



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

Selección del procedimiento de soldadura y análisis de las propiedades para la unión disimilar entre el acero termomecánico S700MC y el inoxidable AISI-304 presente en vehículos ferroviarios usando AISI-309 como material de aporte

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Mecánica

AUTOR/A: Adam Sanz, Adrián

Tutor/a: Salas Vicente, Fidel

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023

# ÍNDICE

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	3
ÍNDICE DE TABLAS.....	4
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	5
ÍNDICE DE GRÁFICOS .....	5
1. OBJETIVO.....	7
2. INTRODUCCIÓN .....	8
2.1 Diagrama hierro-carbono (Fe-C) .....	8
2.2 Aceros de baja aleación y alta resistencia .....	9
2.2.1 Composición:.....	10
2.2.2 Tratamiento termomecánico: .....	10
2.3 Aceros inoxidables .....	11
2.3.1 Aceros inoxidables ferríticos: .....	12
2.3.2 Aceros inoxidables austeníticos: .....	13
2.3.3 Aceros inoxidables martensíticos:.....	14
2.3.4 Aceros inoxidables dúplex:.....	15
2.4 Proceso de soldadura MAG.....	16
2.5 Cambios metalúrgicos en la unión soldada .....	20
2.5.1 Zona Afectada Térmicamente (HAZ): .....	20
2.5.2 Dilución del cordón de soldadura: .....	21
2.4.3 Diagrama de Schaeffler: .....	22
3. MATERIALES Y MÉTODOS .....	25
3.1 Materiales .....	25
3.1.1 Acero S700MC: .....	25
3.1.2 Acero AISI – 304:.....	29
3.1.3 Acero AISI – 309: .....	33

3.2	Ensayos mecánicos.....	37
3.2.1	Ensayo de tracción:.....	37
3.2.2	Ensayo de flexión:.....	39
3.2.3	Ensayo de dureza:.....	39
3.2.4	Metalografía: .....	41
3.2.5	Cupones de soldadura: .....	42
4.	RESULTADOS Y DISCUSIONES .....	43
4.1	Ensayo de tracción .....	44
4.2	Ensayo de flexión: .....	48
4.3	Ensayo de dureza: .....	51
4.4	Metalografía:.....	74
5.	PLIEGO DE CONDICIONES.....	77
6.	PRESUPUESTO .....	80
7.	CONCLUSIÓN .....	83
8.	BIBLIOGRAFÍA .....	85

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

<b>Ilustración 1:</b> Diagrama Fe-C .....	9
<b>Ilustración 2:</b> Diagrama Fe-Cr. ....	12
<b>Ilustración 3:</b> Microestructura de un acero inoxidable ferrítico .....	13
<b>Ilustración 4:</b> Microestructura de un acero inoxidable austenítico .....	14
<b>Ilustración 5:</b> Microestructura de un acero inoxidable martensítico.....	15
<b>Ilustración 6:</b> Estructura en bandas de ferrita y austenita .....	16
<b>Ilustración 7:</b> Proceso de soldadura MAG .....	17
<b>Ilustración 8:</b> Métodos de transferencia de metal en soldadura MAG.....	18
<b>Ilustración 9:</b> Pieza soldada con zona afectada térmicamente .....	21
<b>Ilustración 10:</b> Esquema de pieza donde en el cordón de soldadura se muestra la dilución. ....	22
<b>Ilustración 11:</b> Diagrama de Schaeffler .....	23
<b>Ilustración 12:</b> Diagrama de Schaeffler con las áreas de defectos durante el soldeo....	24
<b>Ilustración 13:</b> Micrografía del acero S700MC.....	25
<b>Ilustración 14:</b> Tratamientos termomecánicos en el acero S700MC .....	27
<b>Ilustración 15:</b> Microestructura del acero S700MC. ....	29
<b>Ilustración 16:</b> Metalografía del acero inoxidable AISI-304. ....	33
<b>Ilustración 17:</b> Representación de Cr <sub>eq</sub> y Ni <sub>eq</sub> para la soldadura MAG con dilución 35%. ....	36
<b>Ilustración 18:</b> Curva típica tensión-deformación .....	38
<b>Ilustración 19:</b> Máquina de tracción con extensómetro .....	38
<b>Ilustración 20:</b> Máquina de ensayo a flexión: <b>a</b> : en posición inicial; <b>b</b> : durante el ensayo .....	39
<b>Ilustración 21:</b> Microidentador Vickers MHT2 .....	40
<b>Ilustración 22:</b> Distancia mínima entre identaciones.....	41
<b>Ilustración 23:</b> Cupón soldado con respaldo cerámico en la parte posterior. ....	42
<b>Ilustración 24:</b> <b>A</b> y <b>B</b> : proceso de corte de la chapa en probetas; <b>C</b> : proceso de limado. ....	43
<b>Ilustración 25:</b> Roturas de las probetas en el ensayo a tracción.....	47
<b>Ilustración 26:</b> Esquema de ensayo a flexión en 3 puntos.....	48

<b>Ilustración 27:</b> Probetas después de realizar el ensayo a tracción .....	49
<b>Ilustración 28:</b> Ejemplo de indentación en prueba de dureza. ....	68
<b>Ilustración 29:</b> Microestructura del cordón de soldadura. ....	74
<b>Ilustración 30:</b> Microestructura del acero inoxidable AISI-304 en la HAZ. ....	75
<b>Ilustración 31:</b> Microestructura del acero S700MC en la HAZ. ....	75
<b>Ilustración 32:</b> Microestructura con recristalización.....	76

