

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE EDIFICACIÓN



CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS Y  
MICROESTRUCTURALES EN SOLDADURAS POR  
ARCO MANUAL A TOPE DEL ACERO F-1140,  
CON ELECTRODOS REVESTIDOS DE RUTILO,  
BÁSICO E INOXIDABLE

Modalidad: Científico-Técnico

PROYECTO FINAL DE GRADO

Julio 2011

Presentado por:

Daniel Enrique Ribes Sánchez

Dirigido por:

D. Manuel Pascual Guillamón

Titulación:

Grado en ingeniería de Edificación

## ÍNDICE GENERAL

	<i>PÁGINA</i>
<b>CAP 1. ANTECEDENTES Y OBJETO .....</b>	<b>1</b>
<b>CAP 2. CARACTERÍSTICAS DEL ACERO F-1140.....</b>	<b>2</b>
<b>CAP3. PROCESO DE SOLDADURA.....</b>	<b>3</b>
3.1. Conceptos .....	7
3.2. Soldabilidad.....	7
3.3. Regiones de la soldadura .....	8
<b>CAP 4. SOLDADURA POR ARCO ELECTRICO .....</b>	<b>12</b>
4.1. Concepto .....	12
4.2. Equipo de soldadura .....	13
4.3. Soldadura con electrodo .....	17
<b>CAP 5. TIPOS DE ELECTRODOS .....</b>	<b>23</b>
5.1. Electrodo de rutilo.....	24
5.2. Electrodo básico.....	26
5.3. Electrodo de acero inoxidable .....	29
<b>CAP 6. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS .....</b>	<b>31</b>
6.1. Introducción .....	31
6.2. Clasificación de ensayos no destructivos .....	32
<b>CAP 7. INSPECCION POR RADIOGRAFIAS.....</b>	<b>38</b>
7.1. Fundamentos teóricos.....	38
7.2. Componentes del tubo de Rayos X .....	40
7.3. Proceso gráfico de las radiografías.....	45
7.4. Proceso de revelado .....	48
7.5..Defectos detectables.....	50
7.6. Resultados de las radiografías.....	52
<b>CAP 8. INSPECCION POR PARTICULAS MAGNETICAS.....</b>	<b>58</b>
8.1. Fundamentos teóricos.....	58
8.2. Proceso gráfico de los ensayos .....	61

<b>CAP 9. INSPECCION POR ULTRASONIDOS .....</b>	<b>66</b>
9.1. Fundamentos teóricos .....	66
9.2. Resultados de los ensayos .....	73
<b>CAP 10. INSPECCION POR LIQUIDOS PENETRANTES .....</b>	<b>75</b>
10.1. Fundamentos teóricos .....	75
10.2. Propiedades de los líquidos penetrantes .....	77
10.3. Proceso gráfico de los ensayos .....	82
<b>CAP 11. ENSAYOS DESTRUCTIVOS .....</b>	<b>86</b>
11.1. Preparación de las probetas .....	86
11.2. Probetas para el ensayo de tracción .....	89
11.3. Probetas para el ensayo de doblado .....	90
11.4. Resultados .....	93
11.5. Conclusiones .....	100
<b>CAP 12. MICROESTRUCTURA DE LA UNION SOLDADA .....</b>	<b>101</b>
12.1. Proceso .....	101
12.2. Microestructuras .....	107
<b>CAP 13. ENSAYOS DE DUREZA .....</b>	<b>117</b>
13.1. Procedimiento .....	117
13.2. Ensayo Vickers .....	118
12.3. Resultados microdureza .....	120
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>126</b>
<b>AGRADECIMIENTOS .....</b>	<b>127</b>

## 1. ANTECEDENTES Y OBJETO DEL PROYECTO

El presente trabajo, es el desarrollo del PROYECTO FINAL DE GRADO realizado mediante la colaboración entre la Escuela Técnica Superior de Gestión de la edificación y la Escuela de ingeniería de materiales, ambas pertenecientes a la Universidad Politécnica de Valencia.

La finalidad del presente proyecto es conocer las características mecánicas del acero F-1140 así como estudiar la microestructura, soldabilidad y comportamientos mediante una serie de ensayos realizados en laboratorio del Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales.

Hay que tener en cuenta la dificultad en algunos momentos para realizar algunas de las tareas ya que para la realización de probetas se tuvieron que mandar las placas de acero a un taller externo con una pérdida de días considerable, pero ello es debido a que todo ensayo obtenido se realiza mediante una metodología de trabajo, así como, la aplicación continua de la normativa vigente En- UNE tanto en medidas, cantidades, etc....

se ha procedido al análisis del comportamiento de las diferentes soldaduras a través de ensayos mecánicos normalizados, tales como el ensayo de tracción, de doblado, de dureza y efectuando también, un estudio de la evolución de la microdureza a lo largo de las soldaduras por medio de técnicas metalográficas.

Nuestro objetivo final, además de ver el comportamiento mecánico del propio acero será, mediante tres tipos de electrodos diferentes realizados con soldaduras SMAW, averiguar que soldadura de los tres electrodos es el que tiene un mejor comportamiento frente a distintos ensayos así como reducción de problemas derivados de una mala soldabilidad o falta de penetración de la soldadura por poner algún ejemplo.



En la cual especifica la composición química exactamente con los porcentajes siguientes:

Carbono total _____	0,437%
Silicio _____	0,15 %
Manganeso _____	0,743 %
Fósforo _____	0,015%
Azufre _____	0,010%

Hemos querido llegar más allá de estos porcentajes para poder comentar algo más de este tipo de acero donde averiguamos lo siguiente.

La designación del acero queda definida por la norma UNE 36011 en España como designación C45K y número F1140.

Según la norma EN 10083-1:1997 el nombre dado es simbólica C45E y numérica 1.1191.

A partir de aquí podemos nombrar otras designaciones, las cuales serían:

Alemania DIN 17200		Reino Unido BS 970	España UNE 36011	
Designación	Número		Designación	Número
CK 45	1.1191	(080M46)	C45K	<b>F1140</b>

Francia NFA35-	Italia UNI- 7846	ISO 683- 1:1987	AISI SAE ASTM
XC 45	C45	C 45 E 4	1042

La composición química del acero, aunque difiere ligeramente en la norma EN 10083 de la inglesa o la ISO se sitúa con porcentajes comprendidos entre los límites siguientes:

**CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS Y SOLDABILIDAD DEL ACERO F-1140**


---

Carbono _____	0,42-0,50%
Silicio _____	0,40 max. %
Manganeso _____	0,50-0,80 %
Fósforo _____	0,035 max. %
Azufre _____	0,035 max. %
Cr+Mo+Ni _____	0,63 max. %

Las desviaciones admisibles entre el análisis del producto y los valores especificados para el análisis de colada:

Carbono _____	± 0,02%
Silicio _____	± 0,03%
Manganeso _____	± 0,04%
Fósforo _____	± 0,05%
Azufre _____	± 0,05%
Cr+Mo+Ni _____	± 0,05%

Los tratamientos térmicos que se siguen con este tipo de acero son los siguientes:

Tratamiento	Temperatura	Enfriamiento
Recocido de ablandamiento	670 °C - 710 °C	Aire
Recocido globular	710 °C / 6 horas ó 670 °C / 8 horas	10 °C / hora hasta 650 °C
Normalizado	840 °C - 870 °C	Aire
Temple	830 °C - 850 °C	Agua
	840 °C - 860 °C	Aceite
Revenido	500 °C - 650 °C	Aire

#### APLICACIONES:

Elementos mecánicos de responsabilidad media. Piezas estampadas, palancas, ejes, arandelas de regulación, bielas, discos de embrague, coronas de arranque, etc.

Piezas de resistencia media, de pequeños espesores y formas poco complicadas, engranajes flameados, ejes poco cargados.

En construcción se puede usar para piezas de forja que posteriormente se mecanizan y no están sometidas a esfuerzos directos, fatigas, desgastes, etc.

#### PROPIEDADES

No tiene buenas condiciones de soldabilidad.

Puede ser sometido a temple y revenido.

En el tratamiento por temple por inducción se alcanzan durezas superficiales de 55-61 HRC, capaces de soportar desgastes localizados.

#### MECANIZACIÓN:

Precisa de tratamiento de recocido o estabilizado posterior al oxicorte para eliminar la dureza superficial resultante.

#### PLEGADO:

Deficiente. Se puede mejorar la conformación aplicando recocido de ablandamiento o globular. Se recomienda conformar siempre en caliente.

Las características mecánicas del acero F-114 lo veremos más adelante en el capítulo de ensayos destructivos donde veremos sus resistencias a tracción y flexión en la soldadura que es lo que realmente nos importa, aunque estamos hablando de que el acero C45E Normalizado come con cargas de rotura mínima a tracción de 700 a 850 Mpa, un

límite elástico mínimo de 490 N/mm<sup>2</sup> , un Alargamiento mínimo (A) del 14% y una estricción (Z) mínima del 35 %.

Aunque como hemos dicho nosotros lo que realmente veremos en los ensayos son estas mismas características pero viendo como afecta la soldadura y en concreto la zona de afección del calor (ZAC) al acero y como se reduce dichas características mecánicas en el acero.

### 3. PROCESO DE SOLDADURA

#### CONCEPTOS

En un sentido amplio y generalizado, la soldadura puede definirse como la realización de una unión entre dos piezas de metal haciendo uso de las fuerzas de cohesión que derivan de un "enlace metálico". Todo proceso de soldadura debe esencialmente lograr el acercamiento de las superficies a unir a distancias del orden interatómico con el propósito de crear las condiciones propicias para que se desarrollen las fuerzas de cohesión inherentes a los enlaces metálicos. Para lo que normalmente se emplea alguna fuente de energía.

Si esta energía es el calor, se pueden llegar a fundir los bordes de los metales, los cuales se mezclan en estado líquido acercándose los átomos lo suficiente para que durante la solidificación se atraigan formando una nueva red cristalina; si en vez de calor se aplica presión se produce, en primer término, la ruptura de la capa de óxido y luego se nivelan las crestas y valles por deformación plástica, permitiendo el contacto íntimo entre las dos superficies y, por lo tanto la unión metalúrgica.

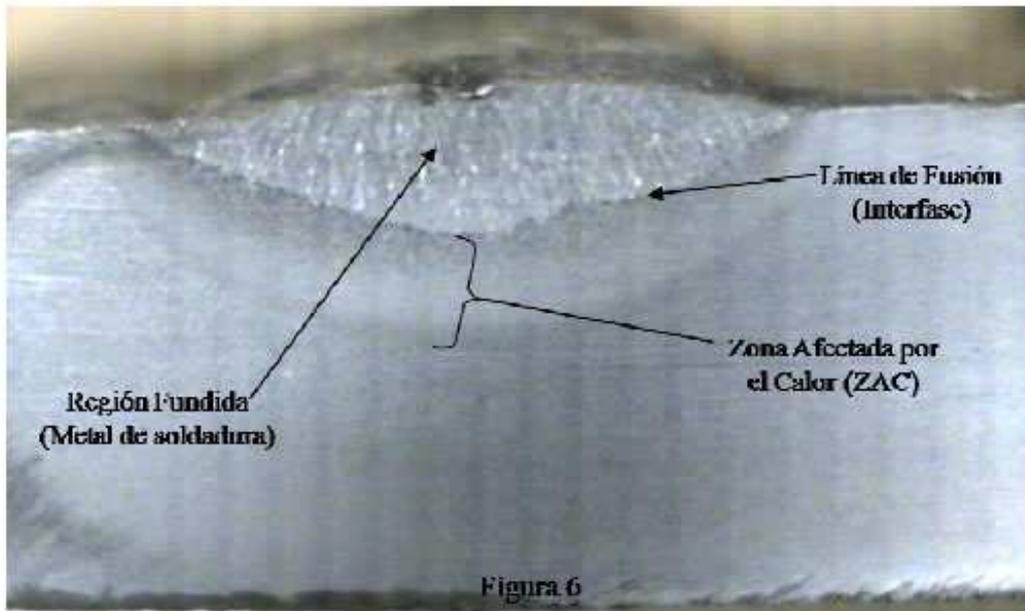
En nuestro proyecto se abarcará la soldadura en fase líquida, esto es, los materiales involucrados en la unión llegan a fundirse a través de una fuente de calor generada por un arco eléctrico (SMAW).

#### **Definición de Soldabilidad**

Es la mayor o menor facilidad con que un metal permite que se obtengan soldaduras sanas y homogéneas, que respondan a las necesidades para las que fueron concebidas incluyendo códigos de fabricación. Desde el punto de vista metalúrgico durante la soldadura en estado líquido en una región muy pequeña el material a ser soldado alcanza el estado líquido y luego solidifica. El aporte térmico suministrado se utiliza para

fundir el metal de aporte (si existe), fundir parcialmente el metal base y el resto se transfiere a través del metal de soldadura modificando la microestructura (y propiedades mecánicas) inicialmente presentes.

### Regiones presentes en la soldadura



La siguiente foto representa las regiones que se generan en una soldadura, observadas en una macrografía, estas son:

- **La Región Fundida:** es aquella adonde se produce la fusión y posterior solidificación del metal de aporte (si existe), el cual se “mezcla” con el metal base y genera el “metal de soldadura”
- **Zona Afectada por el Calor (ZAC):** es la región del metal base que sufre ciclos de calentamiento y enfriamiento debido al aporte térmico de la soldadura.

Por lo tanto, la unión soldada se divide en dos regiones: La región fundida o metal de soldadura aportado y la zona afectada por el calor (ZAC) en el material base.

El metal de soldadura es la región que corresponde a la pileta líquida de la soldadura o la que alcanza la fusión completa. Desde el punto de vista metalúrgico en esta región ocurre un proceso de solidificación de relativa complejidad con la presencia de una microestructura primaria de granos columnares cuya morfología dependerá del modo de solidificación.

A partir de la estructura primaria y como consecuencia de las subsiguientes transformaciones de estado sólido aparece una microestructura secundaria que confiere buena parte de las propiedades mecánicas del metal de soldadura y consecuentemente de la unión soldada. El metal de soldadura por su parte es resultado de un proceso de dilución entre el material o metal de aporte (en nuestro caso cada tipo de electrodo) y el metal base (el acero F-114).

En nuestro acero en concreto, es decir, acero al carbono o carbono - manganeso, el metal de soldadura presenta una microestructura secundaria de ferrita o ferrita y perlita. Dependiendo del tipo de morfología de la ferrita resultante serán sus propiedades mecánicas, particularmente la relación entre resistencia y tenacidad.

En general un alto contenido de ferrita resulta en un metal de soldadura con un buen nivel de tenacidad. Es necesario señalar que en pasadas múltiples se produce un efecto de refinamiento de la microestructura de la pasada o el cordón como consecuencia de un calentamiento por encima de la temperatura de transformación, por la acción de la pasada siguiente. Este efecto de tratamiento térmico produce una recristalización con refinamiento de grano, mejorando notablemente la tenacidad del metal de soldadura.

El metal de soldadura tiene una composición resultante que es consecuencia del aporte de metal base fundido en los bordes de la junta y el metal de aporte propiamente dicho. En consecuencia el metal de soldadura es producto de la dilución entre ambos materiales; esta última se define en % como una relación, en la sección de la junta, entre el área de metal diferente al de aporte y el área total de la sección de la junta.



Por su parte la **ZAC** es una región del metal base adyacente a la línea de fusión cuyo tamaño dependerá del aporte térmico de la soldadura.

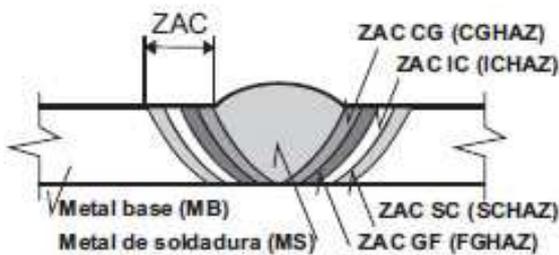
En la ZAC se producen transformaciones metalúrgicas de estado sólido, similares a las que ocurren en los tratamientos térmicos. La ZAC se puede subdividir en zonas diferenciadas desde el punto de vista micro-estructural en función del tipo de transformación que se produce en el acero.

La zona adyacente a la línea de fusión está caracterizada por una micro-estructura de granos gruesos donde se alcanza una temperatura por encima del punto crítico superior del acero produciendo austenitización con crecimiento de grano. El efecto del grano grueso deteriora la tenacidad haciendo que la ZAC, en esa región, sea más susceptible a la propagación de una fisura.

Además, dependiendo del aporte térmico, la velocidad de enfriamiento y la composición del acero pueden originarse, por transformación, fases duras o frágiles sensibles a la aparición de fisuras.

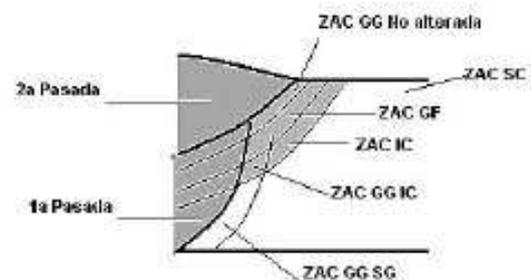
A la región de grano grueso le sigue una región de transformación de fase que determina una micro-estructura de grano fino, en general, de buenas propiedades mecánicas.

Finalmente tiene lugar una región subcrítica con transformaciones parciales, similares a las del recocido subcrítico de un acero, cuyo límite es la aparición de material base no afectado.



ZAC CG (CGHAZ):  
Región de grano grueso o de crecimiento de grano  
ZAC GF (FGHAZ):  
Región de grano fino o de recristalización  
ZAC IC (ICHAZ):  
Región intercrítica o parcialmente transformada  
ZAC SC (SCHAHAZ):  
Región subcrítica o de recocido subcrítico

**Figura 2** | Regiones de la ZAC en la soldadura de una sola pasada, entre paréntesis las siglas correspondientes a la nomenclatura en inglés [3]



ZAC CG IC (ICGHAZ ó IRCGHAZ): Región ZAC de grano grueso (1ª pasada) recalentada intercríticamente (2ª pasada)  
ZAC CG SC (SCGHAZ ó SRCGHAZ): Región ZAC de grano grueso (1ª pasada) recalentada subcríticamente (2ª pasada)

**Figura 3** | Regiones de la ZAC en una soldadura multipasada, entre paréntesis las siglas correspondientes a la nomenclatura en inglés [3]

La figura 2 muestra un esquema de la ZAC en la soldadura de una sola pasada y la figura 3 para soldadura multipasada. Esta última permite un revenido tanto del metal de soldadura como de la ZAC, refinando la microestructura y mejorando las propiedades mecánicas de la misma.

## 4. SOLDADURA POR ARCO ELECTRICO

### CONCEPTO

La Soldadura por Arco Eléctrico se realiza poniendo a dos conductores en contacto; y se los somete a una diferencia de potencial, de esta manera se establece entre ellos un flujo de corriente.

Luego se los separa y se provoca una chispa para ionizar el gas o el aire que los rodea, consiguiendo de este modo el paso de corriente, aunque los conductores no se hallan en contacto.

De esta manera creamos un arco eléctrico entre ellos por transformación de la energía eléctrica en energía luminosa y calórica.

De hecho, el calor producido por el arco no solo es intenso sino que además está focalizado, lo cual resulta ideal para efectuar la soldadura. Se alcanzan así temperaturas de 3.500°C.

En ese circuito eléctrico formado por los electrodos y el arco, la intensidad de la corriente depende de la tensión, y la de la resistencia, del circuito. Al acercar o alejar los electrodos, varía la resistencia y la intensidad, por lo tanto, la energía se transforma en calor, haciendo que la soldadura no sea uniforme.

Para lograr soldaduras uniformes, es necesario durante el proceso de soldado, mantener la distancia constante entre electrodos.

## EQUIPO DE SOLDADURA

El equipo para soldar del que se ha dispuesto en el presente proyecto, se muestra en la siguiente foto.



*Equipo de soldadura del taller del DIMM utilizado en el proyecto*

A continuación se presentan los enseres necesarios que hacen posible el proceso de soldeo y que deben ser utilizados de forma correcta para su buen funcionamiento.

**Pinza portaelectrodo.** Esta pinza es de cobre o de latón a fin de que conduzca bien la corriente y de que se caliente lo menos posible. Lleva incorporado un mango rodeado de una capa de material aislante.



En el mercado hay varios tipos de pinzas, entre ellas unas con fijación de electrodo por un mango que hace de palanca y otras con fijación automática por resorte. Algunas van provistas de un botón interruptor que permite abrir y cerrar el circuito.

La pinza debe de estar perfectamente sujeta al cable y tener sus mordazas con cantos agudos, de manera que las superficies de contacto con el electrodo estén siempre limitadas y así se asegure bien un buen contacto. Cabe señalar, que para la utilización de intensidades superiores a 300 amperios es necesario disponer de una pinza mucho más maciza y, por consiguiente, más pesada que la de uso convencional.

**Pinza de masa.** Puede estar constituida por unas sencillas prensillas. También debe mantenerse en buen estado de limpieza y sólidamente sujeta al cable de masa.



**Piqueta.** Este martillo especial sirve para picar la escoria; posee un lado cortante y una punta por el otro lado, que deberán mantenerse siempre agudos para ser eficaces.



**Cepillo metálico.** Se tendrán preferiblemente dos, uno ancho y otro estrecho de 25 a 30mm; es muy útil para la limpieza de los cordones ejecutados en ángulos entrantes o lugares poco accesibles.



*Cepillado para limpieza del cordón de soldadura*

**Careta contra radiaciones.**

Suele ser de triplex, fibra o madera y con los lados bien anchos. Está equipada con un vidrio claro transparente por el lado de trabajo y otro inactínico o de color apropiado por el lado de la cara.



El vidrio claro transparente debe de reemplazarse cuando está lo bastante picado por salpicaduras, pues dificulta la visibilidad del baño de fusión. Hay muchas tonalidades de vidrios de color, tanto más fuertes cuanto mayor sea la intensidad de corriente con la que se trabaja.

Para trabajos especiales en los que se requiera tener una mano libre, se dispondrá de una careta de tipo casco que permite levantar el vidrio. En general, la utilización del casco es mucho más segura, pues permite una mayor autonomía de trabajo.

En el mercado actual existen caretas con un sensor de iluminación que permiten disponer del cristal claro para posicionar el electrodo, y cuando se inicia el contacto del electrodo con la pieza, automáticamente éste se oscurece.



*Careta con sensor de iluminación*

**Caretas de picado de la escoria.** Suelen llevar cristales claros transparentes y protegen frente a las proyecciones de material que se esté eliminando.

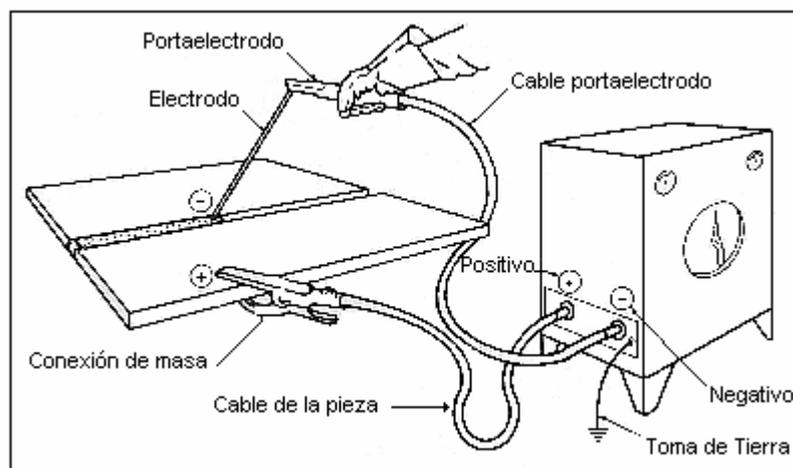
## SOLDADURA POR ARCO ELÉCTRICO CON ELECTRODO

El arco eléctrico es una descarga continuada entre dos conductores separados ligeramente, por donde pasa la corriente al hacerse conductor el aire o el gas comprendido entre los mismos. El arco eléctrico es la fuente de calor que utilizan muchos de los procesos de soldadura por fusión.

### Polaridad

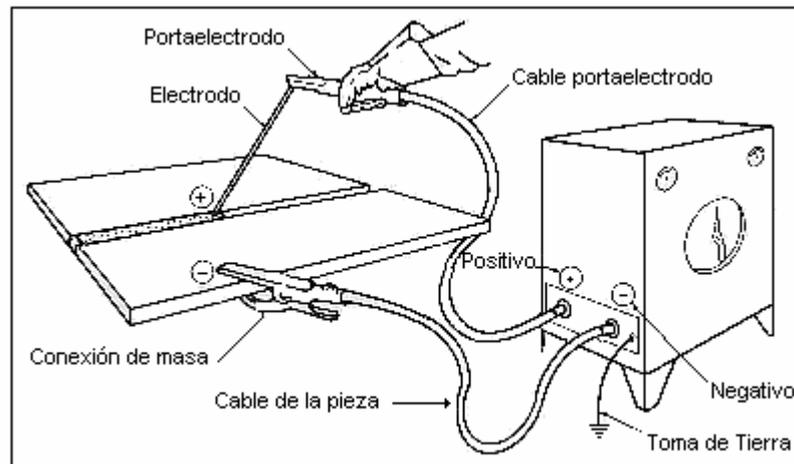
Para establecer un arco eléctrico entre un electrodo y la pieza a soldar se puede emplear corriente continua o corriente alterna. Si utilizamos corriente continua se pueden diferenciar entre conectar el electrodo al terminal negativo y la pieza al positivo o bien conectar el electrodo al terminal positivo y la pieza al negativo.

Si conectamos el electrodo en el terminal negativo y la pieza a soldar en el positivo, se soldará con polaridad directa. Este tipo de conexión hace que la pieza se caliente y se funda más. Se obtienen cordones estrechos y de gran penetración.



