-5.1, para determinar si son defectos, reparar la soldadura y evitar en lo posterior nuevas discontinuidades.
- En la buena práctica de construcción de estructuras soldadas, son importantes la utilización de códigos, estándares y/o normas según lo requerido, por tal motivo se estableció el presente procedimiento para la inspección de juntas soldadas mediante proceso aluminotérmico en las rieles del Metro de Quito tomando como referencia la norma NAV 3-0-5.1.

### **4.2 Recomendaciones**

- En la mayoría de casos un documento escrito, aprobado y calificado para la ejecución de cualquier procedimiento de soldeo debe ser llevado a cabo tal como indica el documento ya que de otra forma los resultados finales de las juntas



soldadas podrían presentar fallas que pondrían en duda la habilidad del soldador así como el riesgo de tener elementos mal soldados.

- La inspección mediante ensayos no destructivos deben ser realizados por personal entrenado y calificado, ya que son ensayos que requieren de experiencia y habilidad en la ejecución así como saber distinguir y discriminar correctamente indicaciones falsas.
- Antes de realizar la inspección es necesario la limpieza de las zonas a ser inspeccionadas ya que de lo contrario se pudiera tener mal acople de la zapata en la junta a ser evaluada así como el desgaste de las zapatas por fricción.
- El presente estudio será de utilidad como guía práctica para el control de calidad de uniones de rieles soldadas por proceso aluminotérmico. Este documento servirá como medio de consulta, pero no tiene ningún carácter mandatorio.

## 5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. Riveros y D. Luque, «Estudio del control de calidad en uniones de rieles de grúa tipo A100 soldadas por proceso aluminotérmico con ensayos no destructivos de ultrasonido industrial y partículas magnéticas fluorescentes,» 2015. [En línea]. Available: <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/2925>. [Último acceso: 15 12 2020].
- [2] «Metro de Quito, Alcaldía de Quito,» [En línea]. Available: <https://www.metrodequito.gob.ec/>. [Último acceso: 16 12 2020].
- [3] V. Chung y N. Gargate, «Estudio de perfectibilidad de una planta de soldadura exotérmica en la empresa para rayos S.A.C.,» [En línea]. Available: [https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UUNI\\_2036938fd7a403002e0e](https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UUNI_2036938fd7a403002e0e). [Último acceso: 05 01 2021].
- [4] «"Government of India Ministry of Railways", "Manual for ultrasonic testing of rails and welds",» 2006. [En línea]. Available: <https://ecr.indianrailways.gov.in/uploads/files/1357555682170-usfd.pdf>. [Último acceso: 12 enero 2021].
- [5] «Sondas y suelas (zapatas) AWS,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.olympus-ims.com/es/ultrasonic-transducers/aws/>.. [Último acceso: 15 enero 2021].

- [6] «Transductor ultrasónico defecto Yushi 2 MHz sonda de haz recto diámetro 24mm Lemo – 00,» 2021. [En línea]. Available: ([https://www.iskaana.top/index.php?main\\_page=product\\_nfo&products\\_id=348088](https://www.iskaana.top/index.php?main_page=product_nfo&products_id=348088)). [Último acceso: 15 enero 2021].
- [7] «Ultrigel II acoplante ultrasónico de alto rendimiento,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.vignolatienda.cl/gel-acoplante-ultrigel-ii0354lt>. [Último acceso: 15 enero 2021].
- [8] «"GE USM Go+ Ultrasonic Flaw Detector",» 2020. [En línea]. Available: <https://geosmartcenter.com/products/GE-USM-Go%252b-Ultrasonic-Flaw-Detector.html>. [Último acceso: 15 enero 2021].
- [9] «AWS D15.2,» de "*Recomended practices for the welding of rails and realted rail components for use by rail vehicles*", 2003, pp. 6-13.
- [10] «DIN EN 16729-2,» de "*Requirements for ultrasonic inspection and evaluation principies*", 2016, pp. 7-13.
- [11] «Administrador de estructuras ferroviarias, NAV 3-0-5.1 Carriles auscultación mediante ultrasonidos,» 1993. [En línea]. Available: [http://descargas.adif.es/ade/u18/GCN/NormativaTecnica.nsf/v0/BC0C6AD134CE7A2FC12573AA003E79D1/\\$FILE/NAV%203051.pdf?OpenElemen](http://descargas.adif.es/ade/u18/GCN/NormativaTecnica.nsf/v0/BC0C6AD134CE7A2FC12573AA003E79D1/$FILE/NAV%203051.pdf?OpenElemen). [Último acceso: 15 enero 2021].
- [12] S. Vipparthy, «"Inspection of defects in rails using ultrasonic probe",» [En línea]. Available: [https://www.ndt.net/article/ndtnet/2013/72\\_Tony.pdf](https://www.ndt.net/article/ndtnet/2013/72_Tony.pdf). [Último acceso: 10 01 2021].

## **ANEXOS**

## **ANEXO 1: FORMULARIO PARA REPORTE DE INSPECCIÓN**



## **ANEXO 2: CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES**

OBJETIVOS	ACTIVIDADES	SEMANA 1	SEMANA 2	SEMANA 3	SEMANA 4	SEMANA 5	SEMANA 6	TOTAL DE HORAS POR ACTIVIDAD
Obj. 1. Definir la aplicación del ultrasonido industrial para la inspección de soldadura aluminotérmica.	1.1 Investigación científica.	10 HORAS	10 HORAS	10 HORAS	10 HORAS	10 HORAS	10 HORAS	60 HORAS
	1.2 Verificación de zonas de inspección.	3 HORAS						3 HORAS
	1.3 Elaboración de cupón de prueba.	3 HORAS						3 HORAS
Obj. 2. Verificar la aplicación en campo del procedimiento de inspección no destructivo aprobado y calificado.	2.1 Determinación de las etapas.		2 HORAS	2 HORAS	2 HORAS			6 HORAS
	2.2 Inspección en campo.			18 HORAS	18 HORAS	18 HORAS	18 HORAS	72 HORAS
	2.3 Fiscalización del procedimiento.			2 HORAS	2 HORAS	2 HORAS	2 HORAS	8 HORAS
Obj. 3. Identificar los tipos de discontinuidades que se presentan en soldaduras aluminotérmicas de carriles.	3.1 Macrografías de cupones de prueba.				4 HORAS			4 HORAS
Obj. 4. Establecer los criterios de aceptación de acuerdo con la norma NAV 3-0-5.1.	4.1 Revisión frecuente de la norma.			1 HORA	1 HORA	1 HORA	1 HORA	4 HORAS
	4.2 Elaboración de informes técnicos.			4 HORAS	4 HORAS	4 HORAS	4 HORAS	16 HORAS
Obj. 5. Elaborar una guía para la aplicación en campo del procedimiento de inspección de soldadura.	5.1 Elaboración del procedimiento.	10 HORAS	10 HORAS	10 HORAS	10 HORAS	10 HORAS	10 HORAS	60 HORAS
	5.2 Revisión y aprobación.						4 HORAS	4 HORAS
	TOTAL DE HORAS POR SEMANA	26 HORAS	22 HORAS	47 HORAS	51 HORAS	45 HORAS	49 HORAS	240 HORAS