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1:</b> Composición química del análisis de colada para aceros con laminado termomecánico.....	27
<b>Tabla 2:</b> Características mecánicas de los aceros con laminado termomecánico. ....	28
<b>Tabla 3:</b> Composición química (análisis de colada) de los aceros austeníticos resistentes a la corrosión. Acero AISI – 304. ....	30
<b>Tabla 4:</b> Características mecánicas temperatura ambiente para aceros austeníticos en estado recocido y resistencia a la corrosión intergranular. ....	31
<b>Tabla 5:</b> Datos de referencia de algunas propiedades físicas de los aceros austeníticos resistentes a la corrosión. Acero AISI – 304.....	32
<b>Tabla 6:</b> Composición química (análisis de colada) de los aceros austeníticos y austenoferríticos refractarios. <b>Acero AISI-309.</b> .....	34
<b>Tabla 7:</b> Datos de referencia de algunas propiedades físicas de los aceros austeníticos y austenoferríticos refractarios. <b>Acero AISI-309.</b> .....	34
<b>Tabla 8:</b> Resultados obtenidos del ensayo a tracción de las diferentes probetas.....	44
<b>Tabla 9:</b> Fuerza máxima obtenida en las diferentes probetas en el ensayo de flexión..	49
<b>Tabla 10:</b> Estimación de resultados de dureza para S700MC según ecuación de Yurioka. ....	52
<b>Tabla 11:</b> Parámetros de soldeo de los diferentes cupones de ensayo y aporte térmico neto.....	54
<b>Tabla 12:</b> Resultados del tiempo que tarda el material en enfriarse desde 800°C a 500°C. ....	57
<b>Tabla 13:</b> Total de horas dedicadas por el estudiante y costo.....	81
<b>Tabla 14:</b> Costo de consumibles. ....	81

<b>Tabla 15:</b> Amortización de equipos. ....	82
--	----

## ÍNDICE DE ECUACIONES

<b>Ecuación 1:</b> Cromo equivalente.....	22
<b>Ecuación 2:</b> Níquel equivalente. ....	22
<b>Ecuación 3:</b> Fórmula para la obtención de dureza HV. ....	40
<b>Ecuación 4:</b> Obtención de la tensión en el ensayo de tracción. ....	44
<b>Ecuación 5:</b> Obtención de la tensión en el ensayo de flexión de 3 puntos. ....	48
<b>Ecuación 6:</b> Ecuación de Yurioka. ....	52
<b>Ecuación 7:</b> Máxima temperatura “ $T_p$ ” en un punto localizado a “ $Y$ ” mm de la línea de fusión. ....	53
<b>Ecuación 8:</b> Calor neto aportado. ....	53
<b>Ecuación 9:</b> Tiempo que tarda el material en enfriarse de 800°C a 500°C. ....	56
<b>Ecuación 10:</b> Ley de enfriamiento de Newton. ....	57
<b>Ecuación 11:</b> Evolución de la temperatura con el tiempo. ....	58

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

<b>Gráfica 1:</b> Resultados ensayos a tracción de las diferentes probetas soldadas. ....	45
<b>Gráfica 2:</b> Resultados de los ensayos de flexión. ....	50
<b>Gráfica 3:</b> Distribución de las temperaturas máximas en la HAZ para el acero S700MC. ....	55
<b>Gráfica 4:</b> Curvas de enfriamiento 39C0N. ....	59
<b>Gráfica 5:</b> Curvas de enfriamiento válida para todos los puntos de la HAZ 39C0N. ....	59
<b>Gráfica 6:</b> Curvas de enfriamiento 39C0S. ....	60
<b>Gráfica 7:</b> Curvas de enfriamiento válida para todos los puntos de la HAZ 39C0S. ....	60
<b>Gráfica 8:</b> Curvas de enfriamiento 39C3N. ....	61
<b>Gráfica 9:</b> Curvas de enfriamiento válida para todos los puntos de la HAZ 39C3N. ....	61
<b>Gráfica 10:</b> Curvas de enfriamiento 39C3S. ....	62
<b>Gráfica 11:</b> Curvas de enfriamiento válida para todos los puntos de la HAZ 39C3S. ....	62
<b>Gráfica 12:</b> Curvas de enfriamiento 39P0S. ....	63

<b>Gráfica 13:</b> Curvas de enfriamiento válida para todos los puntos de la HAZ 39P0S. ....	63
<b>Gráfica 14:</b> Curvas de enfriamiento 39P0N. ....	64
<b>Gráfica 15:</b> Curvas de enfriamiento válida para todos los puntos de la HAZ 39P0N. ....	64
<b>Gráfica 16:</b> Curvas de enfriamiento 39P3N. ....	65
<b>Gráfica 17:</b> Curvas de enfriamiento válida para todos los puntos de la HAZ 39P3N. ....	65
<b>Gráfica 18:</b> Curvas de enfriamiento 39P3S. ....	66
<b>Gráfica 19:</b> Curvas de enfriamiento válida para todos los puntos de la HAZ 39P3S. ....	66
<b>Gráfica 20:</b> Curvas de enfriamiento válidas para todos los puntos de la HAZ (TODAS). ....	67
<b>Gráfica 21:</b> Dureza Vickers sin respaldo. ....	69
<b>Gráfica 22:</b> Dureza Vickers con respaldo. ....	69
<b>Gráfica 23:</b> Dureza Vickers sin bisel. ....	70
<b>Gráfica 24:</b> Dureza Vickers con bisel. ....	70
<b>Gráfica 25:</b> Dureza Vickers arco pulsado. ....	71
<b>Gráfica 26:</b> Dureza Vickers cortocircuito. ....	71
<b>Gráfica 27:</b> Dureza Vickers de todas las muestras. ....	72

## 1. OBJETIVO

El presente Trabajo Final de Grado tiene como objetivo la selección adecuada del procedimiento de soldadura junto con sus parámetros clave, como la intensidad, el voltaje y la velocidad de soldeo. Así mismo, se realizará un análisis exhaustivo de las propiedades resultantes en la unión disimilar entre el acero termomecánico S700MC y el acero inoxidable AISI-304, usando el AISI-309 como material de aporte, los cuales son ampliamente utilizados en la fabricación de componentes para vehículos ferroviarios.

Para alcanzar el objetivo propuesto, se llevarán a cabo diferentes ensayos mecánicos entre ellos, los ensayos de tracción, flexión y dureza. Con estos ensayos se podrá evaluar la resistencia, la ductilidad y la tenacidad de la unión soldada bajo diferentes condiciones de carga y deformación. Los resultados obtenidos en estos ensayos proporcionarán información valiosa sobre la calidad de la unión y su comportamiento en situaciones que se ajustan a la realidad en su uso en vehículos ferroviarios.

Asimismo, también se realizará un análisis metalográfico para examinar la microestructura de la zona de soldadura y la Zona Afectada Térmicamente (HAZ), lo que permitirá identificar posibles defectos o inclusiones que puedan afectar la integridad de la unión. Este análisis microestructural, será complementado con la evaluación de la dureza en la HAZ para poder comprender la distribución de las propiedades mecánicas a lo largo de la unión.