*Conexión en corriente continua electrodo negativo (soldeo con electrodos revestidos)*

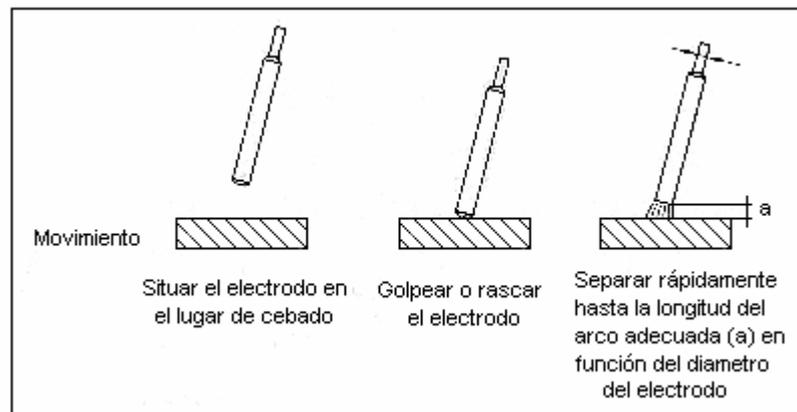
Si se conecta el electrodo al terminal positivo y la pieza a soldar en el negativo, se estará soldando con polaridad inversa. Con este tipo de polaridad, se obtiene en general, un baño relativamente ancho, con poca penetración, consiguiéndose un desgaste acelerado del electrodo.



*Conexión en corriente continua electrodo positivo (soldeo con electrodos revestidos)*

### **Establecimiento o cebado del arco**

El arco se establece golpeando ligeramente el extremo del electrodo sobre la pieza en las proximidades del lugar donde el soldeo vaya a comenzar, a continuación se retira lo suficientemente rápido para producir un arco de la longitud adecuada. Otra técnica de establecimiento del arco es mediante un movimiento de raspado similar al que se aplica para encender una cerilla. Cuando el electrodo toca la pieza, se manifiesta una tendencia a mantenerse juntos, lo cual se evita por medio del golpeteo y raspado. Cuando el electrodo se pega es necesario apartarlo rápidamente para evitar sobrecalentamientos.



*Movimiento del electrodo para el cebado del arco*

### **Longitud del arco**

La longitud del arco es la distancia desde el extremo del electrodo a la superficie de la pieza. La longitud del arco depende del tipo de electrodo a emplear, su diámetro, la posición de soldeo y la intensidad. En general, la longitud del arco debe de ser igual al diámetro del electrodo, excepto cuando se emplee el electrodo de tipo básico, que es igual a la mitad del diámetro y en los electrodos de contacto y gran penetración en los cuales la longitud del arco es nula.

### **Tipos de electrodos y revestimientos**

El procedimiento de soldeo eléctrico por arco se caracteriza por la creación y mantenimiento de un arco entre un hilo metálico denominado electrodo y la pieza a unir. El electrodo realiza una doble misión: de conductor de la energía eléctrica necesaria para la fusión y de metal de aportación.

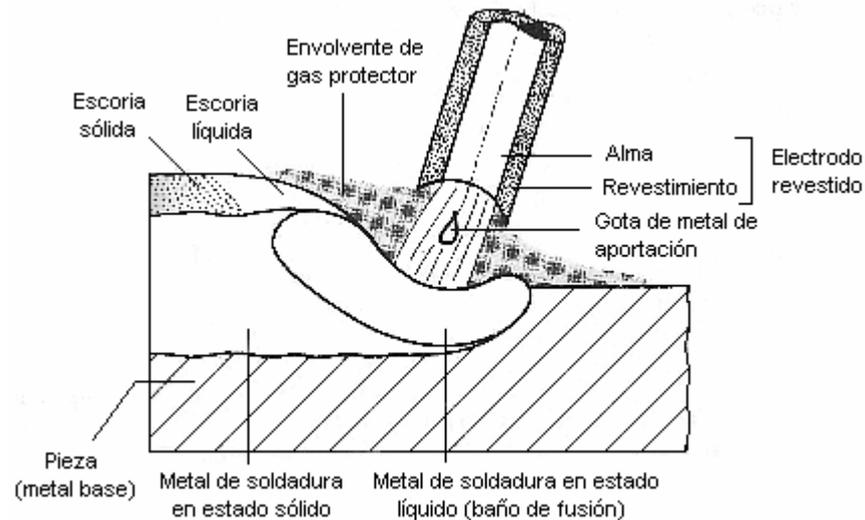
Los electrodos están generalmente constituidos por un alma de metal y un revestimiento que lo rodea. La composición y el grosor del revestimiento definen las características del electrodo a utilizar.

Los electrodos desnudos carecen de revestimiento. Presentan un gran número de inconvenientes, tanto desde el punto de vista de funcionamiento del arco, como del de las cualidades físicas del metal aportado. Este tipo de electrodos sueldan mal, pues el cordón resultante es desigual y poroso y no ofrece buenas características resistentes a la unión.

Los electrodos revestidos están constituidos por un núcleo metálico y un recubrimiento. Este recubrimiento es un compuesto con base de materias orgánicas y minerales tales como ferromanganeso, rutilo, espato flúor, óxidos de manganeso y aglutinantes como los silicatos alcalinos solubles. Cada elemento realiza una función, ya sea durante la fusión o la solidificación. Las principales funciones del revestimiento son:

- Estabilizar el arco eléctrico mediante los gases que se forman al fundirse y facilitar el cebado e inicio del arco eléctrico.
- Proteger el metal fundido de la entrada de oxígeno y nitrógeno del aire que sería muy perjudicial para la soldadura. Para ello, se producen gases que envuelven el arco y escoria que recubre el metal fundido hasta que solidifique y se enfríe.

- Aportar elementos metálicos para mejorar las características del metal base.



Los electrodos revestidos se clasifican según el grosor de su recubrimiento en electrodos de **revestimiento delgado** y electrodos de **revestimiento grueso**. En los primeros la relación entre el diámetro exterior del revestimiento y el diámetro del alma es aproximadamente de 1,1. Cuando esta relación es igual o superior a 1,3 se habla de electrodos de revestimiento grueso. El revestimiento **semigrueso** es aquel cuya relación entre el diámetro exterior del revestimiento y el diámetro del alma queda comprendida entre 1,1 y 1,3. El perfeccionamiento de los electrodos de revestimiento grueso, ha sido la causa de la baja demanda actual en el mercado de los de revestimiento semigrueso. Los electrodos de revestimiento delgado tienen ventajas técnicas y económicas en ciertos trabajos de reparación y de relleno. Actualmente, en el 98% de las soldaduras, se utilizan electrodos de revestimiento grueso.

La fabricación de los electrodos se hace, bien por inmersión o bien mediante máquinas de extrusión basadas en el principio de hilatura. Los

electrodos con revestimiento delgado se recubren generalmente por inmersión, y los de revestimiento grueso por, presión.

Es importante mencionar que los electrodos revestidos pueden presentar defectos como consecuencia de la calidad del alma del electrodo o también de la calidad del revestimiento. Los defectos pueden variar según el sistema de fabricación. Así, el metal del alma debe ser cuidadosamente escogido; su composición debe ser constante y exenta de impurezas. El revestimiento puede presentar numerosos defectos que influyen sobre la calidad de la soldadura:

- Mala fusión;
- Variación de la composición del revestimiento;
- Fisuras de fabricación;
- Gran fragilidad;
- Centrado defectuoso;
- Espesor variable a lo largo del electrodo;
- Baja resistencia a la humedad.

En vez de realizar una clasificación de los electrodos, en el siguiente capítulo veremos los electrodos utilizados en este proyecto y sus características.

## 5. TIPOS DE ELECTRODOS UTILIZADOS EN PROYECTO

Durante los anteriores capítulos ha quedado claro que el proceso de soldadura va a realizarse con soldadura tipo SMAW por arco eléctrico. Pero lo que realmente es el objetivo del proyecto es saber con qué tipo de electrodo logramos una soldadura con unas características mecánicas superiores al resto de electrodos.



Electrodos reales utilizados en el laboratorio

Por lo tanto veamos las características de los electrodos a utilizar en las soldaduras que vamos a realizar en nuestro acero.

## ELECTRODOS DE RUTILO

Clasificación AWS de electrodos para aceros al carbono: AWS-E-6012 (Na) y AWS-E-6013 (K).



Electrodo de rutilo utilizado en nuestras soldaduras

### Características específicas

El principal componente de estos electrodos es el rutilo, mineral obtenido a partir de menas que en su estado natural contienen de un 88-94% de  $TiO_2$ . También puede extraerse de la ilemita, mineral compuesto por un 45-55% de  $TiO_2$  y el resto de  $Fe_2O_3$ .

La protección en estos electrodos la proporciona la escoria.

### Escorias

Pertencen al sistema  $TiO_2-FeO-MnO$  que dan como resultado titanatos de hierro o titanatos complejos. La escoria, de aspecto globular o semiglobular, tiene la viscosidad adecuada para permitir la soldadura de elementos con ajuste deficiente o cuando entre los bordes a unir existe una distancia excesiva, resultando los electrodos de rutilo idóneos en la soldadura con defectuosa preparación de juntas. La escoria se elimina con facilidad.

### Metal depositado

Contiene un buen número de inclusiones. El nivel de impurezas es intermedio entre el que presentan los electrodos ácidos y los básicos. El contenido de hidrógeno puede llegar a fragilizar las soldaduras. El contorno de las costuras en ángulo oscila entre convexo en el AWS-E-6012 a prácticamente plano en el AWS-E-6013. en cualquiera de los casos, el cordón presenta un buen aspecto.

### Arco

Fácil encendido y reencendido, incluso con elevadas tensiones de vacío en la fuente de corriente. La pequeña proporción de celulosa del revestimiento permite una elevada intensidad de corriente. La cantidad de elementos refractarios del recubrimiento origina un arco tranquilo, de mediana penetración.

### Parámetros de uso

Tensión de cebado: entre 40 y 50 V.

Se emplean con corriente alterna o con corriente continua, en ambas polaridades.

### Aplicaciones

Estos electros, fáciles de encender y reencender, poco sensibles a la humedad, escasas salpicaduras y favorable eliminación de escoria, que permiten una razonable velocidad de soldeo constituyen una gama de consumibles muy apreciada.

Resultan por su fácil manejo en cualquier clase de montaje, la escasa influencia de las condiciones ambientales y por ser adecuados para emplearse en todas las posiciones, idóneos para todo tipo de soldaduras siempre que no se requiera una elevada tenacidad. Los principales campos de aplicación son las estructuras metálicas, en construcciones de calderas y construcciones navales.

## ELECTRODOS BÁSICOS

Clasificación AWS de electrodos para aceros al carbono: AWS-E-7015 (Na) poco frecuentes y AWS-E-7016 (K) muy utilizados



Electrodo básico utilizado en nuestras soldaduras

### Características específicas.

Los componentes principales son el carburo cálcico y el fluoruro cálcico. El revestimiento, que no contiene celulosa ni arcilla, proporciona un gas protector a base de CO<sub>2</sub> procedente del mármol y del fluoruro de silicio formado a partir de la fluorita e espato flúor, en reacción con el SiO<sub>2</sub>.

Funden a temperaturas muy elevadas (aprox. 2.000 °C), razón por la cual necesitan un fundente en su composición, como el espato flúor.

La elevada proporción de TiO<sub>2</sub> y de silicato potásico, permiten su uso en corriente alterna. Son fuertemente higroscópicos, por lo que precisan de ciertas precauciones para evitar que una retención de humedad origine porosidades en el metal depositado y fisuraciones bajo el cordón en el soldeo de aceros ferríticos de alta resistencia o límite elástico.

### Escorias.

Pertencen a los sistemas CaO-SiO<sub>2</sub>, 2CaO-SiO<sub>2</sub> y 3CaO-SiO<sub>2</sub>. La escoria es poco abundante, de color pardo y aspecto brillante. Su fluidez se

controla agregando espato flúor al revestimiento. Sube a la superficie con rapidez por lo que son poco probables las inclusiones. Se elimina con menos facilidad que la de los otros tipos de electrodos.

### Arco.

En general, la velocidad de fusión no es elevada ni tampoco soportan grandes intensidades de corriente. Ofrecen una velocidad de soldeo razonable en posición horizontal o cornisa y más rápida en vertical ascendente, porque en esta posición admiten una intensidad de corriente más alta que otros electrodos.

La longitud de arco es más corta que en el caso de los rutilos. La tensión de cebado es elevada, aprox. 65 V. Por esta razón, algunos fabricantes proceden a impregnar de grafito, excelente conductor eléctrico, uno de los extremos del electrodo, para facilitar de esta manera el encendido del arco. Los básicos son más difíciles de manejar que los otros electrodos.

### Metal depositado

En el momento de la fusión se produce una verdadera micrometalurgia, con fijación de elementos metálicos en el metal fundido. Pueden obtenerse así, por adición de elementos adecuados tales como Mn, Cr, Ni, Mo, etc. soldaduras de elevadas características mecánicas y de alta resistencia contra determinados agentes corrosivos. El metal depositado se encuentra prácticamente exento de impurezas, libre de hidrógeno y de porosidad, si el revestimiento está seco. Posee además una elevada capacidad de deformación (aprox. 30%) y presenta una alta tenacidad.

### Precauciones específicas

Si el electrodo, por su higroscopicidad, ha captado humedad deposita un metal poco dúctil y, en determinadas circunstancias, propenso

a fisuración bajo el cordón. Para evitar ambos fenómenos, los electrodos básicos que hayan estado expuestos a un ambiente húmedo, deben secarse siguiendo estrictamente las recomendaciones de su fabricante.

En nuestro caso, la primera prueba que se realizó con este tipo de electrodos dio lugar a la formación de pequeños cráteres en el cordón de soldadura debido a la humedad del propio electrodo por lo que para realizar una segunda soldadura se introdujeron durante unas horas los electrodos básicos en un horno del laboratorio del DIMM.



Horno en el DIMM



Electrodos a 133 °C

La temperatura de secado en horno o estufa y el tiempo necesario de permanencia a esa temperatura deben ser los adecuados a la composición del revestimiento, que sólo el fabricante conoce la exactitud. En efecto, la humedad absorbida se encuentra en forma de hidrato lo que requiere temperaturas elevadas para extraer el agua atrapada en los cristales.

### Aplicaciones.

El campo de aplicación es muy amplio. Una de las ventajas de los electrodos básicos es que pueden eliminar el azufre por su reacción con el

Manganeso, formando compuestos que pasan a la escoria, por lo que la soldadura realizada con este tipo de electrodos muestra una gran resistencia al agrietamiento en caliente.

El metal depositado es poco sensible a la fisuración, incluso en soldaduras sometidas a fuertes tensiones de embridamiento por condiciones de rigidez.

Se utilizan ampliamente en la soldadura de estructuras metálicas, recipientes sometidos a presión, construcción naval y maquinaria. Para resolver el problema de su fuerte higroscopicidad, actualmente se están desarrollando electrodos básicos menos propensos a captar humedad: electrodos LMA (Low Moisture Absortion).

### **ELECTRODOS DE ACERO INOXIDABLE**

Clasificación AWS de electrodos para aceros al carbono: AWS-E-308L-17 EN 1600:E19 9 LR 12



#### **Características específicas.**

Electrodo rutilo con muy bajo contenido de carbono, especial para la soldadura de los aceros inoxidables tipo 18 Cr/ 10 Ni , estabilizados y no estabilizados con Titanio o Niobio.

### Escorias.

Muy bajo nivel de proyecciones y fácil eliminación de la escoria. Produce una escoria fácil de eliminar y una buena apariencia de la soldadura, lo que reduce la necesidad de operaciones de limpieza y mecanizado, ahorrando así tiempo y dinero.

### Arco.

Presenta excelente soldabilidad, arco suave y tranquilo. Fácil cebado de arco y además presenta un aspecto de cordón regular.

Puede utilizarse en todas las posiciones, es ideal para el trabajo de mantenimiento.

### Parámetros de uso

Se emplean con corriente alterna o con corriente continua, en ambas polaridades, incluyendo máquinas monofásicas de bajo voltaje, puede utilizarse con una gran variedad de fuentes de alimentación, lo que proporciona una amplia base de potenciales clientes.

Puede utilizarse con corrientes de baja intensidad, lo que reduce los riesgos de deformación y perforación de secciones delgadas.

### Aplicaciones

Debido a las características del arco de este producto, cuando se sueldan secciones de gran espesor o juntas muy estrechas, se recomienda utilizar una corriente ligeramente más intensa que la normal, aproximadamente 5-6 amperios más alta.

Este producto debe considerarse cada vez que haya que soldar aceros inoxidables. Puede utilizarse para soldar tuberías, accesorios, lámina metálicas, planchas, etc...

## 6. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

### INTRODUCCIÓN

Una prueba no destructiva es el examen de un objeto efectuado de cualquier forma que no impida su utilidad futura. Por lo tanto, Los Ensayos No Destructivos, también conocidos como END o NDT (Non Destruction Test) es una forma de ensayo de materiales y estructuras sin causar ningún daño a la pieza a inspeccionar.

Aunque en la mayoría de los casos, las pruebas no destructivas no dan una medición directa de las propiedades mecánicas, son muy valiosas para localizar defectos en los materiales que podrían afectar el funcionamiento de una pieza de una máquina cuando entra en servicio o como en nuestro caso, la inspección de la correcta realización de una soldadura.

Dicha prueba se emplea en procesos de fabricación, tales como laminados, fundidos, forjados y otras conformaciones para detectar materiales defectuosos partes componentes sean formadas o mecanizadas; para detectar componentes defectuosas antes de ensamblar; para ver posibles coqueras ocultas dentro de un metal antes de que las; grietas superficiales o no superficiales; para medir el espesor de un metal; para identificar y clasificar materiales; y para descubrir defectos que pudieran desarrollarse durante el procesamiento o el uso.

Las partes también pueden examinarse cuando están en servicio, lo que permitirá su remoción previa a la ocurrencia de un fallo. Las pruebas no destructivas se utilizan para hacer productos más confiables y económicos y lógica y principalmente para la seguridad en el campo de la construcción.

Hay cinco elementos básicos en cualquier prueba no destructiva:

**1 Fuente:** Una fuente que proporciona un medio de sondeo, es decir, algo que puede usarse con el fin de

obtener información del artículo bajo prueba.

**2 Modificación:** Este medio de sondeo debe cambiar o ser modificado como resultado de las variaciones o

discontinuidades dentro del objeto sometido a prueba.

**3 Detección:** Un detector que puede determinar los cambios en el medio de sondeo

**4 Indicación:** Una forma de indicar o registrar las señales del detector.

**5 Interpretación:** Un método de interpretar estas indicaciones.

Los ensayos son realizados bajo procedimientos escritos, que atienden a los requisitos de las principales normas o códigos de fabricación.

## CLASIFICACION DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

Algunos de los tipos de ensayo no destructivos más comunes que se pueden realizar, se clasifican atendiendo a la siguiente lista, la cual nos proporciona el tipo de defectos a localizar, y las ventajas y desventajas de cada una de las opciones.

### INSPECCIÓN VISUAL

APLICACIONES:

- Detección de daños superficiales, discontinuidades o daños estructurales en todos los materiales

**VENTAJAS:**

- Simple de usar en áreas donde otros métodos son impracticables
- Ayudas ópticas mejoran el método

**DESVENTAJAS:**

- Fiabilidad dependiente de la habilidad y la experiencia del operario
- Requiere accesibilidad para visibilidad directa de la zona

**RAYOS X****APLICACIONES:**

- Detección de flujos internos y discontinuidades como grietas, corrosión, variaciones de espesor o inclusiones

**VENTAJAS:**

- No requiere de desarmado de piezas
- Es muy sensible y proporciona una impresión en película

**DESVENTAJAS:**

- Peligro de radiación
- Se necesita personal entrenado y equipos de tratamiento de imágenes
- Requiere de corriente externa
- Requiere equipamiento especial para situar el tubo de rayos x y la película

**ULTRASONIDOS****APLICACIONES:**

- Detección de discontinuidades en la superficie y cerca de la superficie mediante técnicas de pulsos y ecos

**VENTAJAS:**

- Rápido y fácil de operar
- Resultados inmediatos
- Alta precisión, transportable y alta sensibilidad

**DESVENTAJAS:**

- Se requiere operadores entrenados
- Requiere corriente externa
- La orientación de la grieta debe ser conocida para seleccionar el tipo de onda usada
- Se requieren patrones para ajustar el instrumento

**PARTÍCULAS MAGNÉTICAS****APLICACIONES:**

- Detección de discontinuidades en materiales ferromagnéticos de cualquier tipo, en la superficie o cerca de ésta.

**VENTAJAS:**

- Método simple, fácil, portable y rápido

**DESVENTAJAS:**

- Las piezas deben ser limpiadas antes y desmagnetizadas después
- El flujo magnético debe ser normal al plano del defecto

**LÍQUIDOS PENETRANTES****APLICACIONES:**

- Detección de grietas superficiales en todos los metales

**VENTAJAS:**

- Simple de usar, preciso y fácil de interpretar

**RESONANCIA****APLICACIONES:**

- Detección de delaminaciones, roturas del núcleo en materiales compuestos y huecos

**VENTAJAS:**

- Puede ser realizada desde una superficie
- Tiene una lectura directa
- No requiere preparación de la superficie ni remover la pintura

**DESVENTAJAS:**

- Pierde sensibilidad con el incremento de espesor del material
- Requiere corriente externa

**TERMOGRAFÍA****APLICACIONES:**

- Detección de agua en el sandwich de honeycomb
- Detección de corrosión
- Detección de delaminación

**VENTAJAS:**

- Capacidad de captar imágenes
- No hay contacto directo
- Método rápido

- Bueno para detectar agua en el material compuesto

**DESVENTAJAS:**

- Necesita ser suministrado de agua caliente, lámparas,, mantas térmicas, etc
- El tratamiento superficial o la pintura pueden influir en el resultado
- No se puede repetir en un corto período de tiempo
- Tiene limitada la profundidad de inspección

**CORRIENTES INDUCIDAS****APLICACIONES:**

- Detección de discontinuidades en superficies metálicas, grietas, corrosión intergranular y tratamientos térmicos
- Medida de la conductividad para determinar áreas dañadas por el fuego

**VENTAJAS:**

- Útil para chequeo de taladros de unión para la localización de grietas
- Sistema rápido, sensible y portable

**DESVENTAJAS:**

- Sensible a combinaciones y variaciones en el material
- Requiere de probetas especiales para cada aplicación

Aunque hay en uso una gran variedad de pruebas no destructivas garantizadas, los métodos de prueba o inspecciones no destructivas que vamos a realizar a nuestras piezas soldadas son:

Radiografía

Inspección de partículas magnéticas

Inspección por líquidos penetrantes

Inspección por ultrasonidos

Estos ensayos que vamos a utilizar los clasificaremos de acuerdo al alcance que poseen en cuanto a la detección de fallos, por lo que se dividirán los mismos de acuerdo a los siguientes parámetros:

**Discontinuidades Superficiales:**

- Ensayo de líquidos penetrantes
- Ensayo de partículas magnéticas

**Discontinuidades Internas:**

- Radiografía
- Ensayo por ultrasonidos

Ensayos aplicables para la detección de discontinuidades del proceso de soldaduras superficial abierto al exterior y para la detección de discontinuidades internas del acero F-.1140, abiertas o no al exterior

## 7. INSPECCIÓN POR RADIOGRAFIAS

### FUNDAMENTOS TEÓRICOS

La radiografía es un método de inspección no destructiva que se basa en la absorción diferenciada de radiación penetrante por la pieza que esta siendo inspeccionada.

Esa variación en la cantidad de radiación absorbida, detectada mediante un medio, nos indicará, entre otras cosas, la existencia de una falla interna o defecto en el material.

La radiografía industrial es entonces usada para detectar variaciones de una región de un determinado material que presenta una diferencia en espesor o densidad comparada con una región vecina, en otras palabras, la radiografía es un método capaz de detectar con buena sensibilidad defectos volumétricos.

### Rayos-X

Se trata de una radiación electromagnética penetrante, con una longitud de onda menor que la luz visible, producida bombardeando un blanco generalmente de wolframio, con electrones de alta velocidad.

### Naturaleza de los rayos-X

Los rayos X son radiaciones electromagnéticas cuya longitud de onda va desde unos 10 nm hasta 0,001 nm (1 nm o nanómetro equivale a  $10^{-9}$  m). Cuanto menor es la longitud de onda de los rayos X, mayores son su energía y poder de penetración. Los rayos de mayor longitud de onda, cercanos a la banda ultravioleta del espectro electromagnético, se conocen como rayos X blandos; los de menor longitud de onda, que están más próximos a la zona de rayos gamma o incluso se solapan con ésta, se denominan rayos X duros.

Los rayos X formados por una mezcla de muchas longitudes de onda diferentes se conocen como rayos X 'blancos', para diferenciarlos de

los rayos X monocromáticos, que tienen una única longitud de onda. Tanto la luz visible como los rayos X se producen a raíz de las transiciones de los electrones atómicos de una órbita a otra. La luz visible corresponde a transiciones de electrones externos y los rayos X a transiciones de electrones internos.

Los rayos X se producen siempre que se bombardea un objeto material con electrones de alta velocidad. Gran parte de la energía de los electrones se pierde en forma de calor; el resto produce rayos X al provocar cambios en los átomos del blanco como resultado del impacto. Los rayos X emitidos no pueden tener una energía mayor que la energía cinética de los electrones que los producen. La radiación emitida no es monocromática, sino que se compone de una amplia gama de longitudes de onda, con un marcado límite inferior que corresponde a la energía máxima de los electrones empleados para el bombardeo.

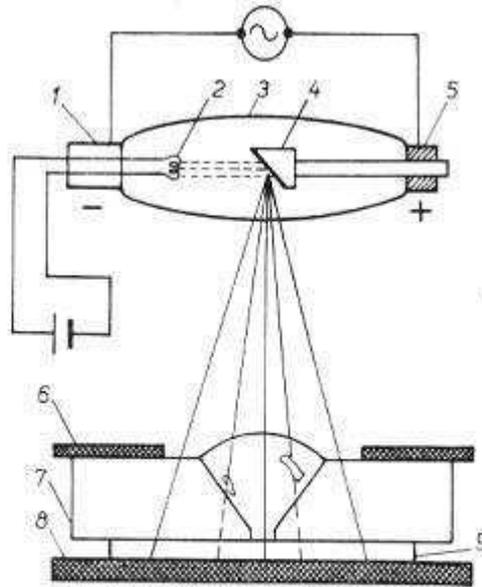
Estos rayos no sufren desviación alguna por efecto de campos magnéticos o eléctricos (no son partículas cargadas, ni sus espines están orientados); se propagan por tanto en línea recta, excitan la fosforescencia e impresionan placas fotográficas.