## 2. INTRODUCCIÓN

El acero termomecánico S700MC es un acero empleado en el sector ferroviario, usado para la fabricación de una amplia gama de piezas y componentes gracias a sus excelentes propiedades estructurales, de las cuales se puede destacar su combinación de resistencia mecánica y ductilidad, lo que permite la fabricación de estructuras más ligeras y resistentes, siendo muy empleado en componentes críticos que deben soportar grandes esfuerzos y tensiones.

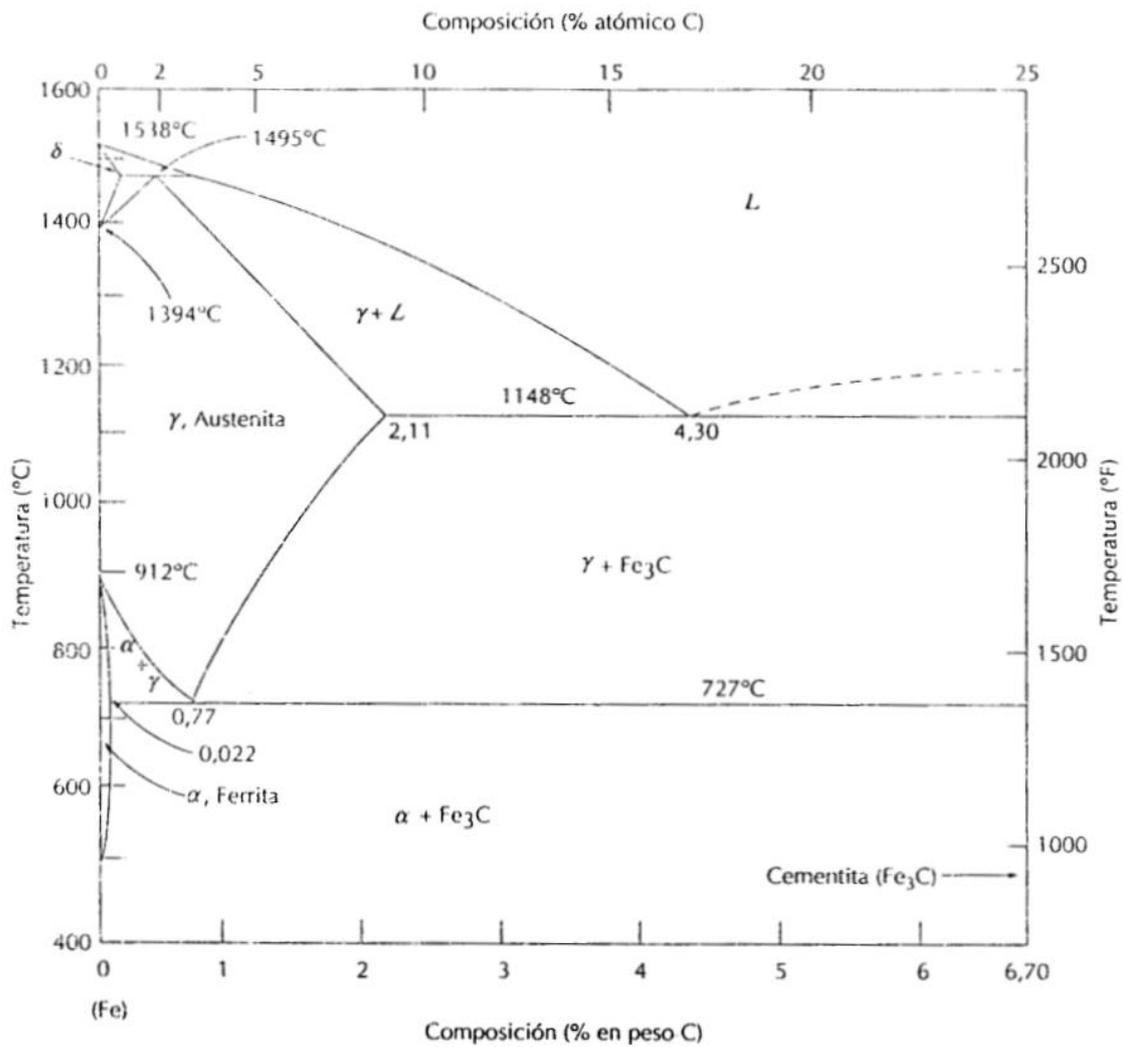
Así mismo, uno de los aceros inoxidables más empleados en el sector ferroviario es el AISI-304. Algunas de las características a destacar son la resistencia a la corrosión, resistencia a la oxidación, alta resistencia y bajo peso entre otras, siendo usado comúnmente en la fabricación de componentes exteriores como carrocería, al igual que en el sistema de freno debido a su durabilidad y resistencia.

### 2.1 Diagrama hierro-carbono (Fe-C)

El diagrama hierro-carbono es una herramienta que nos permite conocer de forma precisa y clasificar los diversos tipos de aceros mediante la relación entre temperatura y el porcentaje de carbono, esto hace que podamos localizar diferentes estructuras cristalinas y fases sólidas como son la ferrita ( $\delta$ ), austenita ( $\gamma$ ), ferrita ( $\alpha$ ) y cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ).

El acero es un material en el cual el hierro es el elemento predominante, el contenido de carbono es generalmente un valor entre el 0.008% y el 2.11% en peso, además, está formado por otros elementos en cantidades más pequeñas.

La clasificación de los aceros según su contenido de carbono es la siguiente: aceros al carbono, aceros de baja aleación y aceros de alta aleación.



*Ilustración 1: Diagrama Fe-C*

## 2.2 Aceros de baja aleación y alta resistencia

Los aceros de baja aleación y alta resistencia, también conocidos como aceros HSLA, son una aleación que nos permite obtener una mayor resistencia frente a la corrosión en comparación a los aceros al carbono tradicionales, así como, unas propiedades mecánicas mejoradas sin que se vea afectada su ductilidad y tenacidad.

La principal diferencia de los aceros HSLA en comparación con los aceros aleados normales es que su diseño lo determinan unas propiedades mecánicas específicas a cumplir y no una composición química específica.

### **2.2.1 Composición:**

La composición química de los aceros de baja aleación y alta resistencia es variable dependiendo del grado y aplicación específica. Normalmente este tipo de aceros suelen estar compuestos entre un 0.05% y 0.25% de carbono para evitar fragilidad y tener una conformabilidad y soldabilidad suficientes, además suelen tener hasta un 2% de contenido en magnesio.

Los componentes químicos restantes se controlan cuidadosamente para optimizar las propiedades mecánicas y la soldabilidad. Se suelen utilizar pequeñas cantidades de cromo, molibdeno, níquel, cobre, vanadio, niobio, nitrógeno y circonio en diferentes combinaciones.

El niobio, el vanadio y el titanio son fuertes formadores de carburos y nitruros. Las partículas finas de carburo o nitruro de estos metales tienden a obstaculizar el movimiento de los límites de grano, reduciendo así el tamaño de grano al dificultar su crecimiento. La reducción del tamaño de grano en los aceros HSLA, hace que aumente su resistencia y tenacidad al mismo tiempo, esto es un dato bastante interesante ya que normalmente la tenacidad de los aceros disminuye a medida que aumenta su resistencia.

Para mejorar la resistencia se le añade al acero vanadio, niobio, cobre y titanio, así como para mejorar la resistencia a la corrosión se le añade silicio, cobre, cromo y fósforo.

### **2.2.2 Tratamiento termomecánico:**

Para mejorar las propiedades mecánicas del acero, como la resistencia, la ductilidad y la tenacidad, se puede realizar un tratamiento termomecánico, el cual consiste en someter al material a temperaturas elevadas donde se le aplica de forma simultánea una deformación plástica. Algunos de estos procesos de tratamiento termomecánico incluyen operaciones de laminado, extrusión, forja o estirado entre otros.

De forma general el proceso es realizado en tres etapas: 1. Calentamiento hasta alcanzar una temperatura determinada. 2. Deformación. 3. Enfriamiento controlado. En algunos de los diferentes tratamientos térmicos es posible la repetición de alguna de las etapas.

Durante el proceso de calentamiento, el acero alcanza temperaturas entre 800°C y 1200°C, posteriormente se realiza el proceso de deformación en el cual se producen cambios en la microestructura del acero, cambiando la forma y la orientación de los granos, obteniendo una microestructura más fina y homogénea, haciendo que aumente la resistencia y tenacidad del acero.

Finalmente, en el enfriamiento controlado, se debe tener en cuenta la velocidad de enfriamiento ya que de esa velocidad dependerán tanto la naturaleza de los componentes microestructurales del acero como el tamaño de grano.

### 2.3 Aceros inoxidables

Se define al acero inoxidable como un rango bastante amplio de aleaciones cuyas propiedades hace que su uso sea extendido en diversas aplicaciones.

El término acero nos indica que se trata de una aleación de hierro, mientras el adjetivo inoxidable implica la ausencia de oxidación y corrosión en ambientes en los que los aceros comunes son susceptibles de sufrir estos ataques.

Para conseguir que un acero sea inoxidable, se debe añadir un 11% de cromo como mínimo en masa, creándose así una capa adherente de óxido de cromo sobre la superficie del acero.

Los aceros inoxidables más modernos cuya base sigue siendo el hierro y el cromo, pueden estar compuestos además de Molibdeno que se añade para poder mejorar la resistencia a la corrosión por picadura y Níquel para obtener una estructura austenítica.

Aunque son diferentes los elementos de aleación presentes en los aceros inoxidables, el contenido total de estos está por debajo del contenido en hierro, siendo por tanto aceros.

Según la microestructura en los aceros inoxidables, así como del contenido de aleantes y/o el tratamiento térmico, se pueden clasificar en tres tipos principales: ferríticos, austeníticos y martensíticos. Además de estos tres tipos de aceros inoxidables, también destaca el dúplex.

### 2.3.1 Aceros inoxidables ferríticos:

Los aceros inoxidables ferríticos están formados por una estructura cristalina de hierro alfa ( $\text{Fe-}\alpha$ ). Los aceros inoxidables ferríticos son principalmente aleaciones formadas con cromo donde su contenido varía de 10.5% al 30% y con un contenido en carbono a niveles bajos  $C < 0.08\%$ , aunque algunos grados pueden contener silicio, aluminio, molibdeno, niobio y titanio.

Una de las principales características de este tipo de acero inoxidable es que no son muy adecuados para soldar debido a la aparición de precipitados de fase sigma, y el gran endurecimiento de grano que experimentan cuando se calientan durante el proceso de soldeo haciendo que aumente la fragilidad de soldadura en la zona afectada por el calor (HAZ).