La principal característica de los rayos X es que atraviesan los cuerpos opacos sin reflejarse ni refractarse, siendo absorbidos en mayor o menor grado según el espesor y la densidad del material, y la longitud de onda de la radiación. Alcanzan así a impresionar una película o placa fotográfica, situada en el lado opuesto del material.

Los defectos de los materiales y soldaduras como grietas, bolsas, inclusiones, etc. de distintas densidades, absorben las radiaciones en distinta proporción que el material base, de forma que estas diferencias generan detalles de contraste claro-oscuro en la placa fotográfica colocada detrás de la pieza. Esto es lo que permite identificar defectos en la inspección de una soldadura por radiografía.

Para facilitar la labor se usan colecciones de radiografías patrón, en las cuales los defectos están claramente identificados para unas condiciones dadas de tipo de material y tipo de soldadura

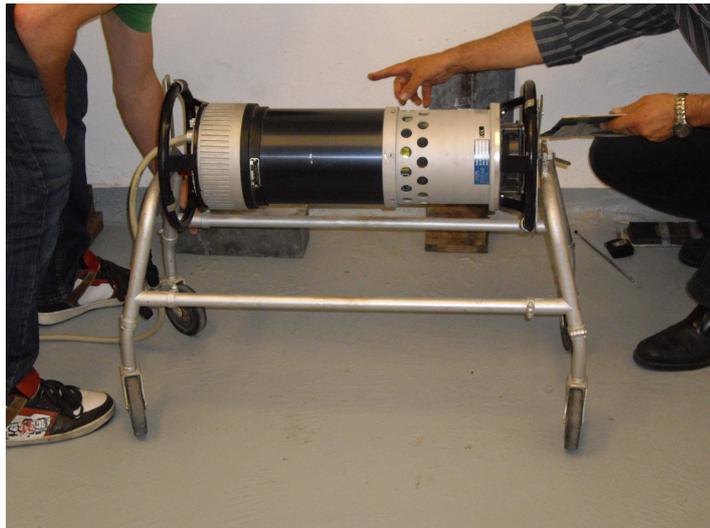
### Esquema Del Aparato Radiográfico



Examen de una soldadura con rayos X.

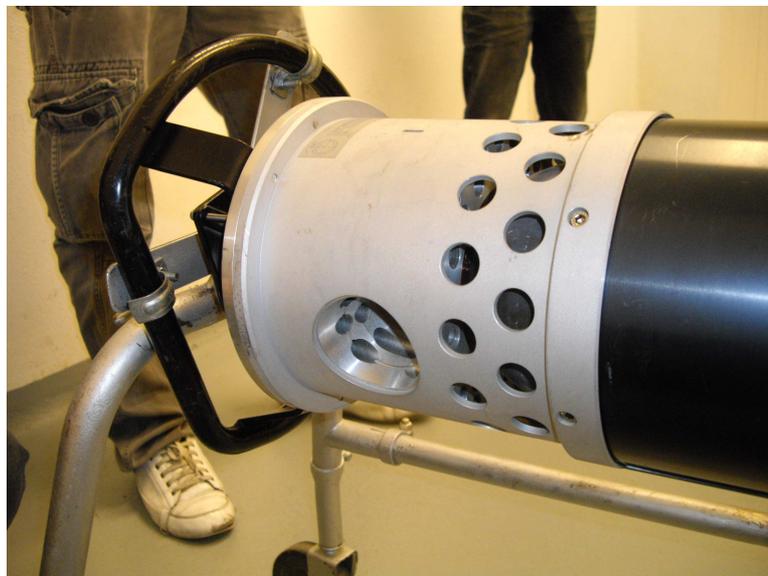
1. Cátodo de cobre. - 2. Filamento de tungsteno. - 3. Ampolla de vidrio. -
4. Anticátodo de tungsteno. - 5. Ánodo de cobre. - 6. Pantalla de plomo. -
7. Probeta. - 8. Pantalla de plomo. - 9. Placa fotográfica.

### Componentes del tubo de rayos-X



*Tubo de rayos -x utilizado en este proyecto*

Carcasa protectora: el tubo de rayos X, siempre está montado en una carcasa protectora, formada de plomo, y diseñada para controlar los serios peligros que afectaron a la radiología en sus principios, (exposición excesiva a la radiación, descarga eléctrica). La carcasa protectora proporciona también un soporte mecánico al tubo de rayos X, y lo protege frente al posible daño producido por la manipulación descuidada. Cuando se producen, los rayos X son emitidos con la misma intensidad en todas las direcciones, pero nosotros solo empleamos los emitidos a través de una sección especial del tubo de rayos X, llamada ventana. Los rayos X emitidos a través de la ventana se conocen como haz útil, los restantes que se escapan a través de la carcasa protectora son, la radiación de fuga.



*Ventana del tubo de rayos -x*

La carcasa protectora, alrededor de algunos tubos de rayos X, contiene aceite que actúa como aislante técnico y refrigerador.

Envoltura de cristal: el de rayos X, es un tipo especial de tubo de vacío, los componentes del tubo se encuentran dentro de una envoltura de cristal. Esta envoltura, que debe de ser fabricada de un vidrio que pueda soportar el tremendo calor generado, mantiene el vacío, lo cual hace posible una producción más eficaz de rayos X, y prolonga la vida del tubo. Si estuviera lleno de gas, disminuiría el flujo de electrones que van del

cátodo al ánodo, se producirían menos rayos X y se crearía más calor. La ventana del tubo es de un cristal mas fino que deja filtrar los rayos X. Es un segmento que permite una máxima emisión de rayos X con absorción mínima por la envoltura de cristal.

Cátodo:

Parte negativa del tubo de rayos X, tiene dos partes principales: el filamento y la copa de enfoque.

*Filamento:*

Es una espiral de alambre que emite electrones al ser calentado. Cuando la corriente que atraviesa el filamento es lo suficientemente intensa, de aproximadamente 4 a 5 Ampere o superior, los electrones de la copa externa del filamento entran en ebullición y son expulsados del filamento, este fenómeno se conoce como emisión termoiónica. Los filamentos suelen estar formados por Tungsteno Tórico, el Tungsteno proporciona una emisión termoiónica mayor que otros metales. Su punto de fusión es de 3410 °C, de forma que no es probable que se funda con el calor, además no se evaporiza, puesto que si lo hiciera el tubo se llenaría rápidamente de gas. La adición de un uno a un dos por ciento de Torio al filamento de Tungsteno, incrementa la eficacia de la emisión de electrones y prolonga la vida del tubo.

*La copa de enfoque:*

Es un refuerzo metálico del filamento, condensa el haz de electrones en un área pequeña del cátodo. La efectividad de la copa de enfoque depende de tres factores:

- 1- La corriente del filamento que regula la cantidad de rayos X de salida.
- 2- El tamaño del filamento impone el tamaño del foco efectivo que se produce en el ánodo. Los tubos de rayos X suelen llevar dos filamentos de diferente tamaño, que proporcionan dos puntos focales; el punto focal de tamaño pequeño se asocia con el filamento menor y se emplea cuando se necesitan imágenes de alta

resolución. El punto focal de tamaño grande se asocia con el filamento mayor y se emplea cuando se necesitan técnicas que produzcan gran cantidad de calor.

3- La situación de uno u otro suele hacerse con el selector que se encuentra en la consola de control.

### Ánodo:

Es el lado positivo del tubo de rayos X, existen dos tipos: estacionarios y rotatorios

El ánodo tiene tres funciones en el tubo de rayos X:

1- Es un conductor eléctrico

2- Proporciona soporte mecánico al blanco.

3- Debe ser un buen conductor térmico, cuando los electrones chocan con el ánodo, más del 99% de su energía cinética se convierte en calor, que debe ser eliminado rápidamente antes de que pueda fundir el ánodo. El cobre es el material más utilizado en el ánodo.

Punto focal:

Es el área del blanco desde la que se emiten los rayos X. Constituye la fuente de radiación.

Blanco: es el área del ánodo con la que chocan los electrones procedentes del cátodo. En los tubos de ánodo estacionario, el blanco consiste en una pequeña placa de tungsteno que se encuentra encastrado en un bloque de cobre. En los tubos de ánodo rotatorio, el disco que gira es el blanco, normalmente esta formado por una aleación de Tungsteno mezclada con Torio, que proporciona una resistencia adicional para soportar el esfuerzo de la rotación rápida.

El Tungsteno es el material elegido para el blanco.

### Indicadores de Calidad de imagen (penetrametros)

Los indicadores de calidad de imagen consisten en alambres o plaquetas escalonadas del mismo material que el objeto a radiografiar, cuyos diámetros o espesores representan por ej. el 1%, 2%, 3% del espesor máximo del objeto, permitiendo evaluar por comparación la calidad radiográfica.



*Penetrametro en una de las placas a radiografiar*

El indicador se coloca sobre la cara del objeto que enfrenta la radiación en la parte más alejada del film (zona de mayor espesor) y en la posición geoméricamente más desfavorable, por ejemplo, en el extremo más alejado respecto del punto en que la radiación incide normalmente.

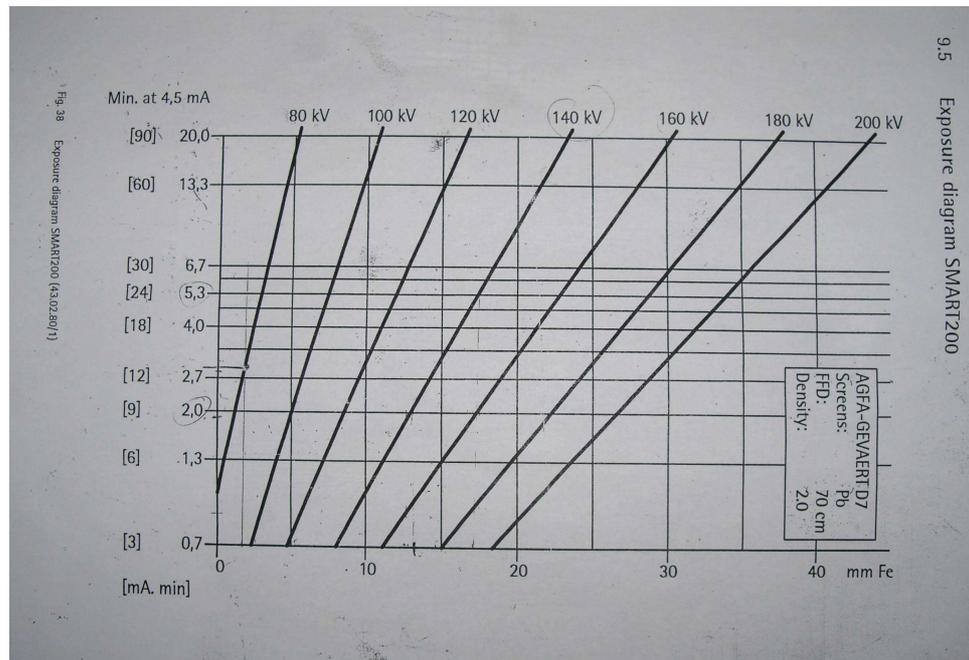
El espesor del hilo o escalón más delgado que sea visible en la radiografía, es el que permite evaluar la calidad de la técnica radiográfica cesada.

En el desarrollo del ensayo de nuestras placas de acero se utilizará este tipo de indicador de calidad de imagen:

INDICADORES DIN : De acuerdo a la norma DIN 54.109, la calidad de imagen se caracteriza por el alambre más delgado de una serie de alambres de diversos diámetros que varían según la progresión geométrica adoptada por el I.I.W. / I.I.S.. Estos van embutidos en un material plástico transparente.

### PROCESO GRAFICO DE LAS RADIOGRAFÍAS EN NUESTRO PROYECTO

Lo primero de todo es la utilización de unas graficas para saber el grado de penetración de los rayos X en nuestras placas. Para ello se mide el grosor de la soldadura y con respecto a ella se programan tiempo e intensidad como muestra la imagen.



Gráfica de tiempos e intensidades

Posteriormente se colocan en la plancha, por una parte los indicadores de calidad así como unas letras de plomo para el marcado de

las radiografías ya que al ser un material más denso que el acero luego se queda marcado en el revelado.



*Colocación de letras de plomo*

En la parte posterior se colocara el film de la radiografía.



*Colocación del film*

Colocaremos las placas a ensayar frente al tubo de rayos x. Mediremos las distancias ya que como hemos comentado ya, el haz del tubo es de forma cónica. Así nos aseguraremos que sale reflejado en el papel la totalidad de la soldadura.



Por último, colocaremos tiempos e intensidades en la máquina y esperaremos el tiempo necesario. Entonces podremos revelarlas.



## PROCESO DE REVELADO

Para revelar las radiografías dispondremos de una cámara completamente a oscuras donde dispondremos de cuatro tanques tal y como se ve en la fotografía.



*Taller de revelado*

Se preparan 4 litros de líquido en cada una de las cubetas. La dosificación se hará de la siguiente forma por cada litro: 800 ml de agua y 200 ml de líquido revelador o fijador.

Se preparan cuatro cubetas dispuestas de la manera siguiente:

1. Líquido revelador
2. Baño de parada que tendrá 30 ml. de ácido acético por litro
3. Líquido fijador
4. Lavado final con agua en circulación.



*Garrafas usadas de liquido revelador y fijador respectivamente*

Los tiempos que tendremos las placas de radiografías serán de 4 minutos en el primer tanque, luego pasaremos el film al segundo tanque entre medio y un minuto, posteriormente lo meteremos en liquido fijador durante 6 minutos y acabaremos en el lavado final durante 20 minutos. Luego dejaremos que se sequen al aire cogidos en unos bastidores



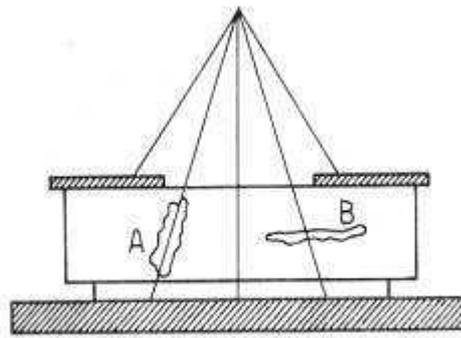
Mediante un Negatoscopio podremos ver el resultado final de nuestras radiografías. Sólo falta fotografiarlas



*Negatoscopio*

### **DEFECTOS DETECTABLES**

La norma UNE 14011 describe los defectos detectables con los rayos X sobre las uniones soldadas. Los defectos más fácilmente detectables son aquellos cuya máxima dimensión está orientada en la dirección de propagación de los rayos X. Son difícilmente detectables los defectos de poco espesor, aunque sean muy extensos, dispuestos perpendicularmente a la dirección de las radiaciones. Por este motivo el objeto debe ser examinado en distintas direcciones.



Examen con rayos X.

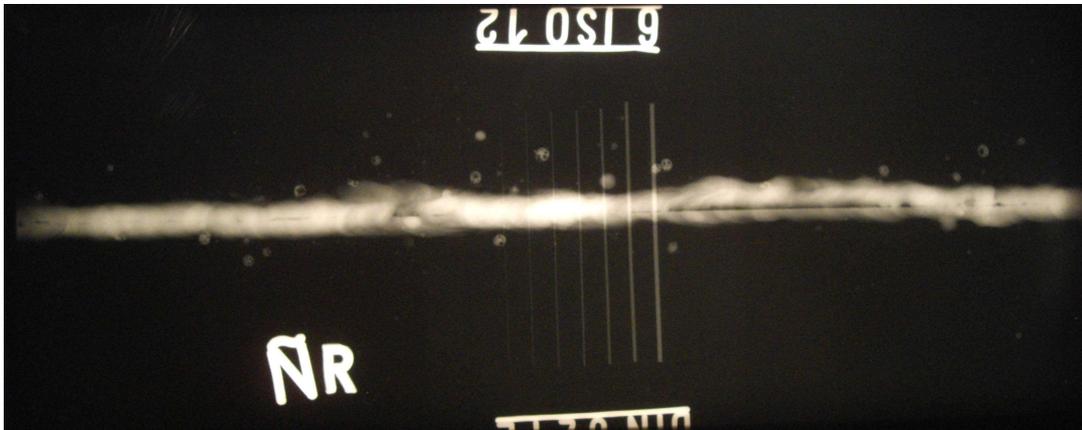
A) defecto fácilmente detectable. B) defecto difícilmente detectable.

Los defectos detectables en las soldaduras son los siguientes:

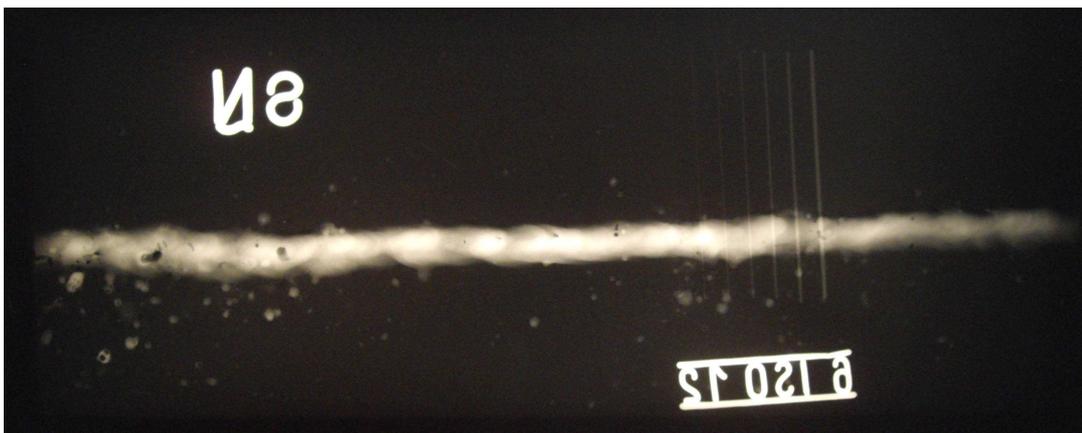
- Cavidades y porosidades (sopladuras)
- Inclusiones sólidas (escorias)
- Fisuras o microgrietas
- Falta de penetración
- Falta de fusión (despego)
- Mordeduras
- Exceso de penetración (descuelgue)

## RESULTADOS DE LAS RADIOGRAFIAS

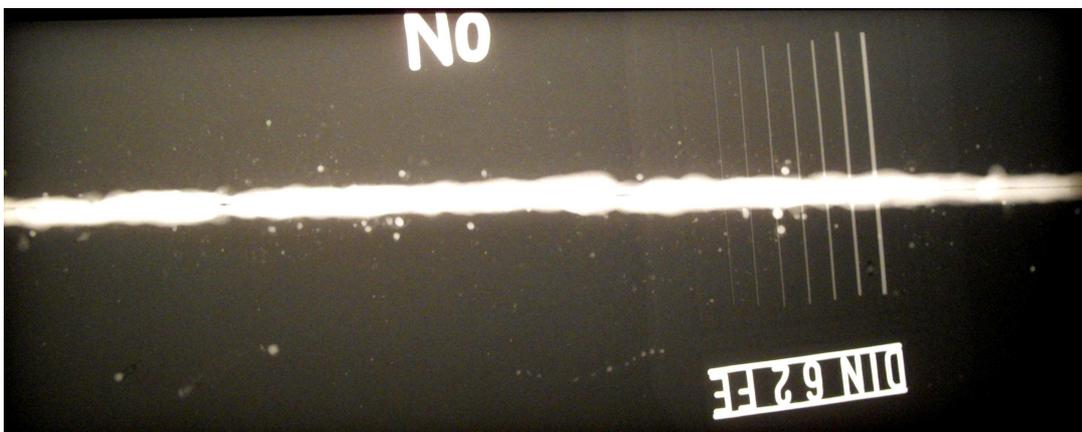
Las siguiente imágenes corresponden a nuestras soldaduras de rutilo, básico e inoxidable.



*Soldadura con electrodo deRutilo*



*Soldadura con electrodo básico*



*Soldadura con electrodo de acero inoxidable*

Una radiografía es una fotografía sombreada de un material más o menos transparente a la radiación.

Los rayos X oscurecen la película, de modo que las regiones de menor densidad que permiten fácilmente la penetración de éstos aparecen oscuras en el negativo, comparadas con las regiones de mayor densidad que absorben más radiación. De este modo, un orificio o una fractura aparecen como un área más oscura, en tanto que las inclusiones de cobre en una aleación de aluminio aparecen como un área más clara.

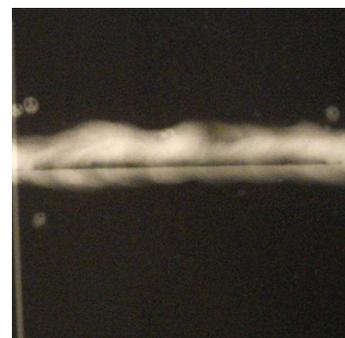
A continuación se describe cada fallo que se observan en las radiografías.

### **Soldadura de Rutilo**

Se observan cavidades y porosidades por tener menor densidad que el metal, se dejan atravesar más fácilmente por la radiación, formando unas impresiones oscuras redondeadas. Eso es debido o bien porque el metal base tiene un exceso de carbono o existe la presencia de óxidos por falta de limpieza. O bien es posible que haya una excesiva intensidad de corriente que provoca un calentamiento excesivo del electrodo y el despegue del revestimiento.



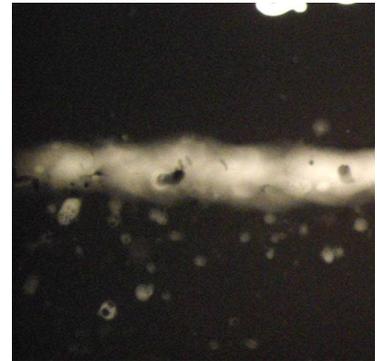
Por otra parte en la zona casi central también se observa un trazo oscuro rectilíneo y forma uniforme que es falta de fusión. La causa física de este tipo de defectos es que no se alcanza la temperatura adecuada para la fusión del metal de aporte con el metal base y por tanto no se consigue el proceso metalúrgico de soldar,



quedando afectada la unión. Puede ser causa iniciadora de fisuras que terminen en rotura.

### **Soldadura de electrodo básico**

Únicamente se observan porosidades hacia el final de la soldadura. Como hemos comentado antes, un excesivo calentamiento del electrodo es el causante de estos agujeros o poros en mitad de soldadura. También podría ser debido a una longitud de arco a la hora de soldar excesiva o la suciedad que provoca la presencia de óxidos.



### **Soldadura con electrodo de acero inoxidable**

Una radiografía muy correcta donde únicamente se detectan salpicaduras a la hora de soldar que no afectan a la resistencia de la placa y no tienen peligro alguno.

## 8. INSPECCIÓN POR PARTICULAS MAGNETICAS

### FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Éste es un método para detectar la presencia de fisuras, recubrimientos, rasgones, inclusiones y discontinuidades semejantes en materiales ferromagnéticos como el hierro y el acero. El método detectará discontinuidades de la superficie demasiado finas para apreciarse a simple vista y también detectará discontinuidades ligeramente por debajo de la superficie. No es aplicable a materiales no magnéticos.

La inspección por partículas magnéticas puede realizarse en diversas formas. La pieza que se va a inspeccionar puede magnetizarse y luego cubrirse con finas partículas magnéticas (polvo de hierro); esto se conoce como **método residual**. O bien, la magnetización y aplicación de las partículas puede hacerse simultáneamente, lo cual se conoce como **método continuo**.

Las partículas magnéticas pueden mantenerse en suspensión en un líquido que se vierte sobre la pieza, o la pieza puede sumergirse en la suspensión (**método húmedo**). En algunas aplicaciones, las partículas, en forma de fino polvo, se esparcen sobre la superficie de la pieza de trabajo (**método seco**). La presencia de una discontinuidad se revela por la formación y adherencia de un arreglo característico de las partículas sobre la discontinuidad en la superficie de la pieza de trabajo. Este arreglo recibe el nombre de **indicación** y adquiere la forma aproximada de la proyección superficial de la discontinuidad.

Cuando la discontinuidad está abierta a la superficie, el campo magnético se fuga hacia la superficie y forma pequeños polos norte y sur que atraen a las partículas magnéticas. Cuando pequeñas discontinuidades están bajo la superficie, alguna parte del campo aún podría desviarse a la

superficie, pero la fuga es menor y se atraen menos partículas, con lo que la indicación obtenida es mucho más débil.

Si la discontinuidad está muy lejos por debajo de la superficie, no habrá ninguna fuga del campo magnético y, en consecuencia, no se obtendrá indicación alguna. Es necesario emplear apropiadamente métodos de magnetización, para asegurar que el campo magnético formado esté perpendicular a la discontinuidad y lograr la indicación más clara.

De acuerdo con el carácter del campo utilizado los métodos pueden ser:

- método circular o circunferencial
- método longitudinal
- método paralelo
- método de espiral o campo de distorsión
- combinación de los anteriores

La sensibilidad del método de inspección por partículas magnéticas se ve afectada por muchos factores, incluyendo la concentración de la suspensión indicadora, el tiempo de contacto de la suspensión con la pieza, el tiempo permitido para que se formen las indicaciones, el tiempo que se mantiene activa la corriente de magnetización, y la intensidad de la corriente de magnetización.

Todas las piezas que han sido magnetizadas para su inspección deben someterse a un proceso de desmagnetización. Si estas partes se ponen en servicio sin desmagnetizarlas, atraerán limaduras, polvos metálicos, rebabas y otras partículas de acero que pueden rayar, y por tanto dañar las propias piezas.

#### Técnicas de desmagnetización

- Desmagnetización con corriente alterna
- Desmagnetización con corriente continua reversible

- Reglas:
- Magnetizar primero circularmente y luego longitudinalmente
- Magnetizar en continua y desmagnetizar en alterna son incompatibles
- Intensidad suficiente para vencer la fuerza coercitiva
- Pasar la pieza pegada a la bobina
- No dejar piezas desmagnetizadas cerca de la bobina
- Si la pieza es larga conviene que su eje sea paralelo a l de la bobina

### **Aplicaciones industriales**

- Inspección de recepción de materias primas. Pliegues, vetas, grietas en semiproductos, palanquillas, tubos etc.
- Inspección de piezas terminadas. Temples, rectificadas etc.
- Inspección de mantenimiento. Corrosión bajo tensiones, fatiga.