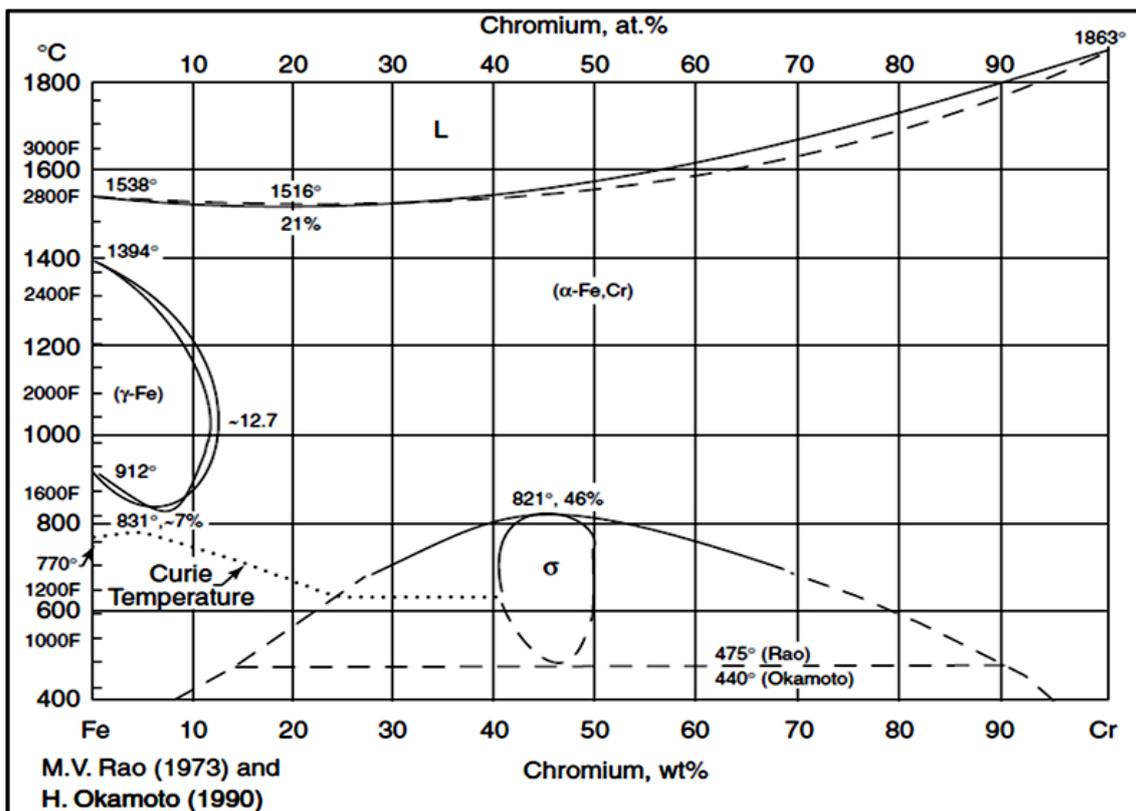
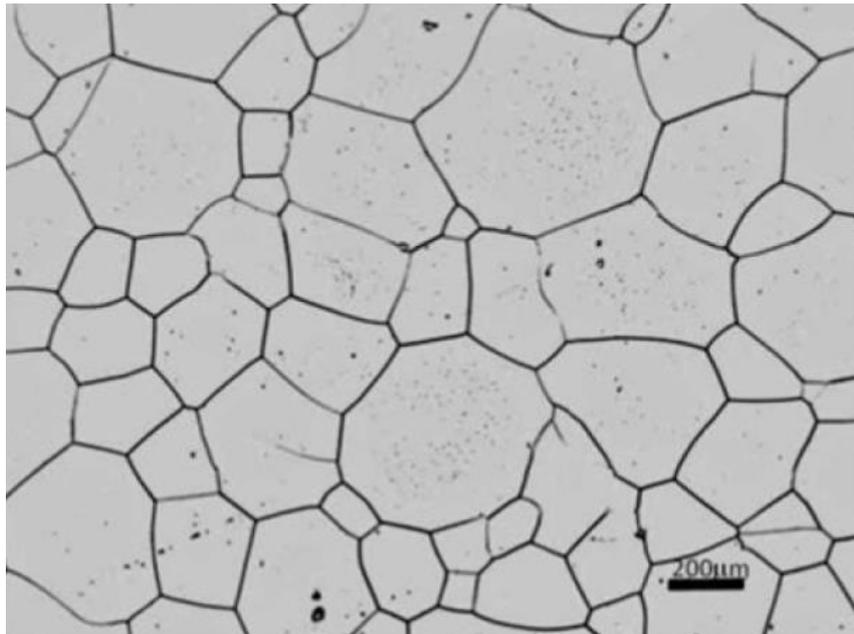


Ilustración 2: Diagrama Fe-Cr.

Estos aceros junto a los aceros inoxidables martensíticos forman la familia AISI400.

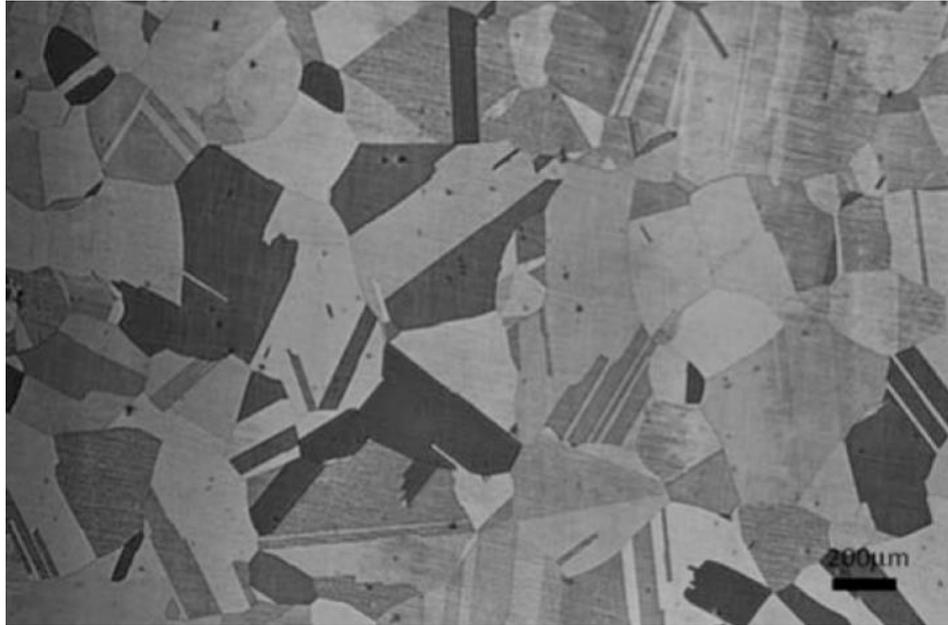


*Ilustración 3: Microestructura de un acero inoxidable ferrítico*

### **2.3.2 Aceros inoxidables austeníticos:**

Los aceros inoxidables austeníticos se obtienen con la adición de elementos formadores de austenita como son el níquel, manganeso e incluso nitrógeno en algún caso. Su contenido en cromo varía entre un 16% y un 26% y el contenido en carbono entre un 0.03% y un 0.08%. Su composición se encuentra totalmente en equilibrio con la finalidad que a temperatura ambiente su estructura sea totalmente (o casi) austenítica. Al tener esta composición hace que este tipo de acero inoxidable tenga una mayor resistencia a la corrosión, así como que sea más maleable y soldable, ofreciendo grandes prestaciones mecánicas.

Estos aceros se dividen en dos series, la serie AISI300 (aleación cromo – níquel) y la serie AISI200 (aleación cromo – manganeso – nitrógeno).



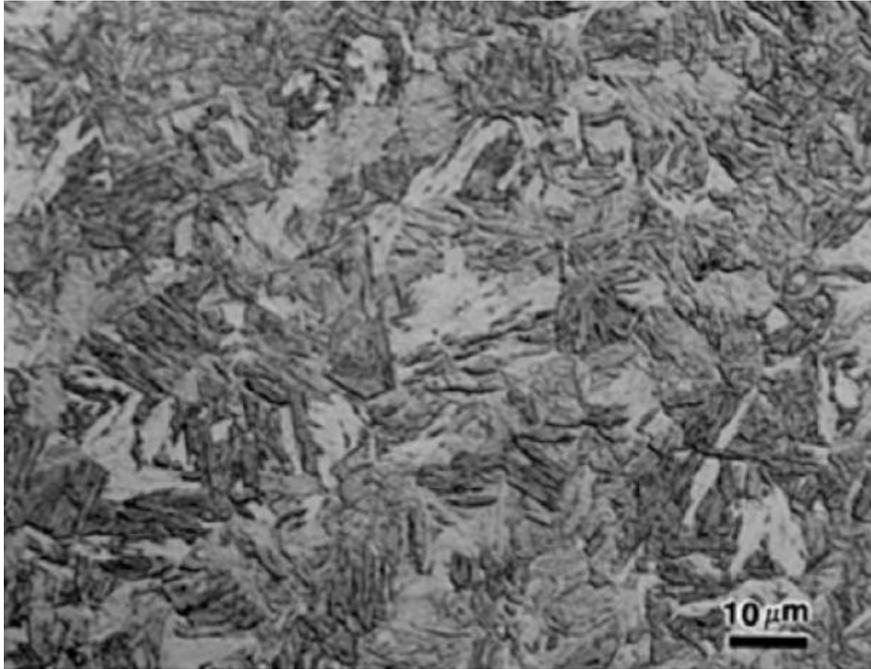
*Ilustración 4: Microestructura de un acero inoxidable austenítico*

En estos aceros no es posible el endurecimiento mediante el tratamiento térmico ya que no es posible la transformación alfa( $\alpha$ )-gamma ( $\gamma$ ). No obstante, es posible endurecer estos aceros mediante una deformación en frío.

### **2.3.3 Aceros inoxidables martensíticos:**

Los aceros martensíticos están compuestos a partir de una aleación Fe-Cr, pero tienen un mayor contenido de carbono que los aceros ferríticos alcanzando valores de hasta 1.2%, mientras que el contenido de cromo es entre el 10.5% y el 18%. Esto hace que los aceros inoxidables martensíticos se puedan endurecer mediante el tratamiento térmico del temple, donde una vez calentado el material, se debe enfriar rápidamente produciéndose así una estructura martensítica (Ilustración 5).

A causa del alto contenido en carbono y su elevada dureza causada por su composición microestructural, tienen escasa soldabilidad. Así mismo poseen una resistencia elevada, relativamente buena tenacidad y son resistentes a la corrosión de ácidos orgánicos, pero no al agua salada ni a ambientes marinos.



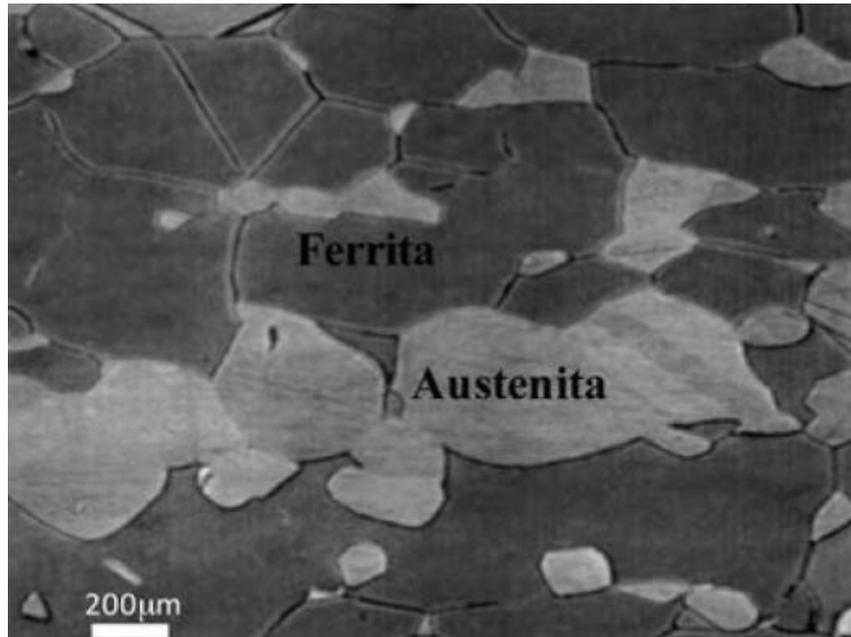
*Ilustración 5: Microestructura de un acero inoxidable martensítico*

La soldabilidad de estos aceros, al igual que la de los austeníticos, se considera buena.

#### **2.3.4 Aceros inoxidables dúplex:**

Los aceros inoxidables dúplex combinan una estructura bifásica formada por granos de ferrita y austenita. Presentan una estructura de ferrita entre el 30% y 50% y austenita entre el 70% y 50%, por lo que presentan propiedades intermedias entre los aceros inoxidables austeníticos y los ferríticos. La fracción volumétrica de cada fase depende de la temperatura de solubilización, así como de la composición química de la aleación. Los aceros inoxidables dúplex presentan un contenido de cromo entre el 18% y el 26% y de níquel entre el 4.5% y el 6.5%.

Debido a que estos tipos de aceros están formados por cuatro elementos de aleación principales que son el cromo, níquel, molibdeno y nitrógeno, y en algunos casos por elementos de aleación secundarios como son el silicio, cobre, tungsteno y manganeso, es difícil poder predecir la microestructura exacta incluso en las condiciones de equilibrio.



*Ilustración 6: Estructura en bandas de ferrita y austenita*

#### 2.4 Proceso de soldadura MAG

La soldadura MAG (Metal Active Gas) es un proceso de soldadura en el que se utiliza un arco eléctrico entre un electrodo consumible y la pieza que deseamos unir. Durante el proceso de soldadura, un gas de protección activo como puede ser el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), argón (Ar) o una mezcla de gases, se suministra al área del arco con la finalidad de proteger la soldadura del ambiente. El gas de protección empleado en la soldadura puede afectar su calidad, así como la velocidad de soldadura. El dióxido de carbono es el más empleado por ser el más económico, y se utiliza principalmente en los aceros al carbono, en cambio el argón se utiliza en la soldadura de aceros inoxidable y aleaciones de aluminio.