### **Ventajas y limitaciones**

#### Ventajas:

- Más sensible que líquidos penetrantes
- Forma imagen del defecto sobre la superficie
- No importa mucho la suciedad
- No exige calibración
- Puede detectar grietas incluso bajo de pinturas
- Piezas de cualquier tamaño

#### Limitaciones:

- Solo aplicable a materiales ferromagnéticos
- Debe de ser perpendicular a la discontinuidad

- Es necesario desmagnetizar
- La presencia de pintura o recubrimientos puede afectar a la sensibilidad
- Necesidad a veces de aplicar corrientes de gran intensidad

## PROCESO GRAFICO DE LOS ENSAYOS EN NUESTRO PROYECTO

### Preparación de superficies

Lo primero que realizamos es un desbaste de la soldadura para que se quede la superficie plana en toda la soldadura a ras del resto de chapa.

Utilizaremos una amoladora con un disco de lija para aceros y la pasaremos repetidamente en toda su longitud para conseguir una superficie lisa.

De esta manera evitaremos que se sitúen las partículas en la junta de la chapa y la soldadura y puedan moverse libremente si que choquen con nada



*Lijado de la superficie.*

### Herramientas necesarias para el ensayo

Utilizaremos un yugo magnético; este yugo crea un campo magnético desde los dos polos del mismo. Si éste lo juntamos con la pieza (necesariamente ferro-magnética) se cierra el círculo y el campo actúa.



*Yugo magnético y recipientes de partículas magnéticas*

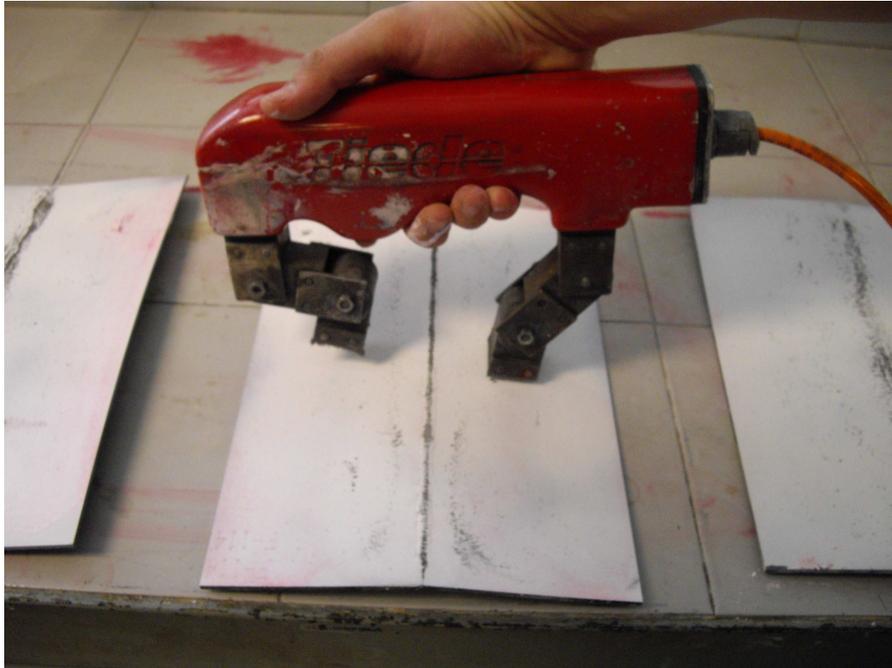
Es el momento donde verteremos las partículas, que no es otra cosa que partículas de hierro.

Estas partículas serán de dos tamaños diferentes: finas y gruesas. Así conseguiremos que las finas se muevan más fácilmente debido a los campos magnéticos ya que son más fáciles de arrastrar.

El problema está en que al ser finas, también es más fácil que éstas se depositen en pequeñas grietas de la unión de la soldadura y el metal base y nos induzcan a error, por lo que se echan también partículas más gruesas que evitan este tipo de grietas aunque es más difícil su desplazamiento.

### Realización del ensayo

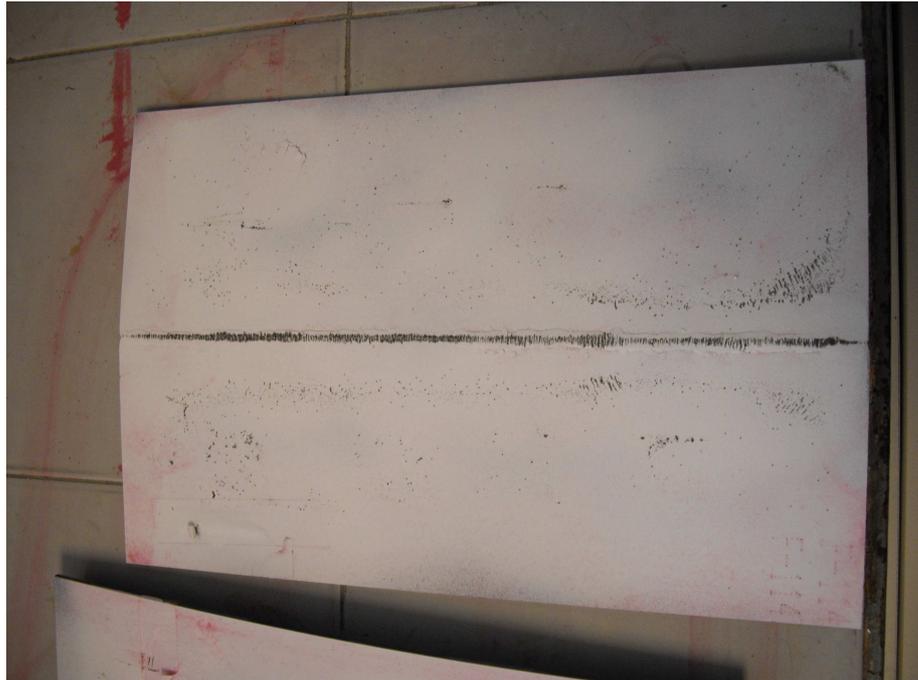
Principalmente se pintan las superficies de blanco con laca de contraste para observar el movimiento de las partículas debido al contraste de color de las mismas con el fondo blanco.



*Utilización del yugo*

Al crearse el campo, las partículas se desplazaron hacia el centro a lo largo de la soldadura ya que el yugo iba en todo momento en dirección paralela a la línea de soldadura.

Los resultados que nos llamaron la atención finalmente fueron una fina línea formada en la plancha que llevaba la soldadura de acero inoxidable. En principio se pensó en una falta de penetración de la soldadura la cual deja una línea interna sin material de aporte la cual nos crearía un vacío y por lo tanto un nuevo campo magnético apreciable con este método.



*Partículas magnéticas aplicadas en la soldadura de acero inoxidable.*

Finalmente se llegó a la conclusión de la soldadura con electrodo de acero inoxidable es un electrodo hecho con acero austenítico, es decir es un metal de aportación en la soldadura NO imantable y por lo tanto crea un campo magnético que es el que sale en a imagen sin que en su interior exista ninguna grieta.

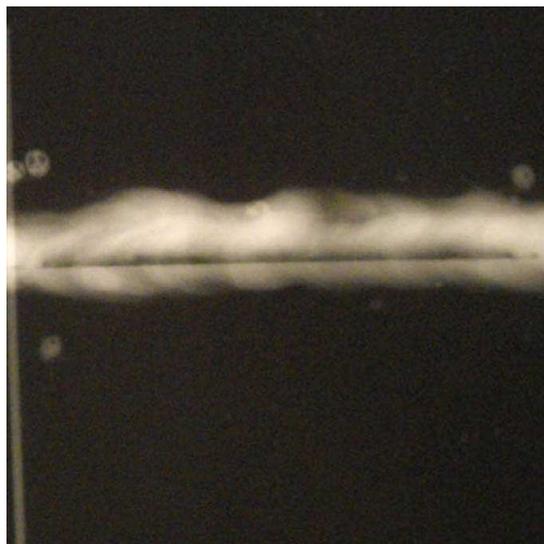
La plancha que esta soldada con electrodo básico no dio ningún tipo demuestra de defectos en la soldadura.

Por otra parte, como se ve en la siguiente imagen, en la placa de la soldadura de rutilo se apreciaba también una fina línea que podía ser origen de falta de penetración de la soldadura.



*Imagen ampliada de la acumulación de partículas en la soldadura de rutilo*

Cuando comprobamos otros ensayos (como el de rayos X, dieron lugar a la existencia de una “línea vacía” por falta de penetración por lo que en este caso si que estábamos en lo correcto: existe una fisura que crea el campo magnético que observamos en la imagen



*radiografía de la misma zona en la soldadura de rutilo*

## 9. INSPECCIÓN POR ULTRASONIDOS

### FUNDAMENTOS TEÓRICOS

El método por ultrasonidos es una prueba no destructiva, confiable y rápida que emplea ondas sonoras de alta frecuencia producidas electrónicamente que penetrarán metales, líquidos y muchos otros materiales a velocidades de varios miles de metros por segundo. Las ondas ultrasónicas para ensayos no destructivos generalmente las producen materiales piezoeléctricos, los cuales sufren un cambio en su dimensión física cuando se someten a un campo eléctrico. Esta conversión de energía eléctrica a energía mecánica se conoce como efecto piezoeléctrico.

Si se aplica un campo eléctrico alterno a un cristal piezoeléctrico, el cristal se expandirá durante la primera mitad del ciclo y se contraerá cuando el campo eléctrico se invierta. Al variar la frecuencia del campo eléctrico alterno, se puede variar la frecuencia de la vibración mecánica (onda sonora) producida en el cristal. El cuarzo es un transductor ultrasónico ampliamente utilizado. Un transductor es un dispositivo que convierte una forma de energía en otra.

El aprovechamiento del ultrasonido ha ganado espacio importante entre las técnicas de Ensayos No-destructivos. Se considera ultrasonido aquellas oscilaciones de presión que poseen frecuencias por encima de la gama audible (ésto es, superior a 20 000 Hz).

El equipamiento utilizado para la aplicación de estas técnicas es capaz de generar, emitir y captar haces de ondas muy bien definidas sujetas a las leyes de reflexión al encontrar en su trayectoria un cambio en las propiedades físicas del medio en el cual se propagan. Al ser captadas, son analizadas según el objetivo del equipamiento y con la determinación del tiempo transcurrido desde su emisión hasta su recepción, puede

conocerse la distancia recorrida, al ser la velocidad previamente establecida.



*Aparato de ultrasonidos*

El ensayo por ultrasonido es un método no destructivo, en el cual un haz sónico de alta frecuencia (125 KHz a 20 MHz) es introducido en el material a ser inspeccionado con el objetivo de detectar discontinuidades internas y superficiales. El sonido que recorre el material es reflejado por las interfaces y es detectado y analizado para determinar la presencia y localización de discontinuidades.

### **Definición y naturaleza de las ondas ultrasónicas**

Son ondas mecánicas vibratorias o sea para que sea propague el ultrasonido, se requiere que las partículas del medio ya sea líquido, aire o sólido oscilan alrededor de sus posiciones de equilibrio.

### Diferencia entre sonido y ultrasonido

Son de la misma naturaleza, lo que las diferencia es su frecuencia así:

- ondas sónicas: frecuencia entre 16 y 20000 ciclos por segundos.
- ondas ultrasónicas: frecuencias mucho mayores de 20000 ciclos por segundo.

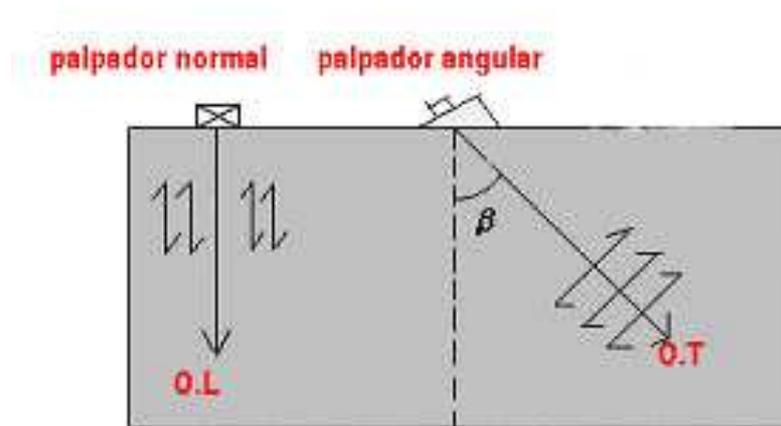
Para materiales metálicos operaremos entre 1 y 5 mhz pero se puede trabajar con frecuencias mucho mayores.

### Tipos de ondas ultrasónicas utilizadas en los ensayos

Las clasificaremos en:

O.L. Onda longitudinal: se propaga en tres medios.

O.T. Onda transversal: se propaga en sólidos únicamente.



### Impedancia acústica

Resistencia del medio a la vibración acústica de las partículas.

### Generación de ondas ultrasónicas

Para generar existen varios métodos. Para el ultrasonido se hace uso de cristales piezoeléctricos o de materiales cerámicos ferro eléctrico.

Piezolectricidad: propiedad de algunos cristales como el cuarzo de convertir energía eléctrica en energía mecánica vibratoria y viceversa. Cuarzo para altas frecuencias, mayores de 10 mhz.

Ferro electricidad: propiedad de algunos materiales cerámicos previamente polarizados de comportarse como los cristales piezoeléctricos. ej: titanato de bario, sulfato de litio.

### Palpadores o transductores

Tipos:

a. incidencia normal.



b. incidencia angular. *En la imagen un palpador de 60 grados*



Palpadores con:

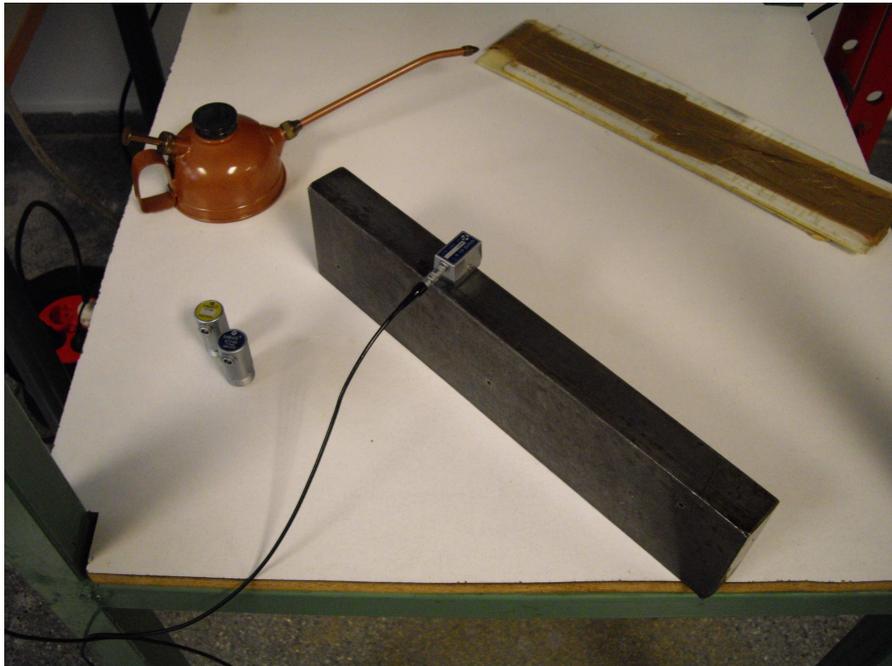
1. un solo cristal emisor y receptor.
2. doble cristal, uno emisor y otro receptor.
3. múltiples cristales para aplicaciones especiales.

### **Agentes acoplantes**

Es un medio fluido que permite que el ultrasonido pase del palpador al material de ensayo.

Los medios de acople pueden ser: grasa, aceite, vaselina, agua.

A mayor rugosidad mayor viscosidad del acoplante.



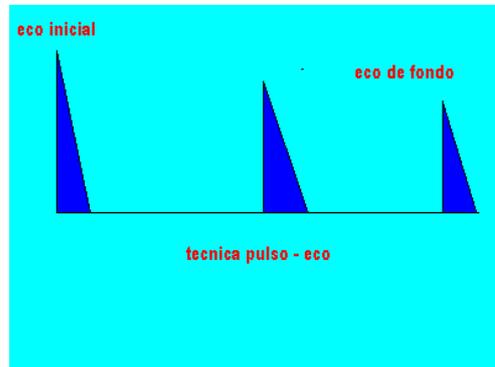
*Varios palpadores y líquido acoplante, en este caso, aceite*

### **Técnicas utilizadas en los ensayos**

Existen varias técnicas de ultrasonidos diferentes que pueden ser transmisión, resonancia o pulso - eco. Para nuestros ensayos utilizamos esta última técnica

## Pulso – eco

El método del eco-pulso utiliza sólo un transductor que sirve como transmisor y como receptor.



Se emiten pulsos de ultrasonido y se esperan reflexiones las cuales pueden proceder de superficies posteriores (palpadores normales) o de discontinuidades, por lo tanto en un osciloscopio mediante el principio piezoeléctrico aparecen ecos de fondo para cada reflexión.

Conforme la onda sonora penetra en el material sometido a prueba, parte de ella se refleja de vuelta al cristal, donde se convierte en un impulso eléctrico. Este impulso se amplía y hace visible, apareciendo como una indicación o señal sobre la pantalla del osciloscopio. Cuando la onda sonora alcanza el otro lado del material, se refleja de regreso al cristal y se ve como otra señal sobre la pantalla hacia la derecha de la primera señal. Si hay imperfección entre las superficies frontal y posterior del material, se delatará sobre la pantalla como una tercera señal entre las dos indicaciones correspondientes a las superficies frontal y posterior. Como las indicaciones en la pantalla del osciloscopio miden el tiempo transcurrido entre la reflexión del pulso desde la superficie frontal y posterior, la distancia entre indicaciones es una medida del espesor del material. Por tanto, la localización de un defecto puede determinarse con exactitud por la indicación que aparece sobre la pantalla.

En general, las superficies uniformes y lisas son más apropiadas para la prueba de pulso de mayor frecuencia; por tanto permiten detectar defectos más pequeños. La transmisión adecuada de la onda ultrasónica tiene gran influencia en la confiabilidad de los resultados de la prueba. Para partes de mayor tamaño, una película de aceite asegurará un contacto apropiado entre la unidad del cristal de búsqueda y la pieza a prueba. Las partes más pequeñas pueden colocarse en un tanque con agua, aceite o glicerina. La unidad del cristal de búsqueda transmite ondas sonoras a través del medio y penetrarán en el material que se examina. Un examen de la pantalla del osciloscopio de esta gráfica permitirá ver la presencia de tres señales. La señal de la izquierda indica el frente de la pieza, la de la derecha la parte posterior de la pieza y la señal más pequeña del centro indica una imperfección.

**Ventajas:**

Requiere acceso a una superficie únicamente

Ubica la discontinuidad.

**Desventaja:**

No detecta discontinuidades muy cercanas a la superficie.

**Aplicaciones**

Medición de espesores.

Detección de fallos:

1. examen de piezas fundidas.
2. examen de piezas forjadas.
3. examen de soldaduras.
4. caracterización de materiales.

### **Ventajas del ensayo por ultrasonidos**

1. mayor poder de penetración.
2. acceso a una superficie.
3. ausencia del peligro para el operario.
4. portátil.

### **Desventajas**

Tiene problemas con piezas de geometría complicada.

### **RESULTADOS DEL ENSAYO**

En principio, este ensayo no destructivo no dio el resultado que se esperaba del mismo.

Para comenzar, las placas son de 3 mm. y es muy poco gruesa para que las ondas de ultrasonido no den un resultado fiable ya que si existiera alguna fisura en el material, éste estaría demasiado cerca y en la pantalla los resultados nos confundirían ya que se produciría un efecto de reverberación.



*Ensayo de ultrasonidos*

Por otra parte, la superficie de la soldadura no es plana del todo y con los líquidos acoplantes no es suficiente para cubrirlas por completo por lo que es muy complicado mantener “en equilibrio” el palpador y por lo tanto las ondas no regresarían como esperaríamos y producirían resultados erróneos.

Por último, al soldar las piezas, nuestra placa se curvó de forma que al pasar el palpador por una superficie inclinada, la respuesta del eco se devolvía con demasiadas interferencias por lo que el monitor se hacía ilegible.



*Se aprecia en la imagen la curvatura de la chapa*

Por lo tanto, este ensayo no dio ningún resultado correcto.

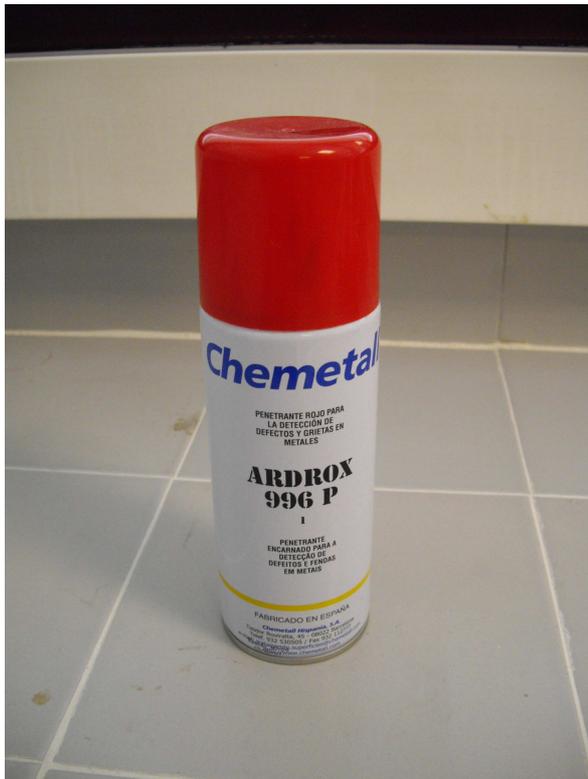
## 10. INSPECCIÓN DE LIQUIDOS PENETRANTES

### FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Este es un método sensible no destructivo con el que se pueden detectar pequeñas discontinuidades como fisuras, contracciones y porosidades que afloran a la superficie. Aunque este método puede aplicarse tanto a materiales magnéticos como a no magnéticos, se usa principalmente en materiales no magnéticos.

Se puede recurrir a varias técnicas penetrantes para revisar cualquier material homogéneo que no sea poroso, como metales, vidrio, plástico y algunos materiales cerámicos.

Las partes que van a probarse se tratan primero con un trazador o colorante. Por lo general, los trazadores son líquidos ligeros, de apariencia aceitosa que se aplican a la prueba por inmersión, rociado o con una



brocha, o de laguna otra manera conveniente.

El trazador es absorbido dentro de las fisuras y otras discontinuidades por una fuerte acción capilar. Después que el trazador ha tenido tiempo de filtrarse, los residuos restantes sobre la superficie se limpian o se lavan. Esto permite al trazador permanecer en todas las discontinuidades que afloran a la superficie. A continuación, la pieza que se está revisando se trata con un polvo seco o una

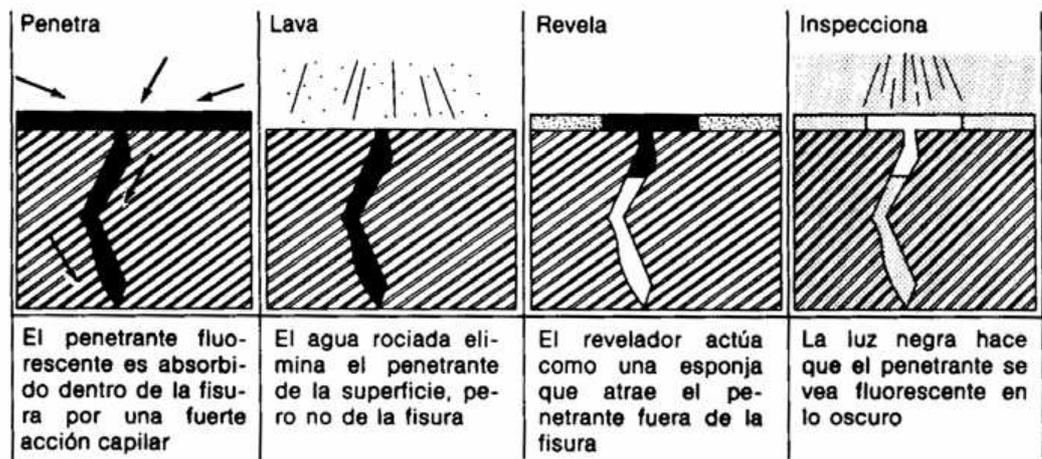
suspensión de polvo en un líquido. este polvo o revelador actúa como una

esponja que atrae al trazador fuera del defecto y aumenta el tamaño del área de indicación. A fin de que este proceso de inspección sea eficaz, el trazador debe ser observado fácilmente en el polvo revelador. Para facilitar la inspección se usan colores contrastantes para el trazador y el revelador. La combinación utilizada en nuestros ensayos con líquidos ha sido revelador blanco y un colorante rojo.



Otro método consiste en usar un trazador fluorescente. En la inspección por medio de un trazador fluorescente. Los pasos son exactamente los mismos que los descritos con anterioridad, excepto que el líquido penetrante contiene un material que emite luz visible cuando se expone a una radiación ultravioleta. Las lámparas que emiten luz ultravioleta se llaman lámparas negras, porque la luz visible que podrían emitir normalmente es

detenida por un filtro, haciéndola aparecer negra o púrpura oscuro. Cuando la parte que va a ser revisada se observa bajo la luz negra, el defecto aparece como una marca fluorescente que brilla contra el fondo negro.



### Propiedades de los líquidos penetrantes

Para los efectos del método de inspección por líquidos penetrantes, el penetrante líquido que tiene la propiedad de penetrar en cualquier abertura u orificio que se exponga ante él. Sin embargo, se requiere mucho más que la habilidad de esparcirse y penetrar para que realice una buena función. El penetrante ideal para fines de inspección deberá reunir las siguientes características:

- Habilidad para penetrar orificios y aberturas muy pequeñas y estrechas.
- Habilidad para permanecer en aberturas amplias.
- Habilidad de mantener color o la fluorescencia.
- Habilidad de extenderse en capas muy finas.
- Resistencia a la evaporación.
- De fácil remoción de la superficie.
- De difícil eliminación una vez dentro de la discontinuidad.
- De fácil absorción de la discontinuidad.
- Atoxico, incoloro, no corrosivo, antiinflamable, estable bajo condiciones de almacenamiento y de costo razonable.

Para cumplir los requisitos anteriores, deberán combinarse diferentes ingredientes que posean adecuadas propiedades, entre las cuales las más importantes son la tensión superficial, el poder humectante, la viscosidad, volatilidad, tolerancia a la contaminación, gravedad específica, punto de inflamación, inactividad química y capacidad de disolución. en cuanto a estas propiedades se tendrá:

**Tensión superficial:** es una de las propiedades más importantes. se requiere una tensión superficial baja para obtener buenas propiedades de penetración y mojado.

**Poder humectante:** el penetrador debe ser capaz de mojar completamente la superficie del material y es una de las propiedades más importantes. esto se refiere al Angulo de contacto del líquido con la superficie, el cual debe ser lo más bajo posible.

**Viscosidad:** esta propiedad no produce efecto alguno en la habilidad de un líquido para “penetrar”, aunque afecta la velocidad de penetración. Los penetrantes de alta viscosidad penetran lentamente, en tanto que los de baja viscosidad se escurren muy rápido y tiene la tendencia a no ser retenidos en los defectos de poca profundidad; por tanto se recomienda una viscosidad media.

**Volatilidad:** los líquidos penetrantes no deben ser volátiles. si existe una evaporación excesiva de los productos del penetrante, se vera afectada la sensibilidad de todo el proceso, debido tanto al desequilibrio de la formula, como a la perdida del poder humectante.

**Gravedad específica o densidad relativa:** no juega un papel directo sobre el comportamiento de un penetrante dado; sin embargo, con densidades bajas se facilita el transporte y los materiales extraños tenderán a sedimentar en el fondo cuando se usan tanques abiertos.

La mayoría de los líquidos penetrantes tienen densidades relativas que varían entre 0.86 y 1.06 a 16° C, y por lo general la densidad es menor que 1.

Punto de inflamación: como medida de seguridad práctica los líquidos penetrantes deberán poseer un punto de inflamación elevado con el fin de deducir los peligros de incendio. Generalmente el punto de inflamación es mayor de 95° C, y en recipientes abiertos no debe ser menor de 65° C.

Inactividad química: los productos usados en la formulación de los líquidos penetrantes deben ser inertes y no corrosivos con respecto a los materiales a ser ensayados y a los recipientes que los contienen.

Capacidad de disolución: el penetrante debe tener una elevada capacidad para contener grandes concentraciones de los pigmentos coloreados o fluorescentes usados, y para mantener dichos componentes en solución.

### **Sistemas penetrantes**

Los sistemas penetrantes generalmente se identifican por el método empleado en la remoción del exceso del líquido penetrante. Estos sistemas son:

- a. removible con agua
- b. post-emulsificable lipofílico
- c. removible con solventes
- d. post-emulsificable hidrofílico

Estos sistemas son comunes tanto a los tipos de penetrante fluorescente como a los de colorante visible.

En el caso de penetrantes removibles con agua, el exceso de penetrante es removido con un simple lavado con agua.

En el caso de penetrantes post-emulsificables, se requiere una etapa adicional separada, que consiste en la aplicación de un emulsificador que hace que el penetrante pueda ser removido posteriormente con un lavado con agua.

En el caso de penetrantes removibles con solvente, el exceso de penetrante se remueve utilizando trapos o papeles absorbentes impregnados con solventes especialmente formulados para este fin.

### **Sistema penetrante removible con agua**

Este sistema consiste en un líquido penetrante lavable con agua, que al ser aplicado a la superficie de la pieza y después de haberlo dejado un tiempo de penetración suficiente se retira de la superficie de la pieza mediante lavado con agua. Los penetrantes empleados en los procesos lavables con agua no son soluciones simples sino fórmulas que contienen ciertos ingredientes tales como aceites penetrantes, colorantes, agentes emulsificadores y agentes estabilizadores. El objetivo de la formulación es producir un líquido único que contiene características de buena penetrabilidad y solubilidad del colorante con propiedades de lavado bajo la acción del agua y que mantenga su estabilidad bajo condiciones variables de temperatura y otras variables de operación.

### **Sistema penetrante post-emulsificable lipofílico**

Este método consiste en la aplicación de un líquido penetrante postemulsionable a la superficie de la pieza. Después de un periodo de penetración adecuado, al penetrante se hace lavable con agua mediante la aplicación de un emulsificador lipofílico, o sea de base oleosa, el cual se mezcla con el penetrante por ser mutuamente solubles. En este sistema se requiere un tiempo de emulsificación muy exacto y se debe tener mucho cuidado para que el penetrante no sea sobre emulsificado y pueda ser removido de las discontinuidades en el lavado posterior con agua.

Generalmente los tiempos de emulsificación están comprendidos entre segundos y cinco minutos.

### Sistemas penetrantes removible con solventes

Los líquidos penetrantes removibles con solventes solo deberán emplearse para inspección puntual y cuando por razón del tamaño de la



pieza, masa y condición de la superficie el método de lavado con agua no es factible o práctico. En este método, el exceso de penetrante se elimina en dos etapas. Primero, se elimina todo el penetrante posible limpiando la superficie de la pieza con un paño limpio y absorbente, exento de pelusa. La capa superficial de penetrante que queda se elimina después pasando por la pieza un paño ligeramente impregnado de un

disolvente apropiado. Es necesario tener cuidado de no emplear demasiado disolvente con el fin de minimizar la posibilidad de eliminar el penetrante contenido en las discontinuidades.

### Sistema penetrante post-emulsificable hidrofílico

Al igual que en el caso del sistema post-emulsificable lipofílico, después de transcurrido el tiempo de penetración, se aplica un emulsificador, en este caso de base acuosa, el cual no se mezcla con el penetrante por no ser estos mutuamente solubles, sino que actúa en la intercara rompiendo la cadena de carbono de la base oleosa del penetrante, emulsificando gradualmente capa por capa.

## PROCESO GRAFICO DE LOS ENSAYOS EN NUESTRO PROYECTO

### PREPARACIÓN SUPERFICIAL

En un primer momento se limpian las placas con agua y jabón se secan bien y se aplica acetona para la eliminación de impurezas y suciedad. Se marcan las piezas para saber las caras y se colocan las piezas sobre un soporte para posteriormente pulverizarlas con los líquidos.

El local debe de estar ventilado debido a los gases resultantes



*Aplicación de líquidos penetrantes*

### APLICACIÓN DEL PENETRANTE



Se pulveriza sobre las superficies el liquido revelador, color rojo, y después de haberlo dejado un tiempo penetración que son 20 minutos, se retira de

la superficie de la pieza mediante lavado con agua.

### APLICACIÓN DEL REVELADOR

Una vez con las placas limpias con un paño húmedo pero sin incidir mucho en la soldadura por el peligro de quitar todo el líquido penetrante y que posteriormente no se revele nada, Entonces volvemos a colocar las piezas en nuestro soporte y echamos líquido revelador (imágenes de líquidos) que es de color blanco.



*Aplicación de líquido revelador*

Entonces esperamos aproximadamente 5 minutos para comprobar que ahí donde existen poros o grietas superficiales, el líquido blanco se va tornando de color rojizo ya que el líquido penetrante está saliendo a la superficie.



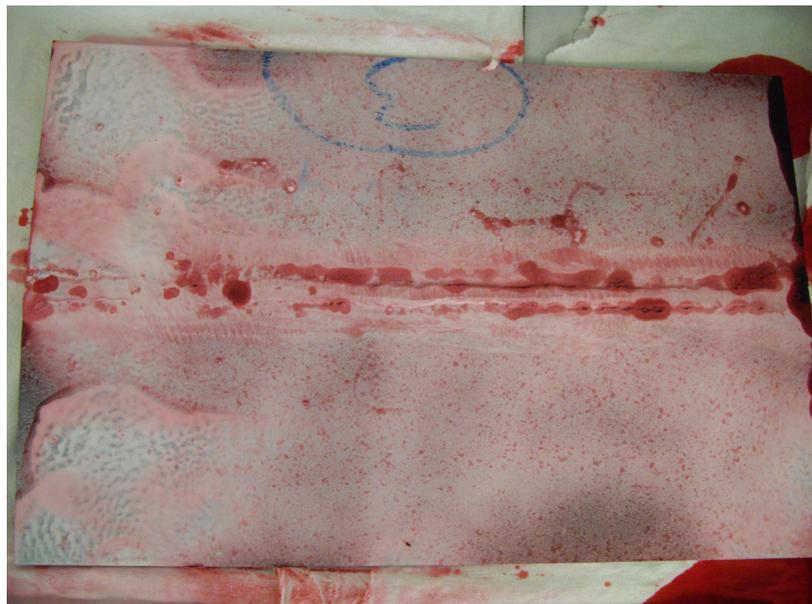
De esta manera es como comprobamos los defectos existentes en la pieza además de resaltar sobre el resto.

A continuación vemos los resultados de las pruebas  
**Soldadura con electrodo de rutilo**



La soldadura no presenta fallo de ningún tipo. Aparecen en la imagen 2 poros en la parte superior izquierda y dos poros en la soldadura en la parte derecha. Ese fallo es debido a que la soldadura se comenzó directamente sobre la chapa, sin poner ningún mártir anteriormente y por lo tanto hubo un exceso de intensidad y se quemó el principio de la soldadura

**Soldadura con electrodo básico**



Esta pieza delata bastantes más manchas en soldadura. Principalmente son manchas uniformes y continuas. Estas manchas son debidas a la unión de la soldadura con el material base. A la hora de lijar las superficies es posible que zonas que no estuvieran bien recubiertas o la simple junta con el material den estas manchas junto a la soldadura pero en un principio no son importantes porque sigue claramente el cordón y lo que marca es un simple pliegue donde puede acumularse el líquido.

Por lo demás observamos a la izquierda en la mitad, una mancha en la soldadura y justo en medio de ella. Está claro que indica la existencia de una porosidad que ya vimos de su existencia anteriormente.

### **Soldadura con electrodo de acero inoxidable**



Como hemos visto anteriormente, una línea de color rojo continua y de poca intensidad nos indica un pliegue entre soldadura y chapa que no es importante porque el líquido se acumula ahí y lo único que muestra es el contorno de la soldadura.

## 11. ENSAYOS DESTRUCTIVOS

### PREPARACIÓN DE PROBETAS

Independiente del procedimiento de soldadura elegido, es de fundamental importancia preparar de la forma más adecuada la pieza moldeada para efectuar la soldadura.

Es esencial eliminar de la zona destinada a la soldadura materias extrañas, tales como aceites, grasas, marcas de pintura, óxidos y arena, debido a que estos productos perjudicarían la calidad de la unión considerablemente. Por ello, se ha hecho una preparación exhaustiva de las probetas a ensayar.

En el presente proyecto, se ha partido de piezas de acero F-1140, cuyas dimensiones son 300 mm de longitud, 75 mm de anchura y 3 mm de espesor. A partir estas chapas se mecanizarán las probetas que serán posteriormente soldadas y ensayadas a tracción y doblado.



*Soldadura entre dos chapas de 300x75x3 mm*

Una vez terminadas de soldar, el aspecto que presentan es con el cordón de soldadura visto que además hace que en ese punto el grosor de la chapa sea de casi 7 mm cuando el grosor normal es de 3 mm.



*Lo s tres tipos de soldadura para ensayar.*

Por lo tanto los sobreespesores de la soldadura deberán de ser eliminados y la superficie de la soldadura debe estar exenta de rayas y entallas en la parte de la soldadura. Por lo tanto, con una amoladora y un disco de lija, procederemos a eliminar el sobreespesor de la soldadura y lo dejaremos totalmente liso como en las demás zonas a 3 mm.



*Proceso de lijado de la soldadura*

Para al final dejar las probetas como en la siguiente fotografía, listas para mecanizar en probetas de tracción y flexión. Hay que comentar además que con las placas en este estado, se realizaron los ensayos no destructivos de líquidos penetrantes y partículas magnéticas puesto que era necesario tener la soldadura pulida para la realización de dichos ensayos.

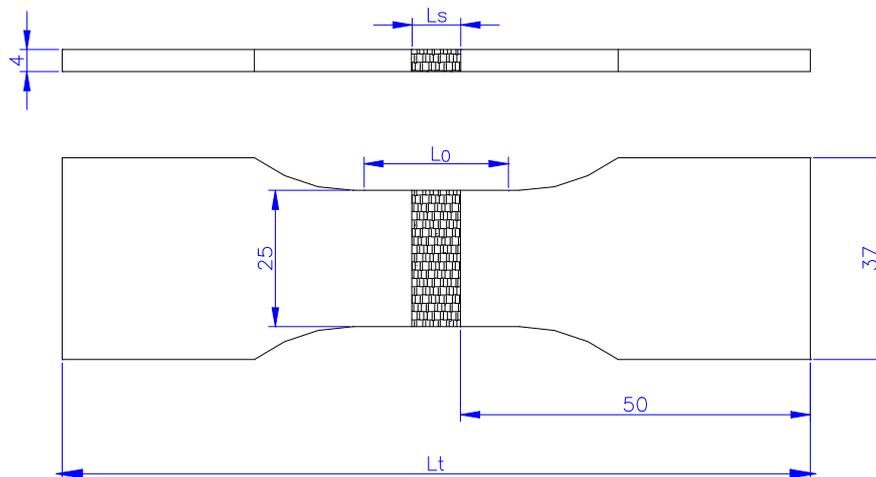


Soldadura tratada para los ensayos posteriores

## Probetas para el Ensayo de Tracción

Partiendo de los bloques de dimensiones 300x150x3 mm ya soldados, el primer paso el proceso de mecanizado será el diseño de las probetas.

Las dimensiones de las probetas para el Ensayo de Tracción, cumplen con los requisitos que establece la norma UNE-EN 895, correspondiente a “Ensayos Destructivos de uniones soldadas en materiales metálicos. Ensayo de Tracción Transversal”. En la figura siguiente se muestran las dimensiones de las probetas que se han sometido a tracción transversal.



*Dimensiones de las probetas mecanizadas en el taller para el Ensayo de Tracción*

## Probetas para el Ensayo de Doblado

El ensayo se ha realizado según norma **UNE-EN 910** sobre “**Ensayos destructivos de soldaduras en materiales metálicos. Ensayo de doblado**”. Esta norma refleja el tipo de ensayo a efectuar para conocer las cualidades de los distintos tipos de soldaduras al ser sometidas a las citadas sollicitaciones.

De este modo, el ensayo ha sido realizado en la máquina universal de ensayos de la figura 47, comprobando la distribución de los apoyos, la aplicación de las cargas y siendo las características del ensayo:

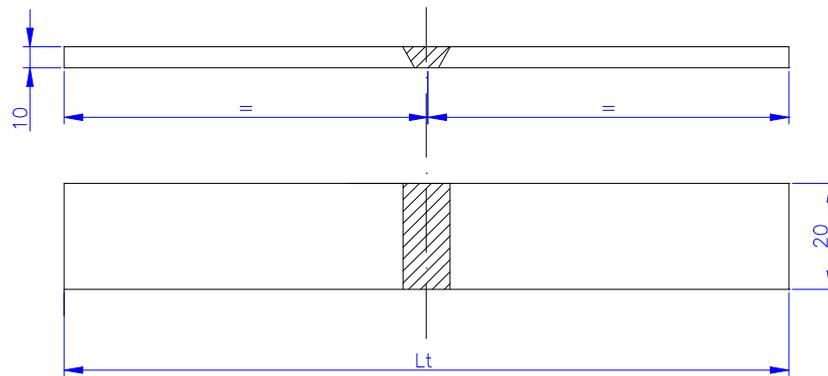
- ❑ Diámetro punzón de 20 mm
- ❑ Diámetro rodillos de 20mm
- ❑ Distancia entre los centros de los rodillos de 65mm

Para determinar el ángulo de doblado de las soldaduras, se han cortado y preparado tres probetas.

Para mecanizar las probetas que se van a ensayar a doblado también se parte de los bloques de dimensiones 300x150x3 mm ya soldados, y como antes, el primer paso el proceso de mecanizado será el diseño de las probetas.

Los bloques se cortarán en piezas de la anchura adecuada.

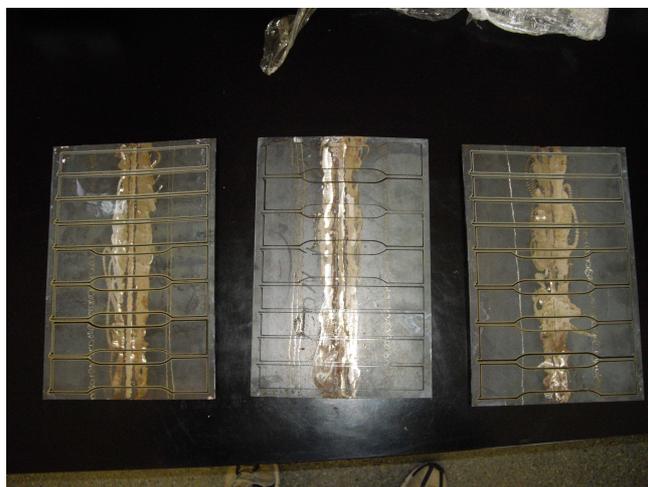
Todo el proceso de preparación se ha llevado a cabo según la norma UNE-EN 910, correspondiente a “Ensayos Destructivos de uniones soldadas en materiales metálicos. Ensayos de doblado”. A continuación, se indican las dimensiones de las probetas que se han sometido al ensayo de doblado.



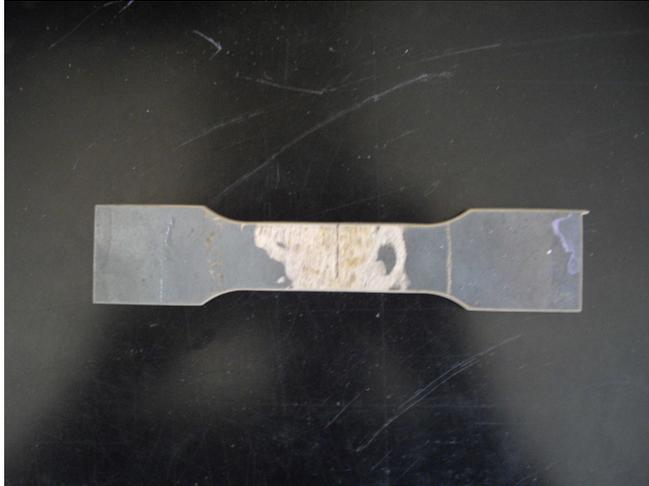
*Dimensiones de las probetas mecanizadas en el taller para el Ensayo de Tracción*

Para cortar, tanto las probetas utilizadas para tracción como las empleadas para doblado a sus dimensiones adecuadas, se ha utilizado una cortadora de chorro de agua, corte que se realizó en un taller externo al DIMM.

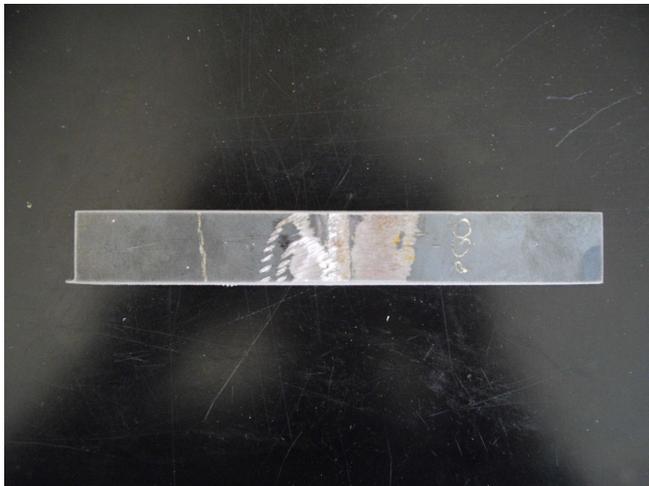
El resultado final del corte de nuestras placas es el siguiente:



*Placas mecanizadas en el taller con corte de agua*

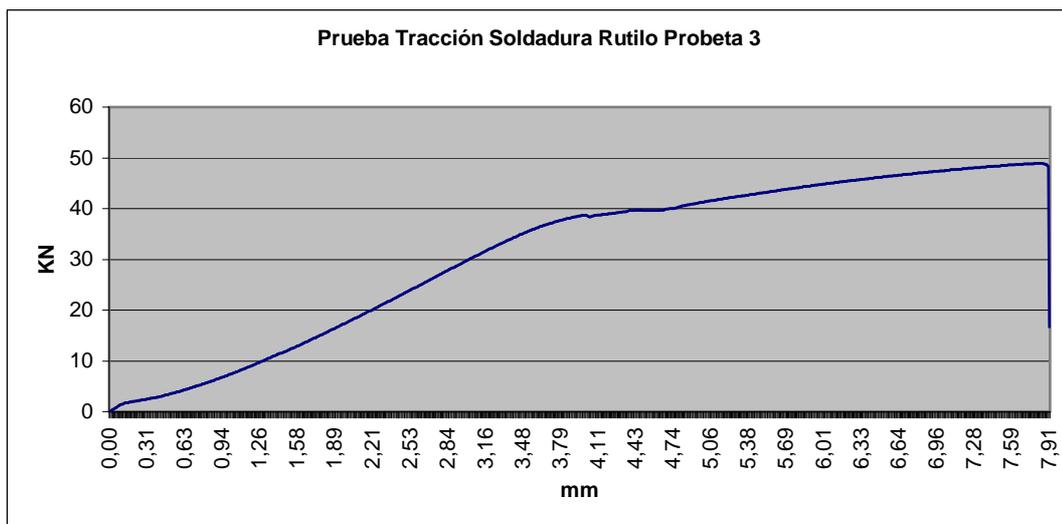
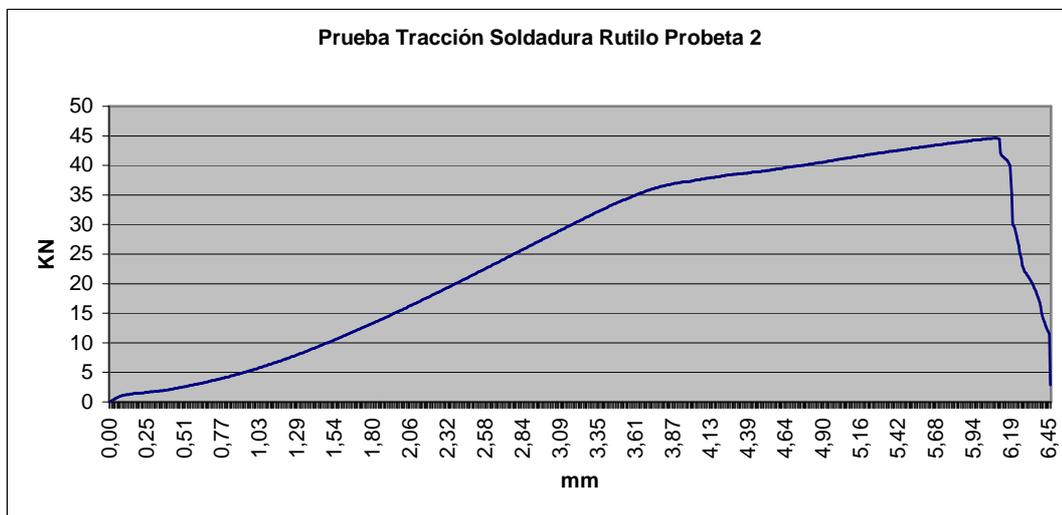
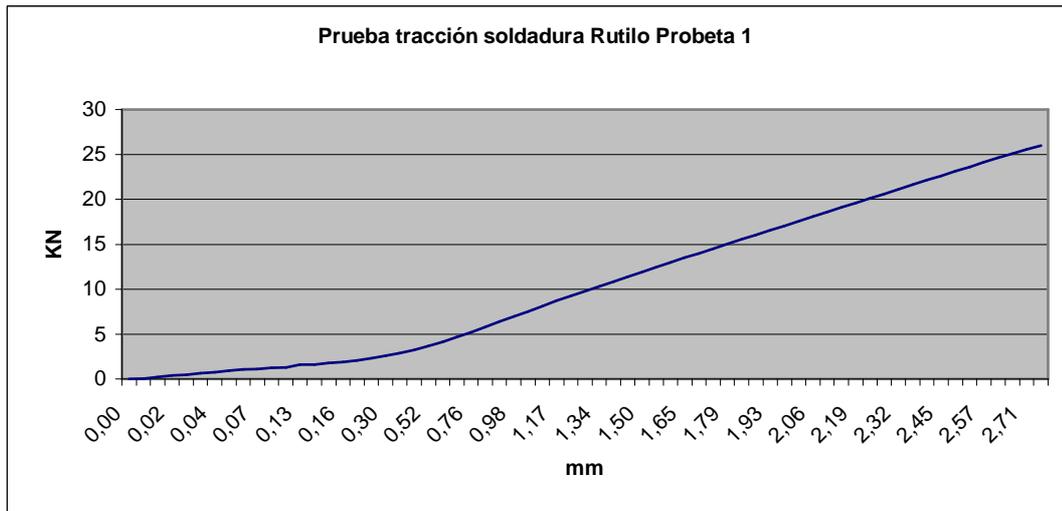