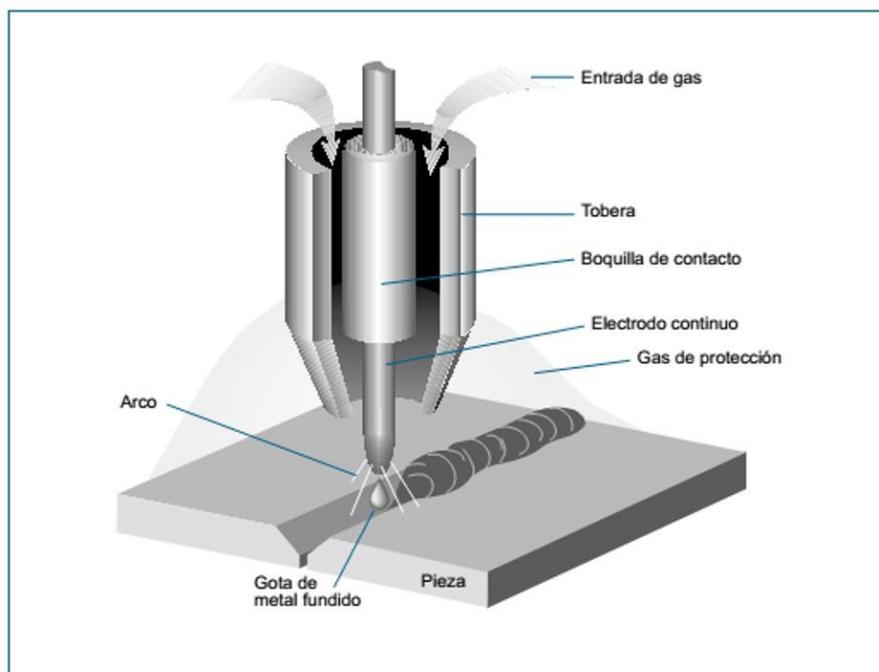
El proceso de soldadura MAG se utiliza de forma común en la industria del acero gracias a su alta velocidad de producción que puede llegar a 1 metro por minuto, versatilidad y facilidad de automatización, es empleado sobre todo en aceros al carbono, aceros de baja aleación, aceros inoxidable, aluminio y cobre.

La soldadura MAG se realiza normalmente con corriente continua y polaridad positiva. El electrodo consumible utilizado en este proceso es un alambre sólido o una varilla de alambre tubular, que es alimentada de forma continua a través de la pistola de soldadura

y se funde en el arco eléctrico. La polaridad positiva se debe a que los iones positivos en el electrodo consumible se desplazan hacia la pieza de trabajo y depositan energía en el arco eléctrico, además la polaridad positiva ayuda a la estabilización del arco y a que se lleve a cabo una penetración profunda en la pieza de trabajo.

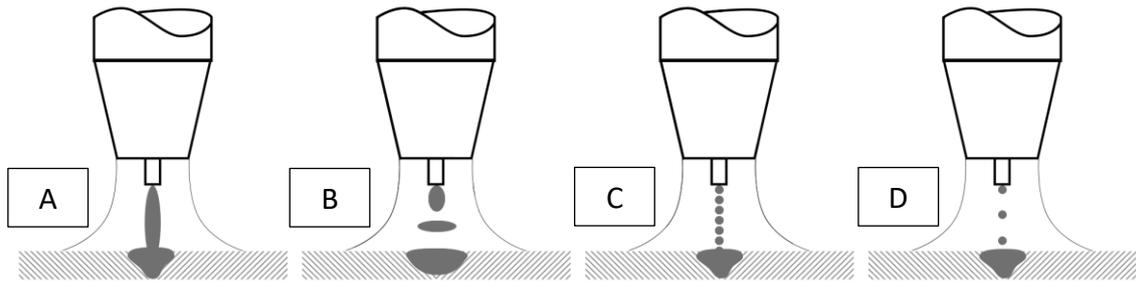
La velocidad de alimentación del alambre se debe ajustar para controlar el tamaño del cordón de soldadura, en cambio la corriente y el voltaje se regulan para poder controlar la cantidad de calor que se transfiere a la pieza de trabajo.

El control de estos parámetros, así como de la calidad del gas de protección y el diámetro del alambre son muy importantes para poder obtener una soldadura de calidad, aunque también se debe tener en cuenta que la contaminación del aire es capaz de causar porosidad en la soldadura.



*Ilustración 7: Proceso de soldadura MAG*

Existen 4 métodos de transferencia de metal utilizados en el proceso de soldadura MAG.



*Ilustración 8: Métodos de transferencia de metal en soldadura MAG*

1. **Transferencia por cortocircuito** (Ilustración 8A): Proceso por el que el alambre de soldadura hace contacto directo con la pieza que se va a soldar, produciéndose un cortocircuito eléctrico. Este funde el extremo del alambre, generando una gota de metal líquido depositándose en la zona de soldadura.

Este método de transferencia se utiliza de forma común en aplicaciones de baja corriente y en posición plana normalmente. La baja corriente hace que la transferencia de metal sea más controlada, esto ayuda a que se reduzca la formación de salpicaduras y hace que el proceso de soldadura sea más estable. La posición plana permite un fácil acceso a la pieza de trabajo y tener un buen control del proceso de soldadura.

Este proceso de transferencia de metal es especialmente adecuado para láminas delgadas y materiales sensibles al calor, ya que al usar baja corriente y al generarse una menor energía térmica ayudan a evitar distorsiones y deformaciones excesivas en la pieza de trabajo generando una soldadura precisa y de alta calidad, además en este proceso el cordón de soldadura es normalmente más suave y uniforme.

2. **Transferencia globular** (Ilustración 8B): Proceso mediante el cual el alambre de soldadura se funde hasta que se forma una gota de gran tamaño, la cual se desprende de forma irregular y posteriormente se transfiere a la zona de soldadura.

Este proceso de transferencia de metal se utiliza generalmente en situaciones en las que se quiere conseguir una penetración moderada y una apariencia de cordón de soldadura más suave. Se utiliza principalmente en aceros inoxidables

y en trabajos donde se requiere una menor velocidad de soldadura, aunque comparado con otros procesos de transferencia de metal en la soldadura, este método suele generar más salpicaduras.

3. **Transferencia por spray** (Ilustración 8C): En este proceso se funde el alambre de soldadura mediante el uso de corriente a alta intensidad generando así un chorro continuo de gotas de metal fundido que se pulverizan hacia la zona que se desea soldar.

Este proceso emplea como se ha mencionado anteriormente alta corriente y velocidad de deposición obteniéndose una excelente calidad en la soldadura, aunque para ello es necesario controlar la velocidad a la que se va a pulverizar las partículas de metal y estas dependen de la corriente, la velocidad de alimentación del alambre, el diámetro de este y la composición del gas de protección.