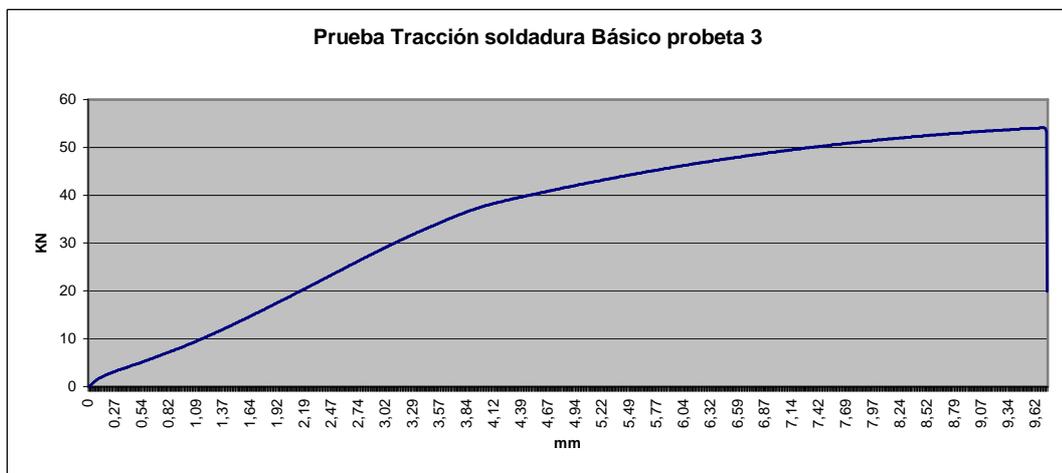
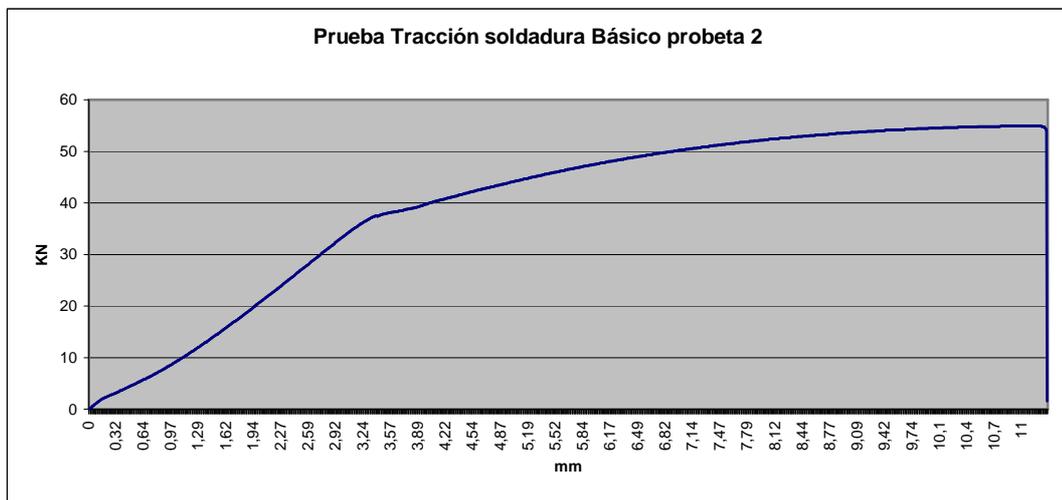
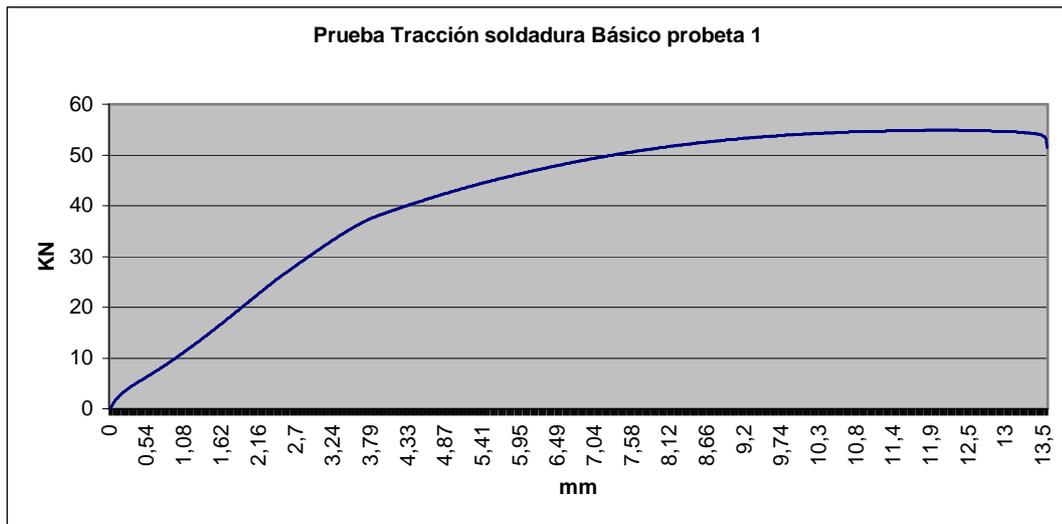
*Probeta para el Ensayo de Tracción*



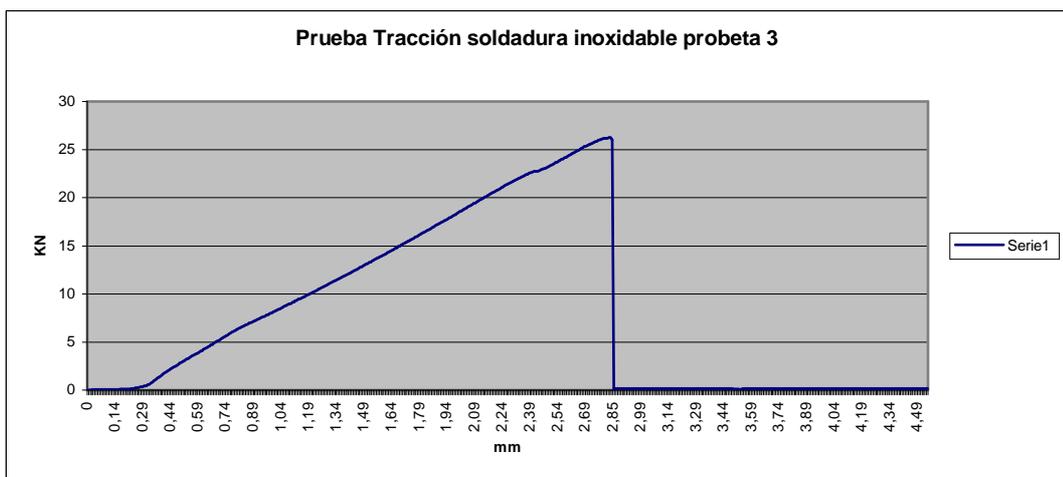
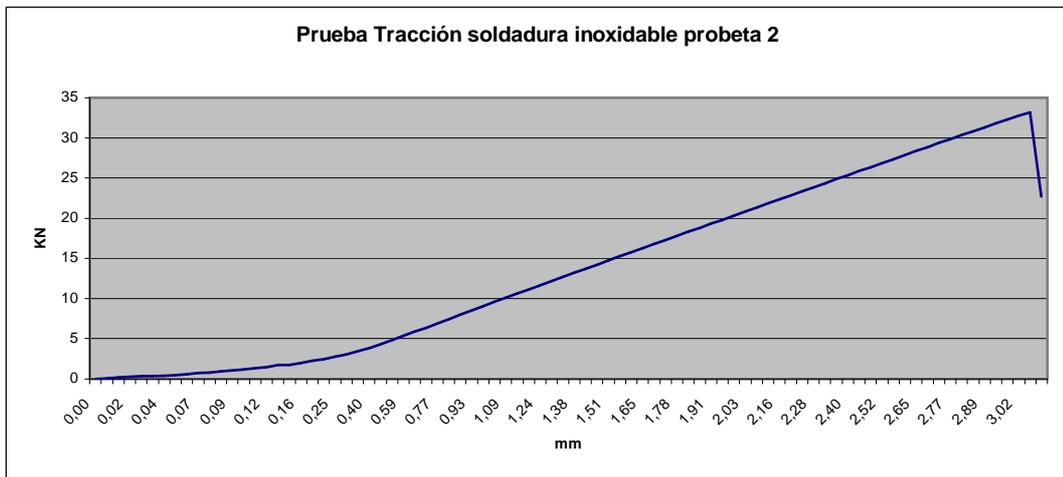
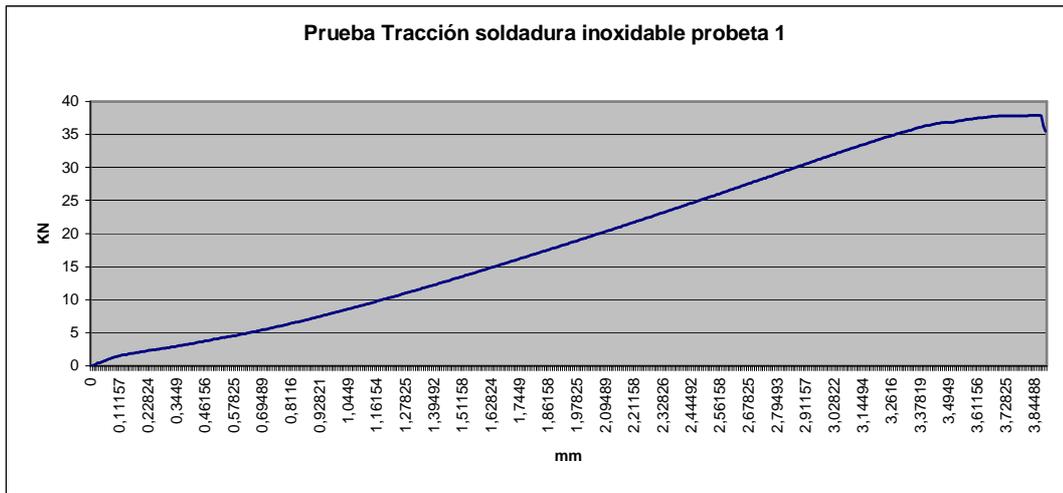
*Probeta para el Ensayo de Flexión*

### Resultados del Ensayo de Tracción

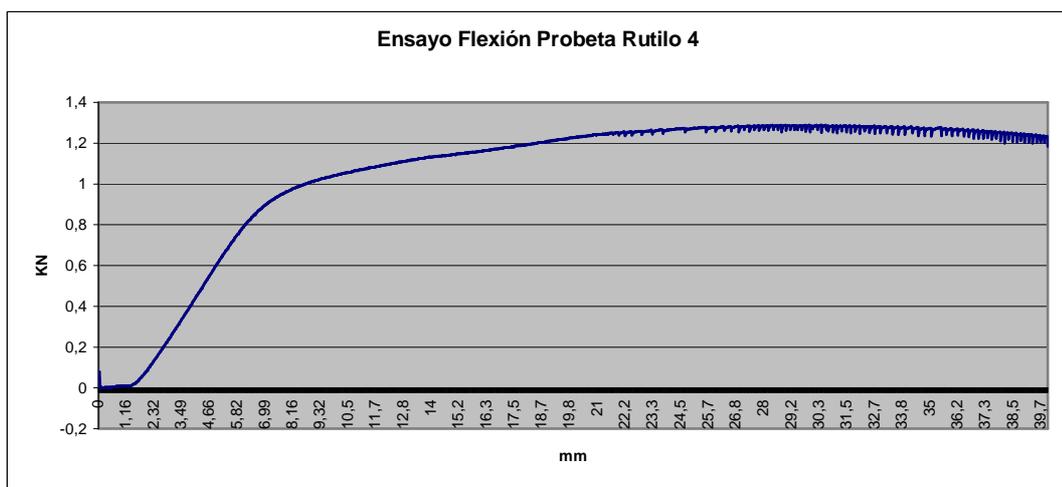
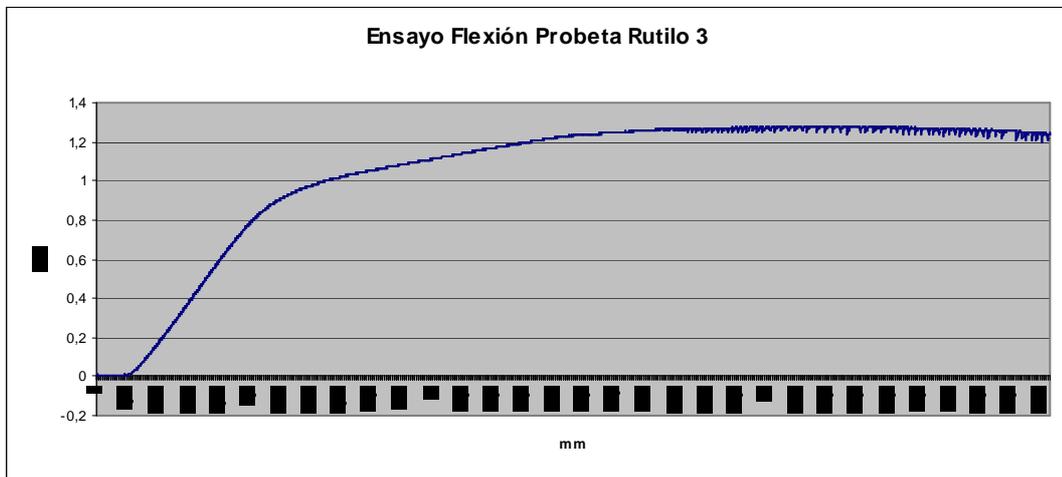
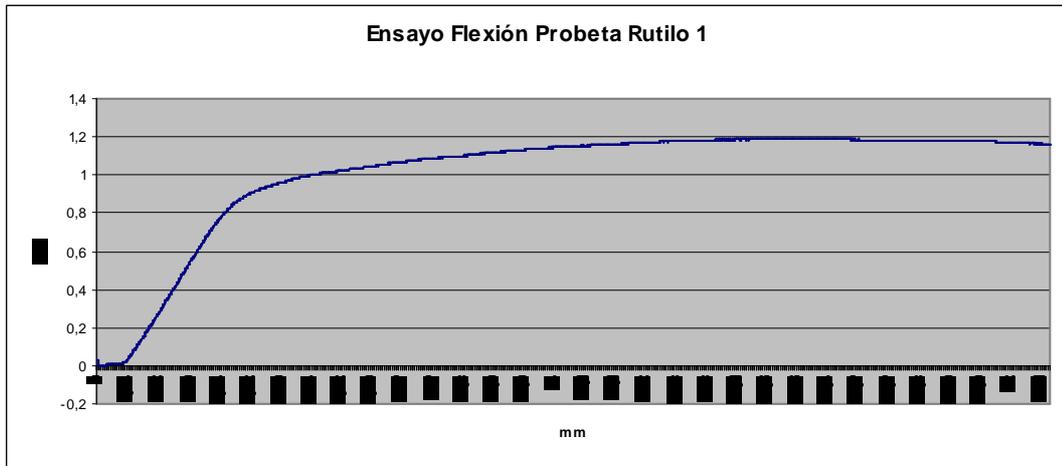


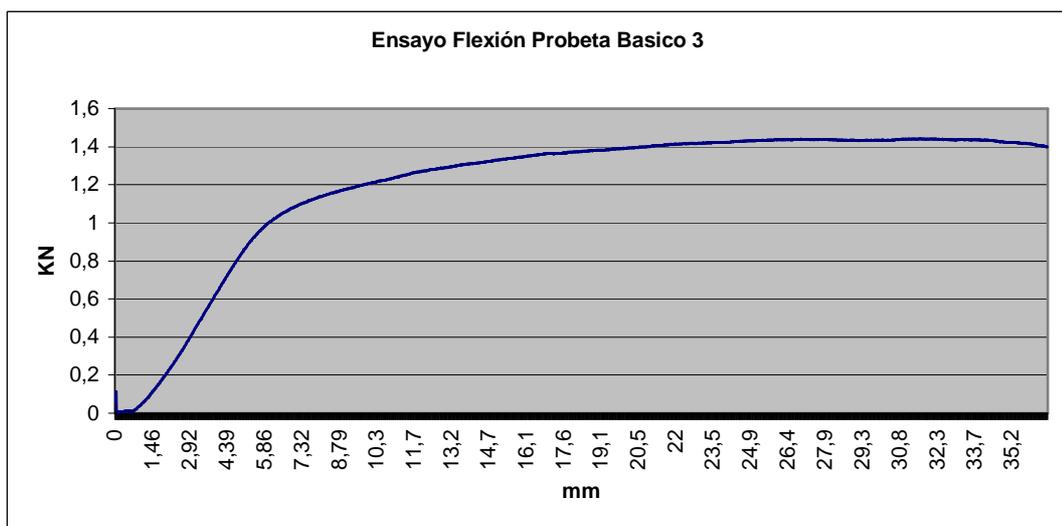
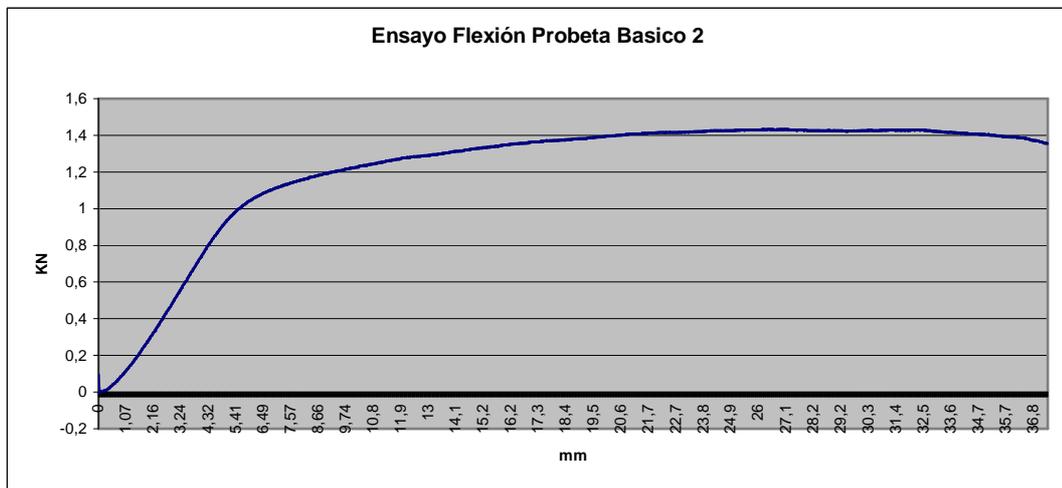
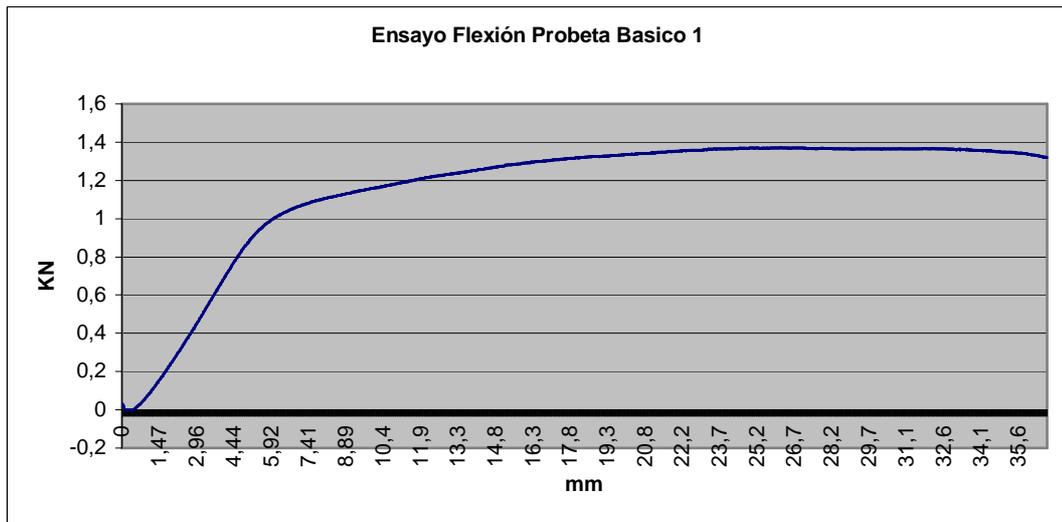


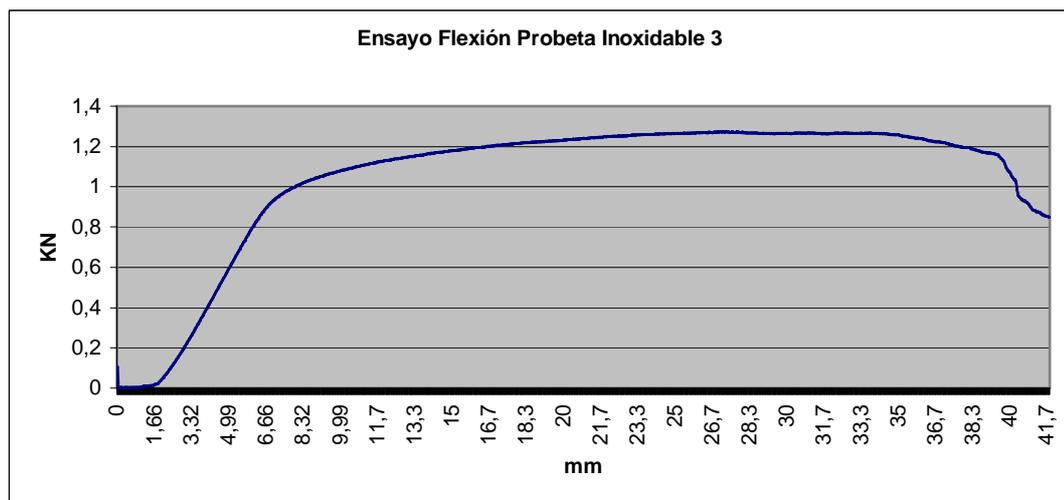
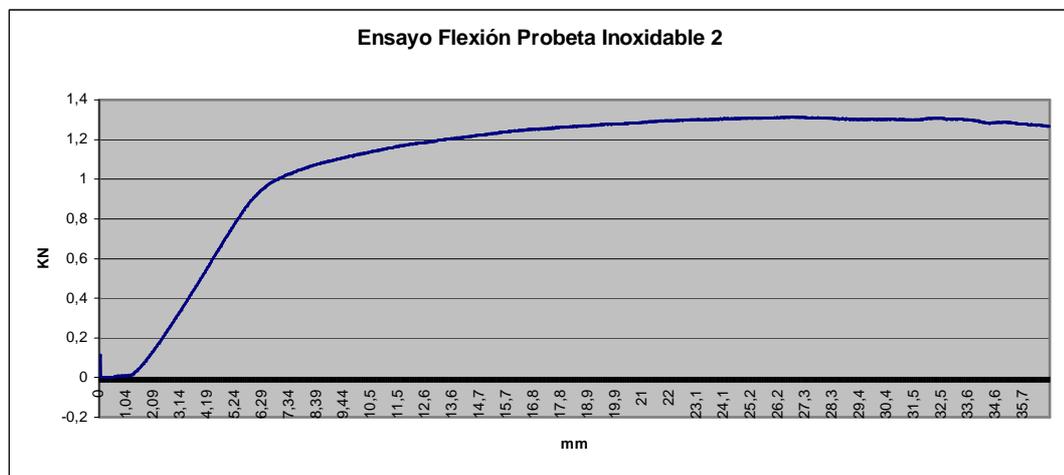
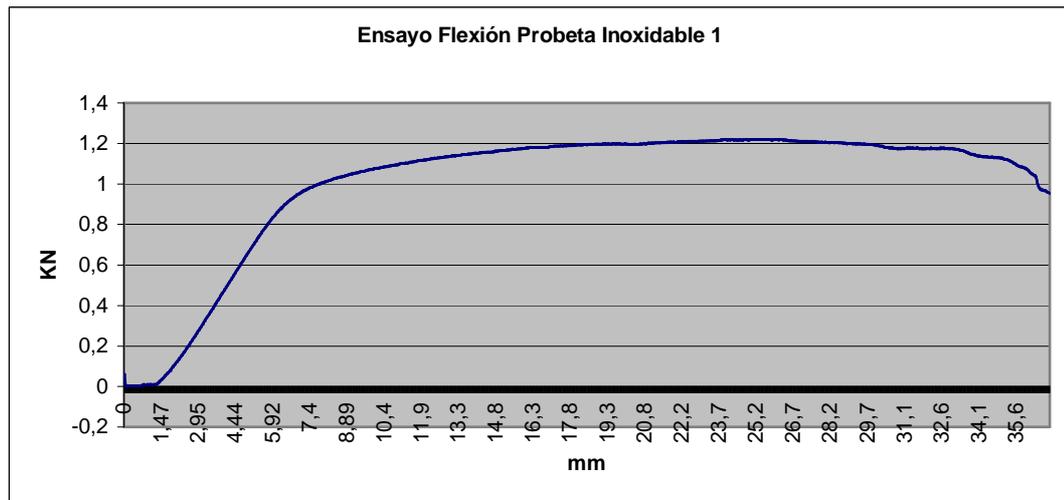
CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS Y SOLDABILIDAD DEL ACERO F-1140



Resultados del Ensayo de Doblado







**RESULTADOS ENSAYOS A TRACCIÓN**
**Electrodo Rutilo**

	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	<b>Media</b>
Carrera (mm)	2,75	6,46	7,91	<b>5,71</b>
Resistencia (Mpa)	338,46	587,38	641,38	<b>522,41</b>
Fuerza (KN)	25994,00	44582,00	48873,00	<b>39816,33</b>

**Electrodo Básico**

	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	<b>Media</b>
Carrera (mm)	13,59	11,34	9,73	<b>11,55</b>
Resistencia (Mpa)	707,75	712,40	706,96	<b>709,04</b>
Fuerza (KN)	54.830,00	54.972,00	54.082,00	<b>54.628,00</b>

**Electrodo Inoxidable**

	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	<b>Media</b>
Carrera (mm)	3,89	3,12	5,29	<b>4,10</b>
Resistencia (Mpa)	497,45	433,19	555,98	<b>495,54</b>
Fuerza (KN)	37.906,00	33.139,00	42.699,00	<b>37.914,67</b>

**RESULTADOS ENSAYOS A FLEXIÓN**
**Electrodo Rutilo**

	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	<b>Media</b>
Carrera (mm)	33,39	37,04	39,92	<b>36,78</b>
Resistencia (Mpa)	1007,90	1087,60	1095,10	<b>1063,53</b>
Fuerza (KN)	11942,00	12800,00	12888,00	<b>12543,33</b>

**Electrodo Básico**

	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	<b>Media</b>
Carrera (mm)	36,71	37,36	36,57	<b>36,88</b>
Resistencia (Mpa)	1139,20	1217,20	1222,30	<b>1192,90</b>
Fuerza (KN)	13713,00	14325,00	14425,00	<b>14154,33</b>

**Electrodo Inoxidable**

	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	<b>Media</b>
Carrera (mm)	36,90	36,70	41,76	<b>38,45</b>
Resistencia (Mpa)	1030,40	1112,40	1086,10	<b>1076,30</b>
Fuerza (KN)	12208,00	13144,00	12732,00	<b>12694,67</b>

## Conclusiones

Claramente tanto en ensayos de flexión como en tracción vemos que la soldadura con electrodo básico es la mejor de las tres ya que sobrepasa los valores de las demás soldadura de forma excesiva.

En ensayos de tracción le siguen al electrodo básico, el electrodo de rutilo y finalmente el de acero inoxidable con unos resultados bastante diferentes entre si.

Por lo que respecta a los ensayos de flexión, al electrodo básico, le sigue el electrodo de acero inoxidable y casi parejos los resultados de las chapas soldadas con electrodos de rutilo.



*Maquina universal de ensayos*

## 12. MICROESTRUCTURA DE LA UNIÓN SOLDADA

El estudio se basa en realizar un análisis de la microestructura de las muestras que vamos a tomar de nuestro hacer F-1140 con sus respectivas soldaduras con material de aportación de rutilo, de electrodo básico y de acero inoxidable.

### PROCESO

Para la observación de la microestructura se ha procedido a la preparación metalográfica de las muestras, llevada a cabo en el laboratorio del *Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales*.

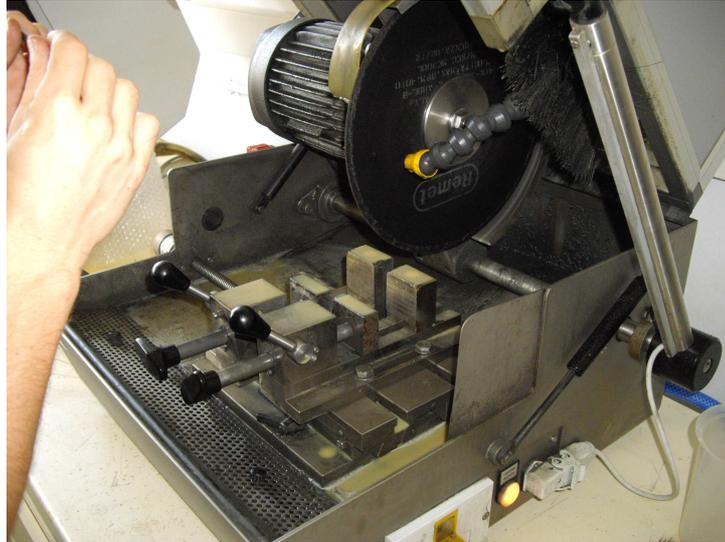
La preparación de una muestra para su posterior observación al microscopio, consiste en cortar una pequeña porción de material de manera que se obtenga una amplia superficie con el mínimo espesor.



En principio se corta un trozo de material de los restos de chapas que se diseñaron para realizar las probetas de tracción y flexión con una sierra

y luego ese pequeño trozo se acaba

de cortar en una tronzadora como se muestra en la imagen.



*Tronzadora para corte en frío.*

A continuación se procede a la embutición de la muestra. La embutidora dispone de un cilindro hidráulico, cuya presión sobrepasa las 300 atmósferas y de una resistencia calefactora; se aportan polvos de metacrilato que se polemizarán con la probeta mediante la aportación de calor y presión. Si existen problemas para el cerrado de la embutidora, se aplicaran unos polvos de estearato de zinc para suavizar la entrada de la prensa de la embutidora. Los parámetros de la máquina que definen este proceso son: fuerza aplicada, tiempo de calentamiento y tiempo de enfriamiento, que corresponden a los valores de 15 KN, 6 y 7 minutos relativamente.



*Embutidora y envase con polvo de metacrilato*

De esta manera, con las muestras embutidas se consigue que estén aptas para el siguiente proceso de desbaste y de pulido. Las lijas utilizadas para desbastar han sido 220, 500 y 1000 en escala FEPA procediendo así, de menor a mayor granulometría.



*Desbaste y pulido de muestras.*

El desbaste se realiza primero con la muestra en perpendicular al sentido de giro de la desbastadora y luego con la muestra en paralelo para eliminar lo máximo posible las rayas. El pulido se ha realizado con discos con pasta de diamante de 3 y 1  $\mu\text{m}$ , procediendo también de menor a mayor granulometría hasta obtener una superficie limpia y sin rayas.



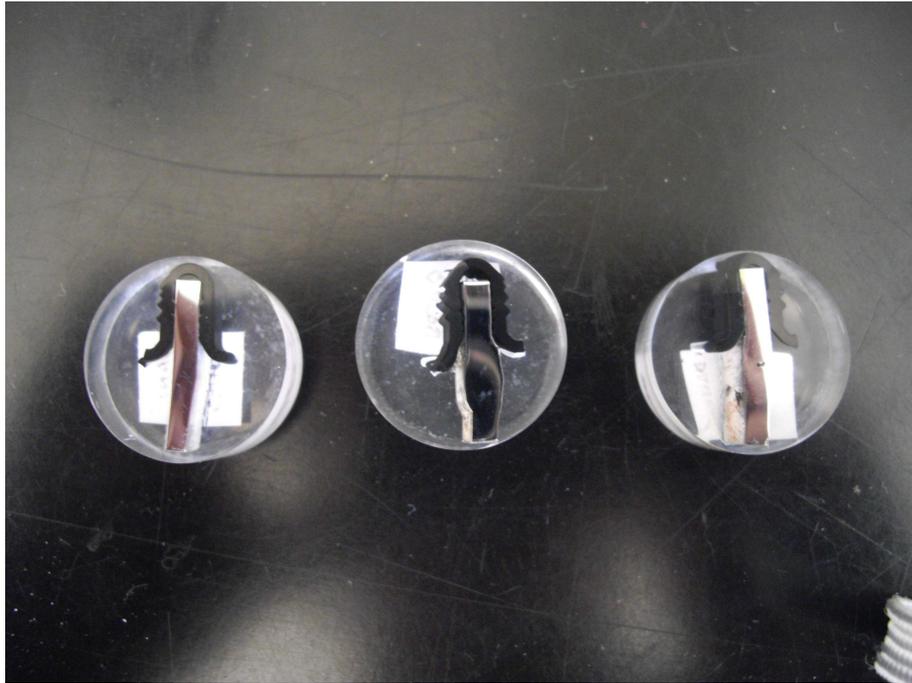
*Pulidora*

Se coloca pasta de diamante de 3 y 1 micras y luego se engrasa un poco con aceite sobre los discos.



*Pasta de diamante (abrasivo) de 1 micra*

Y así se llega a un estado final de las probetas tal como muestra la figura siguiente:



*Muestras de rutilo, básico e inoxidable respectivamente*

La observación micrográfica se realiza con un microscopio como el de la siguiente foto.

Como se puede observar en la figura, el microscopio consta de cuatro lentes de diferentes aumentos, que corresponden a 50, 100, 200 y 400 aumentos. Este microscopio tiene incorporado un dispositivo que

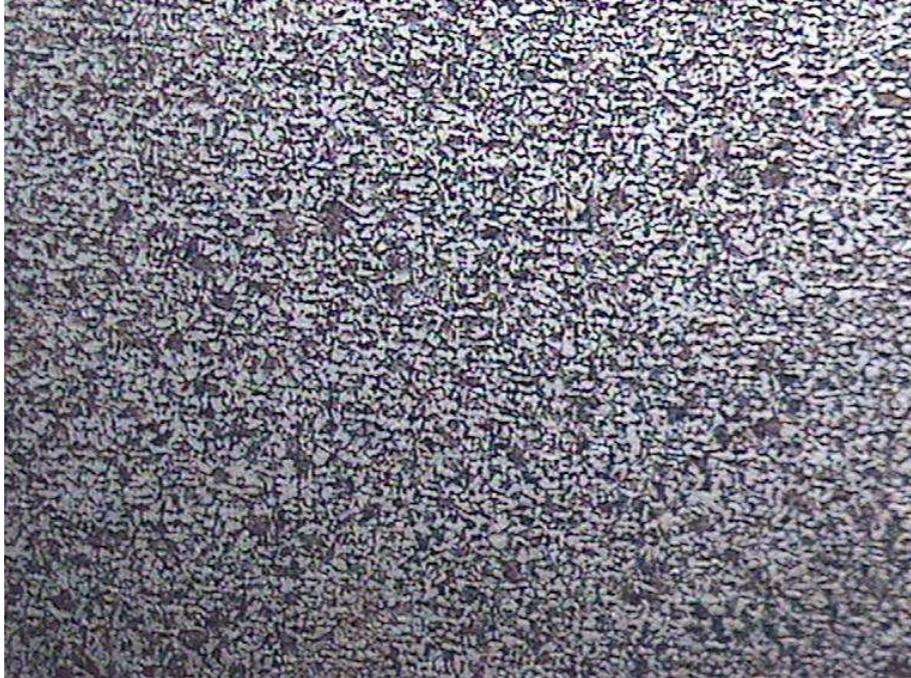


permite alojar una cámara fotográfica con el fin de poder realizar fotografías a las distintas micrografías obtenidas.

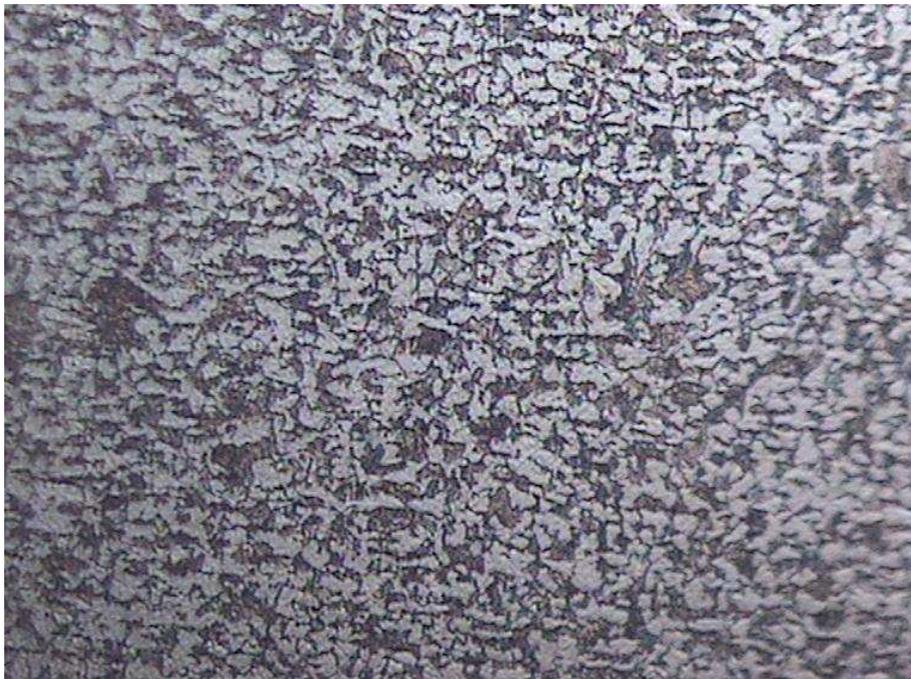
En el presente proyecto se han observado las probetas para realizar los ensayos pertinentes en estado de pulido, pero para realizar las fotografías de la microestructura, éstas se han realizado en estado de ataque de las probetas. El ataque químico de las probetas se ha llevado a cabo principalmente con NITAL (98% Etanol + 2% Ácido Nitríco), pasando un algodón por la muestra e inmediatamente dándole un baño de agua.

Ahora veamos una por una las microestructuras del acero con los distintos tipos de soldadura.

## Soldadura De Electrodo De Rutilo



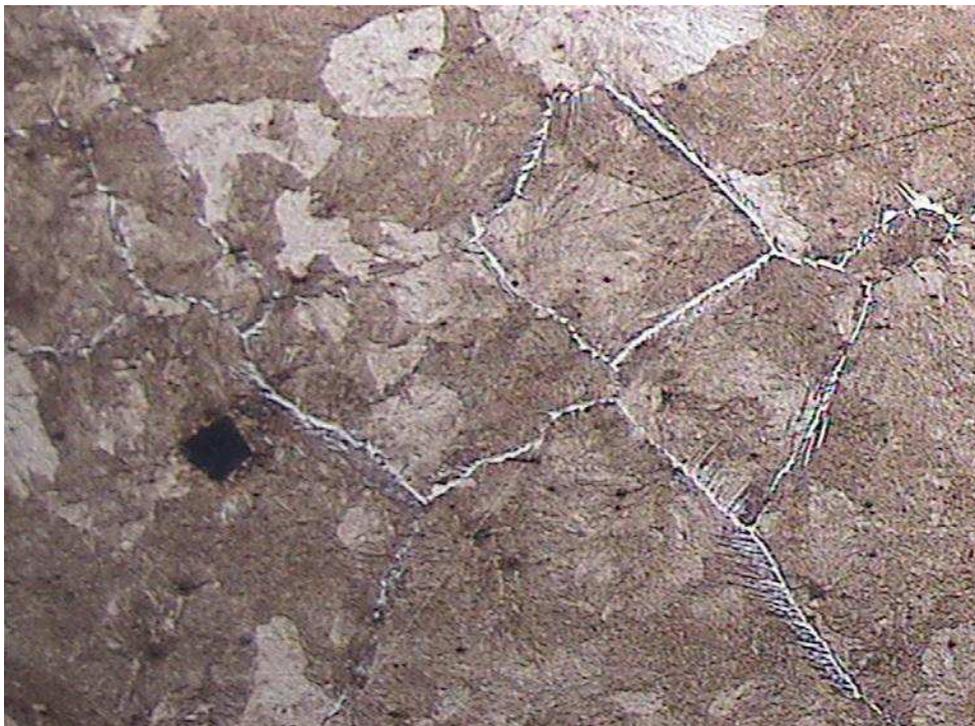
*Muestras Material Base F-1140 con soldadura de rutilo 200 x*



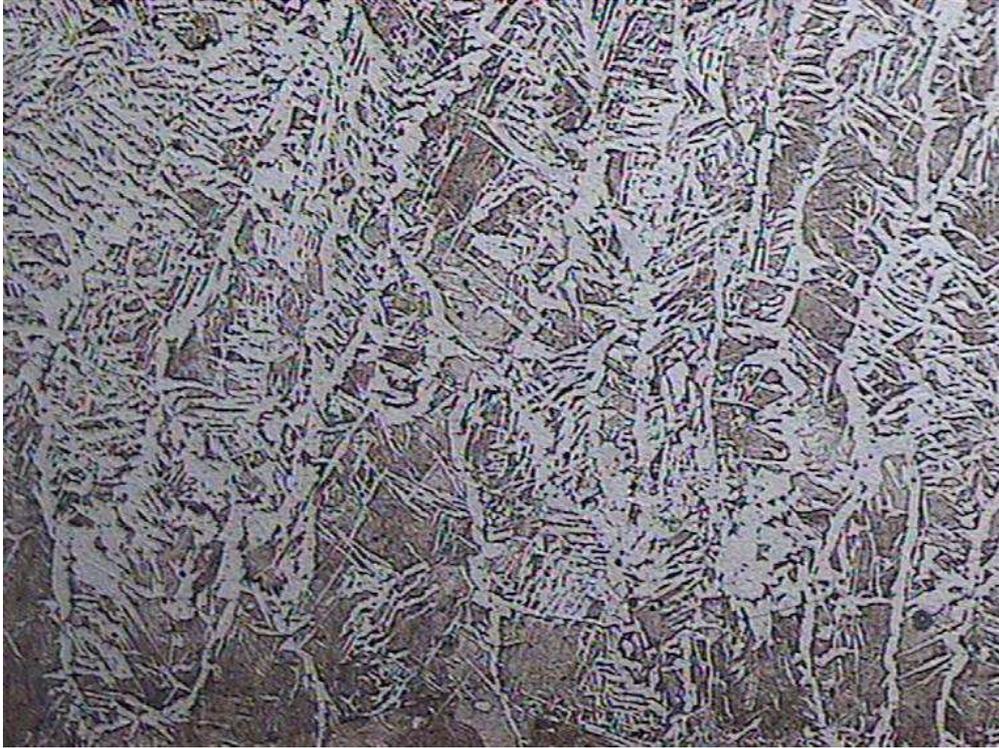
*Muestras Material Base F-1140 con soldadura de rutilo 400 x*



*Zona afectada por el calor F-1140 con soldadura de rutilo 50 x*



*Zona afectada por el calor F-1140 con soldadura de rutilo 100 x*

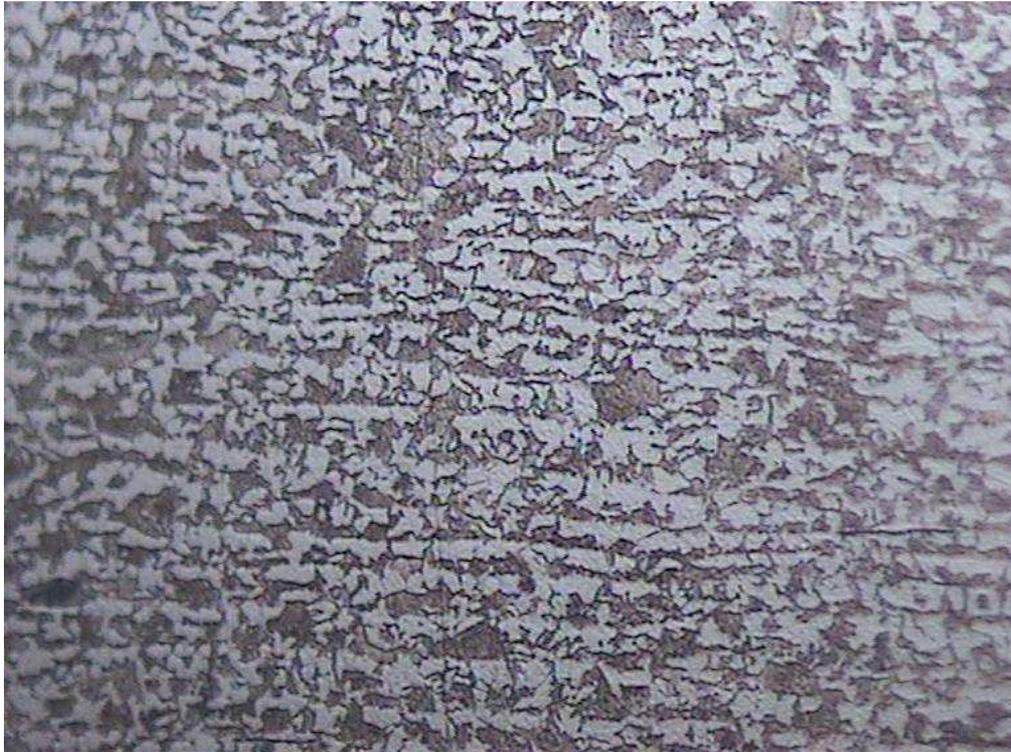


*Zona del material de aporte (soldadura) F-1140 con soldadura de rutilo 100 x*



*Zona del material de aporte (soldadura) F-1140 con soldadura de rutilo 100 x*

## Soldadura De Electrodo Básico



*Muestras Material Base F-1140 con soldadura de electrodo básico 400 x*

Para las soldaduras de Rutilo, básico e inoxidable se repite siempre el mismo patrón en las imágenes. El material base formada por perlita y ferrita que son los puntos blancos y negros que se observan en la pantalla, estructura que se ve modificada conforme avanzamos a la zona de afección de calor la cual se va transformando en una estructura con forma laminar , como si fueran placas, es una estructura perlítico-ferrítica pero que se transforma en vainita donde no aparecen granos. Es debido a que la martensita que aparece en esta zona se reviene al calentarla por detrás cuando hacemos el segundo cordón de soldadura.

En la soldadura, se convierte la ferrita y la perlita en una estructura acicular, como si fueran agujas. Excepto en la soldadura de acero inoxidable, donde no hay fusión de elemento base y metal de aportación.



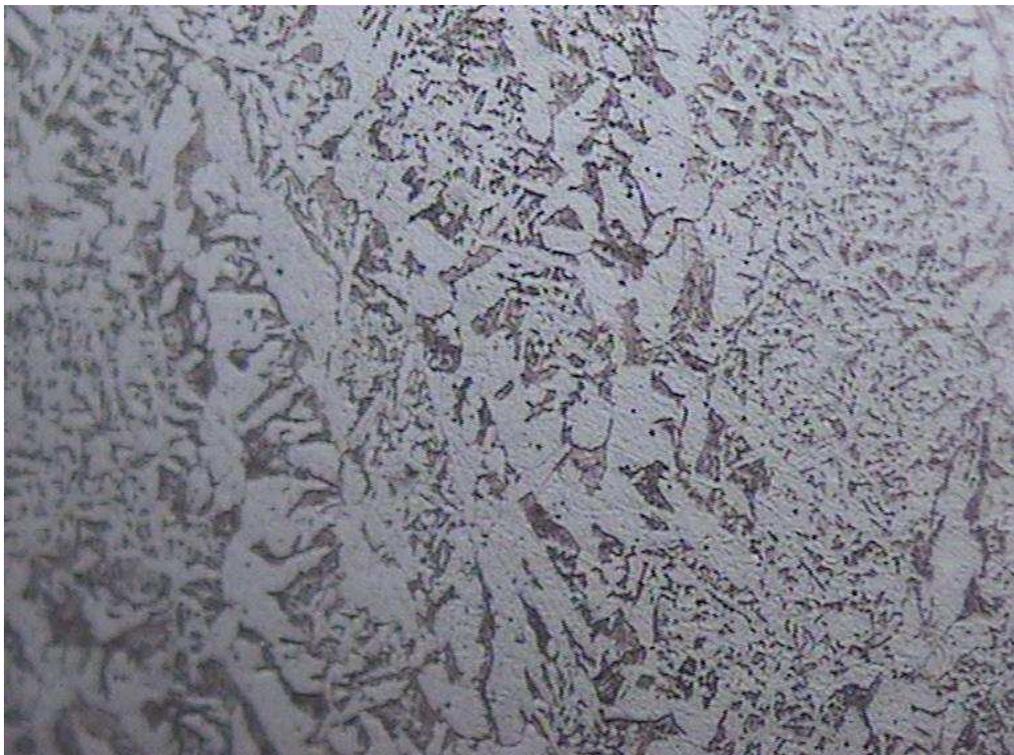
*Zona afectada por el calor F-1140 con soldadura de electrodo básico 50 x*



*Zona afectada por el calor F-1140 con soldadura de electrodo básico 200 x*

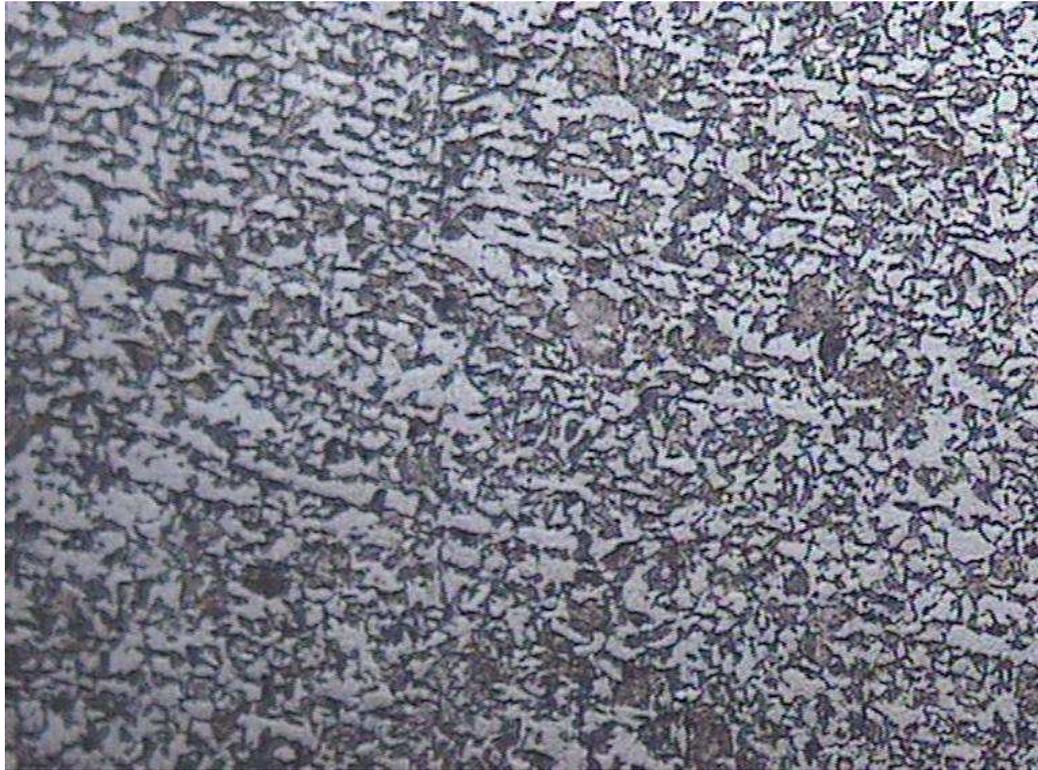


*Zona del material de aporte (soldadura) F-1140 con soldadura de electrodo básico 100 x*



*Zona del material de aporte (soldadura) F-1140 con soldadura de electrodo básico 400 x*

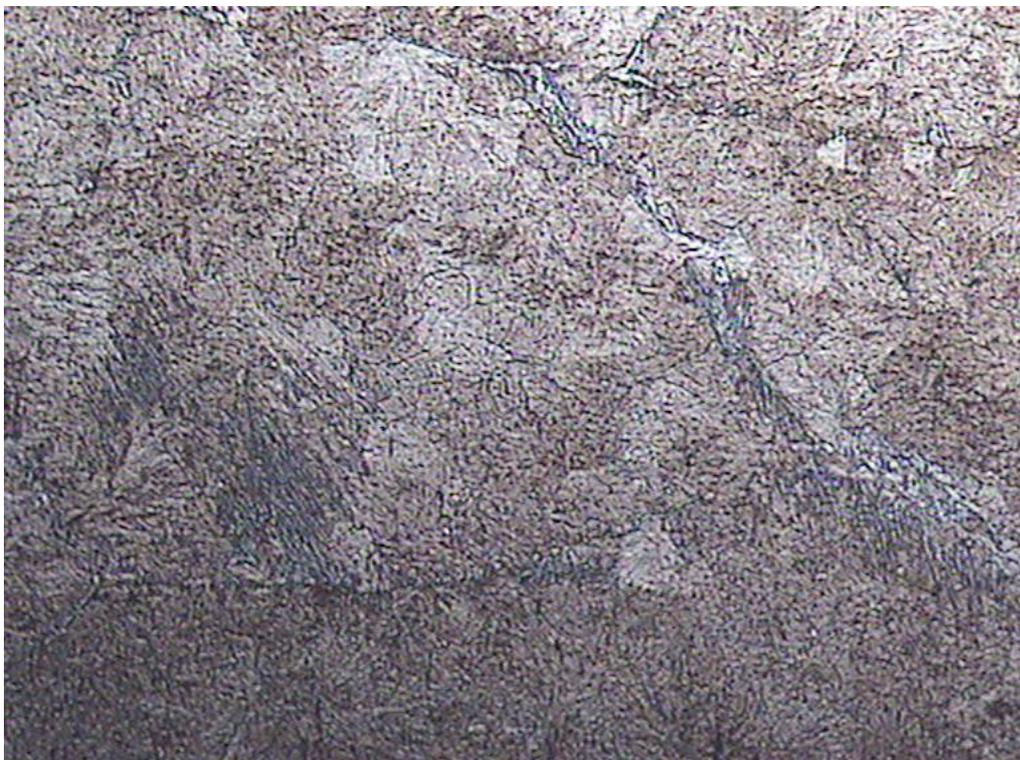
## Soldadura De Electrodo de Acero Inoxidable



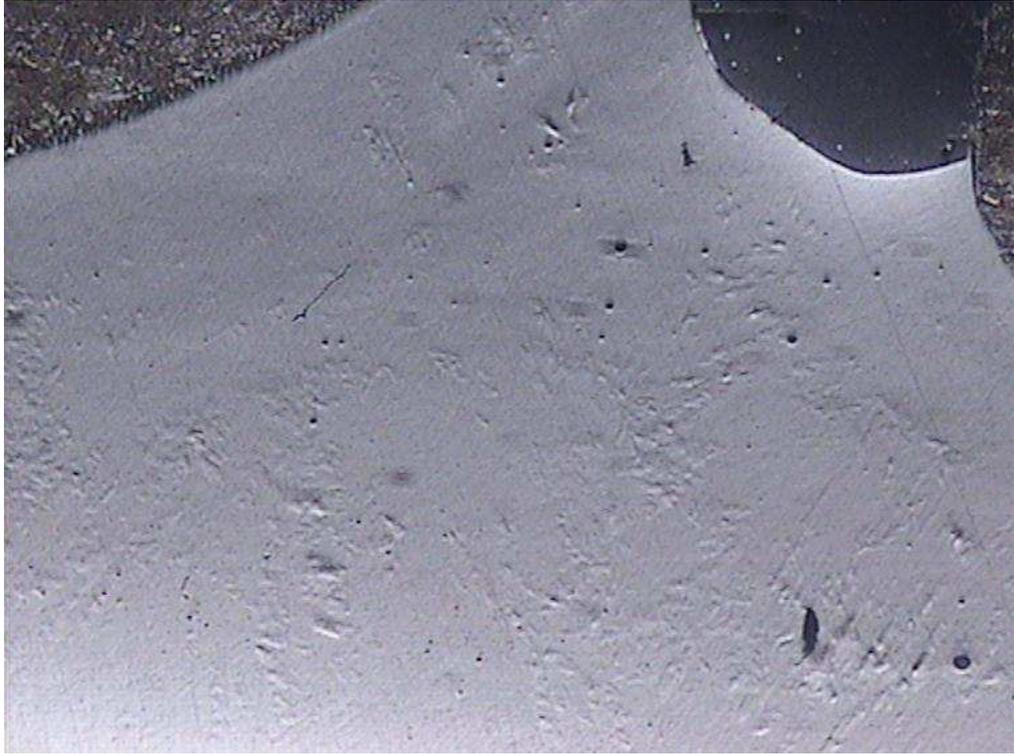
*Muestras Material Base F-1140 con soldadura de electrodo de acero inox. 400 x*



*Zona afectada por el calor F-1140 con soldadura de electrodo de acero inox. 50 x*



*Zona afectada por el calor F-1140 con soldadura de electrodo de acero inox. 200 x*



*Zona del material de aporte (soldadura) F-1140 con soldadura de electrodo de acero inox. 50 x*

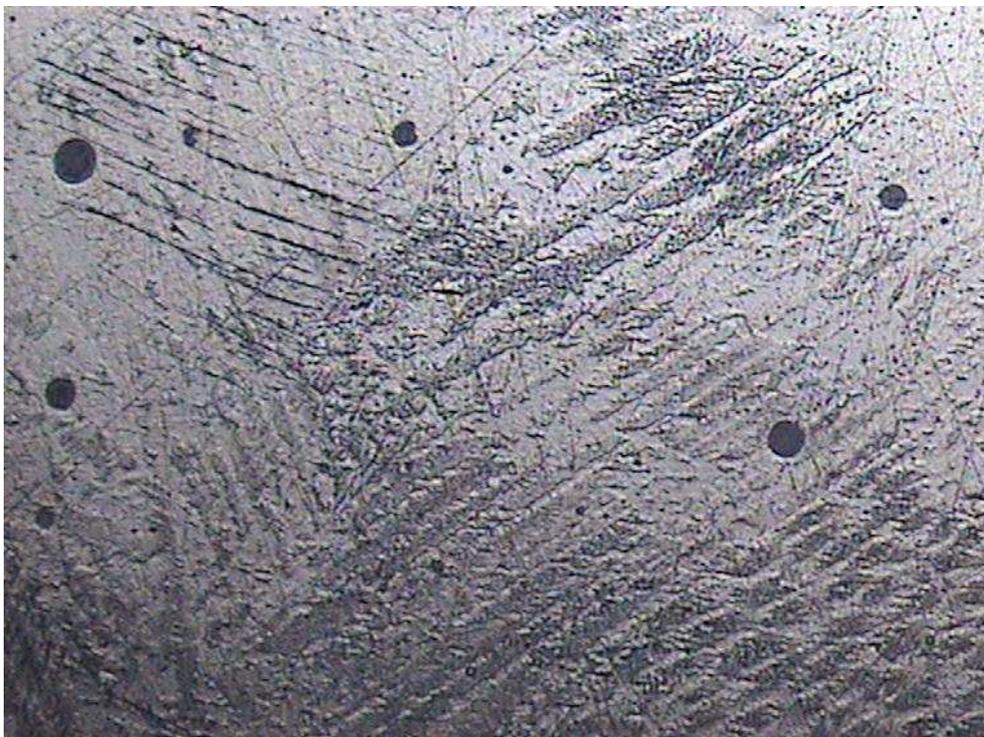


*Zona del material de aporte (soldadura) F-1140 con soldadura de electrodo de acero inox. 200*



*Zona del material de aporte después de atacar 50x*

Atacado con MARBLE (4 gr. sulfato de cobre, 20 ml. de HCl (ácido clorhídrico) y 20 ml. de agua)



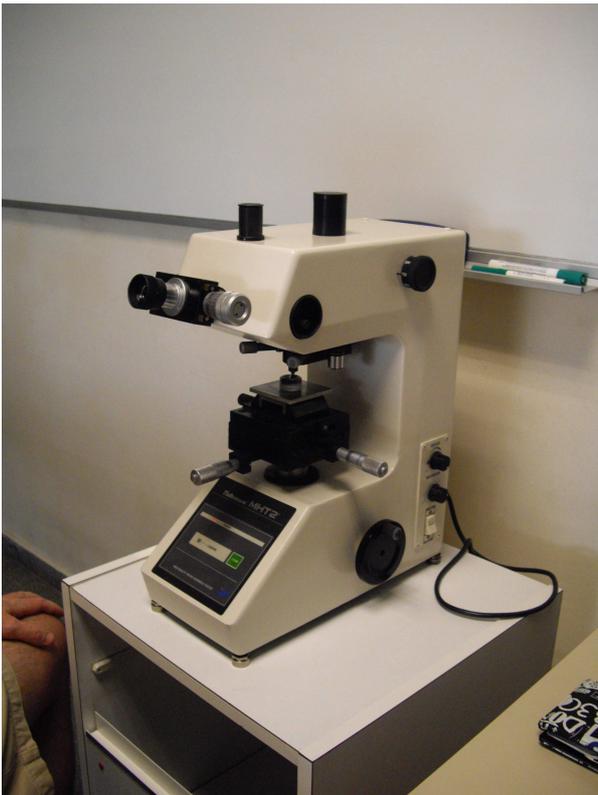
*Zona del material de aporte después de atacar 200x*

## 13. ENSAYOS DE DUREZA

### PROCEDIMIENTO

Este estudio consiste en el análisis de la dureza de las diferentes soldaduras realizadas al acero F-1140 estudiado en el presente proyecto. Las muestras para este ensayo se han preparado paralelamente con las probetas para los ensayos de tracción y doblado.

Para ello, se han cortado muestras de pequeño espesor de la sección transversal de la soldadura, para posteriormente embutirlas, desbastarlas y pulirlas en el laboratorio. Después se ha procedido al ataque químico de las probetas, para la observación y análisis de la microestructura mediante el microscopio.



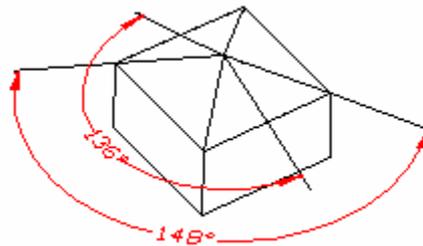
Una vez preparadas las muestras correspondientes a cada soldadura como se ha dicho previamente, se ha procedido a realizar las huellas necesarias con el microdurómetro y medir las diagonales de la huella con el mismo dispositivo

El método consiste en marcar varias huellas en cada una de las zonas correspondientes a la soldadura, es decir, pasando por la zona de aporte de material, en la interfase metal-soldadura y en la zona contigua correspondiente a la fundición.

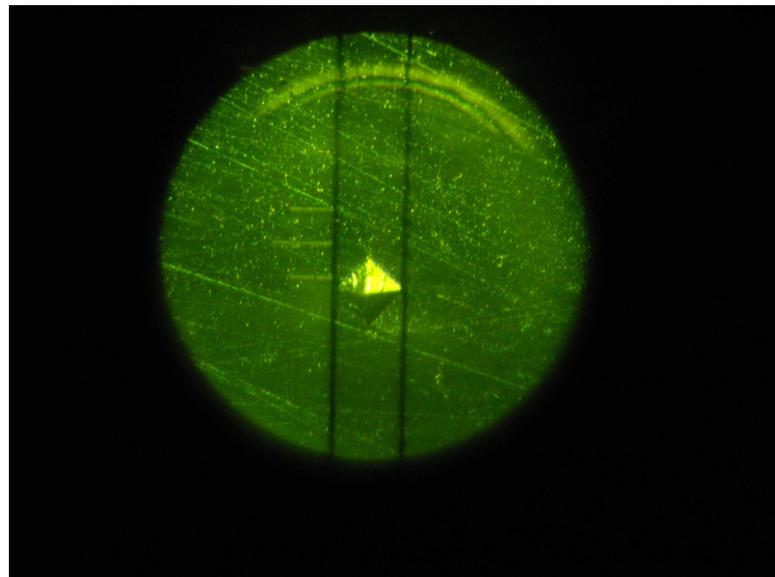
## ENSAYO VICKERS

Para realizar este estudio se ha realizado el **Ensayo de Microdureza Vickers** según la norma **UNE 112-029**.

El ensayo consiste en imprimir la marca de un penetrador en una muestra y medir con el microscopio las diagonales de la huella dejada en la superficie después de levantar el penetrador.



*Penetrador Vickers*



*Imagen del microscopio de una penetración*

El penetrador es una pirámide de diamante cuadrada, cuyo ángulo en el vértice es de  $136^{\circ}$ . La dureza Vickers se define con la relación:

$$HV = \frac{P}{S}$$

donde  $P$  es la carga aplicada en kg fuerza y  $S$  es la superficie lateral de la huella que se expresa con la ecuación:

$$S = \frac{d^2}{2 \cdot \sin 68^\circ}$$

quedando:

$$HV = \frac{2 \cdot P \cdot \sin 68^\circ}{d^2} = 1.8544 \cdot \frac{P}{d^2}$$

donde  $d$  es la media aritmética de las dos diagonales medidas.

Diagonal (mm)	Load 300 gf (0, 3 kgf)									
	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
18	1717	1698	1679	1661	1643	1625	1608	1591	1574	1557
19	1541	1525	1509	1493	1478	1463	1448	1433	1419	1405
20	1391	1377	1363	1350	1337	1323	1311	1298	1286	1273
21	1261	1249	1238	1226	1215	1203	1192	1181	1170	1160
22	1149	1139	1129	1118	1108	1099	1089	1079	1070	1061
23	1051	1042	1033	1025	1016	1007	999	990	982	974
24	966	958	950	942	934	927	919	912	904	897
25	880	873	866	858	852	845	840	832	826	820
26	813	806	800	792	785	778	770	763	757	750
27	763	757	752	746	741	735	730	725	720	715
28	709	704	699	694	690	685	680	675	671	666
29	651	657	652	648	643	639	635	631	626	622
30	618	614	610	606	602	598	594	590	586	583
31	579	575	571	568	564	561	557	553	550	547
32	543	540	536	533	530	527	523	520	517	514
33	511	508	505	502	499	496	493	490	487	484
34	481	478	476	473	470	467	465	462	459	457
35	454	451	449	446	444	441	439	436	434	432
36	421	427	424	422	420	417	415	413	411	408
37	406	404	402	400	398	396	393	391	389	387
38	385	383	382	381	379	377	375	373	371	369
39	364	364	362	360	358	356	355	353	351	349
40	344	346	344	342	341	339	337	336	334	332
41	324	329	327	326	325	323	321	320	318	317
42	315	314	312	311	308	308	306	305	304	302
43	301	299	298	297	295	294	293	291	290	289
44	287	286	285	283	282	281	280	278	277	276
45	275	273	272	271	270	269	267	266	265	264
46	263	262	261	259	258	257	256	255	254	253
47	252	251	250	249	248	247	245	244	243	242
48	241	240	239	238	237	236	235	235	234	233
49	232	231	230	229	228	227	226	225	224	223
50	222	222	221	220	219	218	217	216	216	215
51	214	213	212	211	211	210	209	208	207	206
52	206	205	204	203	203	202	201	200	200	199
53	198	197	197	196	195	194	194	193	192	191
54	191	190	189	189	188	187	187	186	185	185
55	184	183	183	182	181	181	180	179	179	178
56	177	177	176	175	175	174	174	173	172	172
57	171	171	170	169	169	168	168	167	166	166
58	165	165	164	164	163	163	162	161	161	160
59	160	159	159	158	158	157	157	156	156	155
60	155	154	153	153	152	152	151	151	150	150
61	149	149	149	148	148	147	147	146	146	145
62	145	144	144	143	143	142	142	141	141	141

Para calcular la dureza, se ha empleado el microdurómetro disponible en el DIMM, efectuando varias marcas en las distintas zonas de la soldadura y midiendo mediante el mismo dispositivo las diagonales de las huellas realizadas.

En nuestro ensayo, disponíamos además de unas tablas donde con la medida de la media de las dos diagonales, disponemos directamente de la dureza, como muestra la siguiente imagen:

## RESULTADOS MICRODUREZA

### Electrodo Rutilo

Numero	Lado horizontal	Lado Vertical	Media	Dureza
1	54	51,5	52,75	200
2	52,5	52	52,25	204
3	53	50,2	51,6	209
4	55	51,9	53,45	196
5	49	46,2	47,6	245
6	50,3	47,6	48,95	232
7	50,6	48,8	49,7	225
8	49,9	45,6	47,75	244
9	49,7	47	48,35	238
10	49	45,6	47,3	249
11	49,5	46,8	48,15	239
12	46,4	43,4	44,9	276
13	48	44,1	46,05	263
14	48,1	42,9	45,5	269
15	42,9	40,6	41,75	318
16	45,7	43,1	44,4	282
17	47,8	45,4	46,6	256
18	50,5	47,9	49,2	230
19	51,5	48,5	50	222
20	56,6	52,9	54,75	186
21	58	53,8	55,9	178
22	58,2	53,8	56	177
23	58	55	56,5	174
24	52,1	48,4	50,25	220
25	52	51	51,5	210
26	53,4	50,3	51,85	207
27	52,5	49,8	51,15	211
28	53,7	49,8	51,75	208
29	53	50,5	51,75	208
30	53	50,8	51,9	206

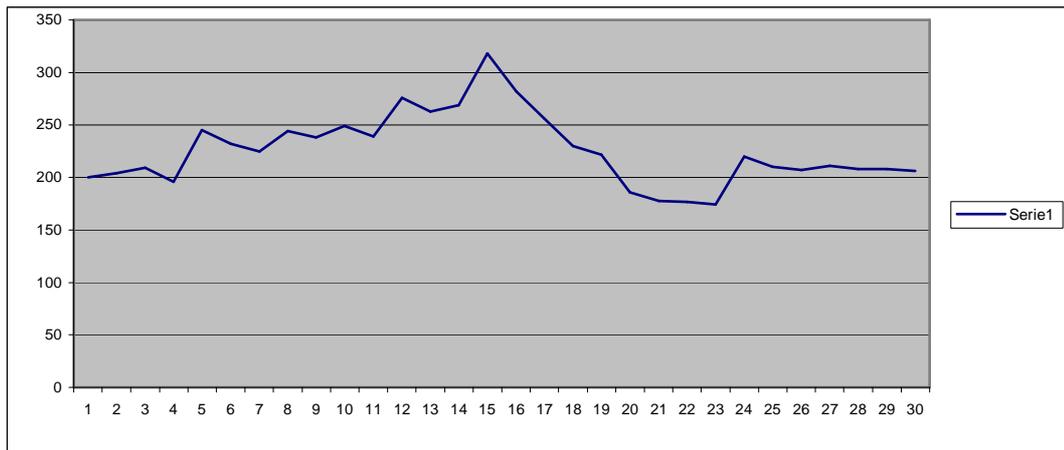
### Electrodo Básico

Numero	Lado horizontal	Lado Vertical	Media	Dureza
1	51,2	48,5	49,85	224
2	51,1	49	50,05	218
3	51	49,5	50,25	221
4	51,4	49	50,2	221
5	52	50	51	214
6	52,5	49,2	50,85	216
7	52,9	47,4	50,15	222
8	52,1	49,5	50,8	216
9	53	50,5	51,75	208
10	52	50,4	51,2	212
11	47	51	49	232
12	52,2	49,1	50,65	217
13	53,5	51,4	52,45	202
14	53,4	50,5	51,95	206
15	53,1	51,1	52,1	205
16	52,5	51,1	51,8	207
17	52	49,6	50,8	216
18	50,9	49,4	50,15	222
19	50,5	48,8	49,65	225
20	49,6	47	48,3	238
21	49,5	45,9	47,7	244
22	47	46,5	46,75	254
23	50,9	49,4	50,15	222
24	50,9	48,4	49,65	225
25	51,3	50	50,65	217
26	47,4	45,5	46,45	257
27	46,5	44	45,25	271
28	46,5	43,5	45	275
29	47,6	46	46,8	254
30	49,2	48	48,6	235
31	50,4	48,4	49,4	228
32	51,4	49,2	50,3	220
33	52,5	50,5	51,5	210
34	53,5	53,1	53,3	196
35	51	49,7	50,35	218
36	52,5	52	52,25	204
37	51,5	49,5	50,5	218

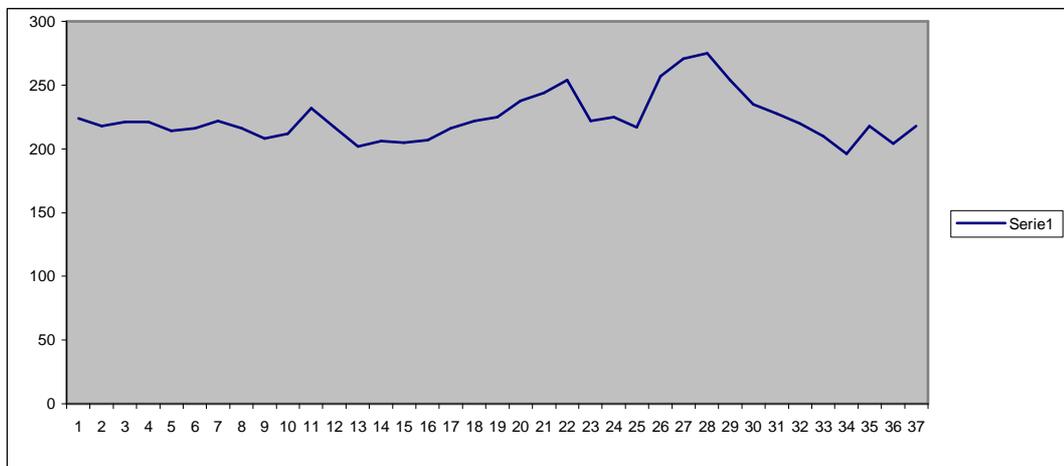
### Electrodo Inoxidable

Numero	Lado horizontal	Lado Vertical	Media	Dureza
1	50,4	50,2	50,3	220
2	51,5	50,2	50,85	216
3	50,2	50	50,1	222
4	50,5	48,3	49,4	228
5	51,5	49,5	50,5	218
6	49,7	49,5	49,6	226
7	49,9	48,9	49,4	228
8	50,2	49	49,6	226
9	48	46,2	47,1	251
10	47	45,9	46,45	257
11	45,4	44,5	44,95	275
12	45,9	44	44,95	275
13	41,5	41	41,25	326
14	43,5	42,2	42,85	304
15	44,5	41,5	43	301
16	45,5	44	44,75	278
17	42,6	42,4	42,5	308
18	46	42,6	44,3	283
19	30,6	28,3	29,45	639
20	35,2	33,4	34,3	473
21	42,6	40,2	41,4	325
22	47	43,4	45,2	272
23	45,6	43,5	44,55	281
24	46,4	43,7	45,05	273
25	47	44,5	45,75	265
26	47,9	45,6	46,75	255
27	50,3	48	49,15	231
28	49,2	47	48,1	240
29	50,7	48,5	49,6	226
30	50	49	49,5	227
31	50	47,8	48,9	233
32	49,6	47,1	48,35	237
33	51	48,5	49,75	224
34	50,5	48,5	49,5	227
35	50,5	48,7	49,6	226
36	50,6	48,6	49,6	226
37	50,5	48,4	49,45	227
38	50,4	48,9	49,65	226
39	50	48	49	230

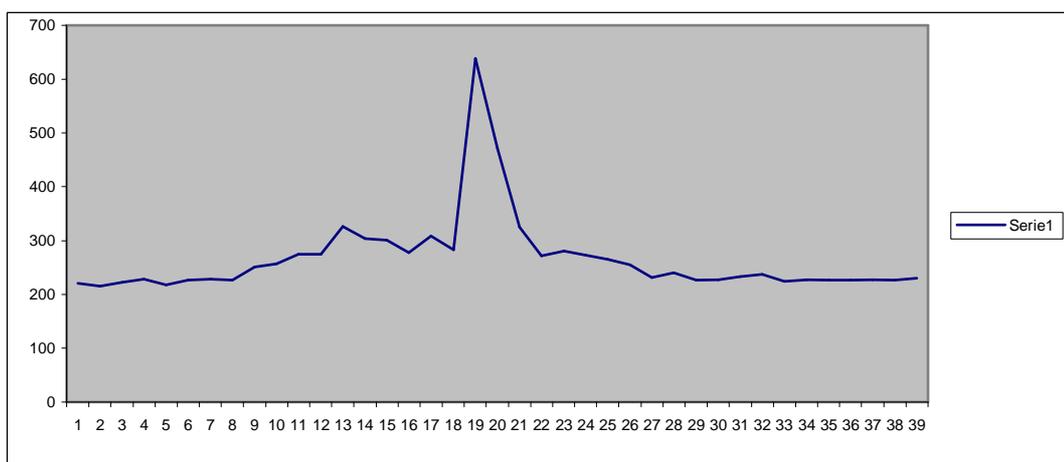
CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS Y SOLDABILIDAD DEL ACERO F-1140



*Ensayo de dureza con electrodo de rutilo*



*Ensayo de dureza con electrodo básico*



*Ensayo de dureza con electrodo de acero inoxidable*

Por lo general, en la gráficas se observa más o menos una continuidad hasta llegar a un punto donde comienza a subir en dureza. Esto es debido a que entra en la zona de afección del calor y la dureza comienza a subir ya que la estructura, en esta zona de mezclas de materiales se convierte en más dura pero a la vez más frágil.

Posteriormente crea un “valle” que dependiendo del material es más ancho o es más profundo a excepción del de acero inoxidable, que sería la zona de la soldadura donde el material de aporte es el que manda y la gráfica expresa la dureza de este material que también vería afectada su dureza por el calor pero menos que en la zona de fusión.

Por último comentar que los picos no son simétricos debido a que la soldadura se completó por ambas caras de las chapas y por lo tanto es posible que el material haya revenido y haya una mezcla de zonas de afección de claros y soldaduras que haga las gráficas de forma irregular.

En un caso más concreto, el del acero inoxidable, vemos que hay un pico de dureza justo en la zona de soldadura donde debería haber una zona cóncava como el resto de electrodos debido a que es la zona de soldadura, del material de aporte.

Pero al microscopio, pudimos observar la siguiente imagen donde justo en la zona de soldadura se formó una inclusión.

El carbono existente junto con el cromo del electrodo de acero inoxidable formó carburo de cromo que no endurece por calentamiento y que es un material muy duro pero a la vez muy frágil.



*Inclusión en la soldadura de acero inoxidable a50 aumentos*

- **“METODOS DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS INTA”**  
E. Ramirez, M. A. Fernández Soler, A. Alonso, G. Delojo, C. Valdecantos y J. M. Ríos
  
- **“MANUAL DEL SOLDADOR”**  
Germán Hernández Riesco, Ed. Cesol
  
  
- **“SOLDADURA DE LOS ACEROS : APLICACIONES (4ª EDICION ACTUALIZADA CO N REFERENCIAS A NORMAS EUROPEAS).”**  
Reina Gomez, Manuel, Ed. Plaza
  
  
- **“INTRODUCCIÓN A LA CIENCIA E INGENIERÍA DE LOS MATERIALES”**  
William D. Calister, Jr., Ed. Reverté, S.A.
  
  
- **“INTRODUCCION A LA CIENCIA DE MATERIALES PARA INGENIEROS”**  
SHACKELFORD, JAMES F. Ed.PEARSON 2010

## AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi agradecimiento al director de este Proyecto Fin de Grado, Manuel Pascual Guillamón por su atención mostrada para la ejecución de dicho proyecto y también a los técnicos del DIMM, esenciales para la realización de los ensayos.

La realización de este proyecto va dedicado a mi familia y en especial a mi padre al que le hubiera fascinado este momento.