La transferencia en spray ofrece una mayor eficiencia de disposición y una mayor penetración en comparación con otros métodos, además también destaca la baja cantidad de salpicaduras y la buena estabilidad del arco, aunque se debe tener en cuenta que se puede generar una alta intensidad de calor en la zona de la soldadura, por lo que esto puede afectar a la orientación y posición de la pieza, es por ello que es recomendable soldar en posición plana o horizontal para que la gravedad pueda ayudar a mantener la estabilidad del arco.

4. **Transferencia por pulverización axial** (Ilustración 8D): Durante este proceso se usa un voltaje estable y una corriente eléctrica alta para poder fundir de forma continua el metal de aporte en el extremo del electrodo de soldadura pulverizándose en finas partículas.

Estas partículas de metal fundido se proyectan de forma axial hacia la pieza que se desea soldar, lográndose una transferencia eficiente del metal gracias a la presión y las fuerzas generadas por el arco eléctrico.

La pulverización axial es usada de forma común en procesos que requieren altas velocidades de deposición y mayor productividad, lo que permite finalizar la soldadura en las piezas de forma más rápida comparándose con otros métodos,

generando así soldaduras de alta calidad y una menor generación de salpicaduras.

Para todo ello es importante controlar y ajustar parámetros como la corriente eléctrica, el voltaje, el tipo de gas de protección utilizado y la composición del electrodo de metal de aporte.

## 2.5 Cambios metalúrgicos en la unión soldada

### **2.5.1 Zona Afectada Térmicamente (HAZ):**

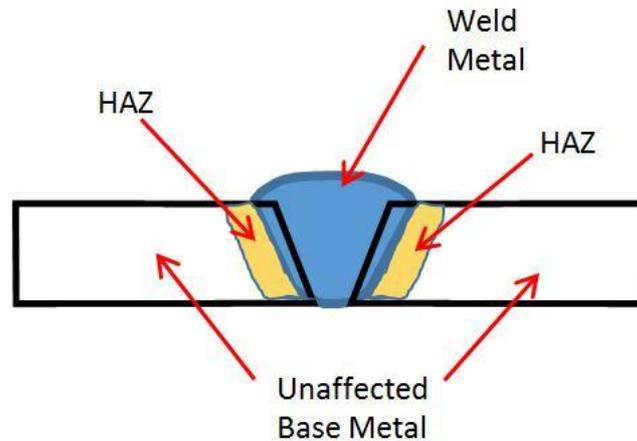
La zona afectada térmicamente, también conocida como HAZ (Heat Affected Zone), es una región en la pieza de trabajo próxima al cordón de soldadura (Ilustración 9) que experimenta cambios en su microestructura y propiedades a causa del calor producido durante el proceso de soldadura. La extensión de estos cambios en la zona afectada térmicamente depende de diversos factores, como la corriente de soldadura, el metal base, la velocidad de soldadura, el proceso de enfriamiento y el estado del material antes de la soldadura.

Dado que la HAZ experimenta diversos ciclos térmicos (temperaturas máximas y velocidades de enfriamiento), es posible obtener una amplia gama de microestructuras en el interior de la pieza soldada, y además las variaciones locales pueden ser grandes. Dentro de esta zona existen muchas reacciones metalúrgicas posibles y cualquier zona de la HAZ es susceptible de sufrir recristalización, crecimiento de grano, transformación de fases, formación de precipitados y/o tensión residual.

Teniendo en cuenta que en la zona afectada térmicamente pueden variar las propiedades como la resistencia, tenacidad y ductilidad, se deben controlar de forma correcta los parámetros de soldadura para minimizar los cambios microestructurales en la pieza y evitar una pérdida de propiedades mecánicas que suponga un riesgo para el funcionamiento del elemento una vez se ponga en servicio.

Para el caso de las aleaciones de cobre y aluminio, estas poseen una alta conductividad térmica que permite que el calor fluya fácilmente fuera de la región de soldadura (alta difusividad térmica), por lo que se producirá una HAZ estrecha.

El caso de aceros inoxidable y aleaciones a base de níquel es completamente, al contrario, ya que en estos se formará una HAZ ancha debido a que presentan una baja conductividad térmica, y hace que el calor se acumule alrededor de la zona de soldadura.



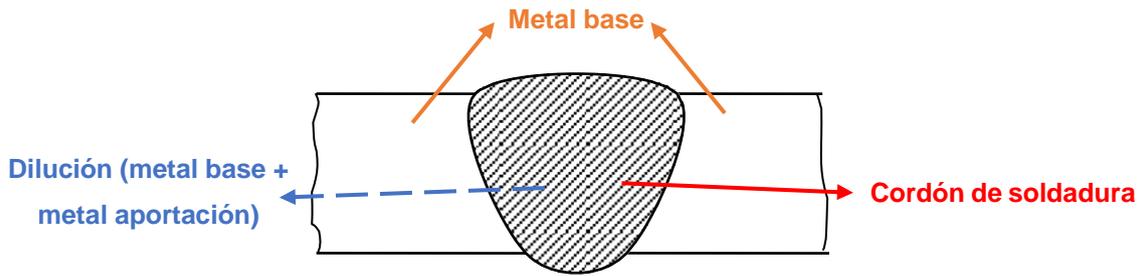
*Ilustración 9: Pieza soldada con zona afectada térmicamente*

### **2.5.2 Dilución del cordón de soldadura:**

La dilución se define como el porcentaje de material en el cordón que proviene del metal base que funde durante la soldadura y se mezcla con el metal de aporte, también fundido, para dar origen a lo que será el cordón de soldadura. Este parámetro implica un cambio en la composición química del metal de aporte a causa de mezclarse con el metal base durante el proceso de fusión. En algunos casos, la dilución puede ser beneficiosa al mejorar la resistencia y la resistencia a corrosión del cordón de soldadura, pero en otros casos puede afectar a las propiedades mecánicas y la composición química en el mismo.

Por ejemplo, si se emplean aceros inoxidable como recubrimiento de aceros al carbono, que hace que sean resistentes a la corrosión, con una dilución significativa que se considera del 40% aproximadamente, se puede reducir el contenido en cromo hasta un nivel en que el acero deje de ser resistente frente a la corrosión.

La dilución se puede reducir utilizando una corriente menor de soldadura, un electrodo más pequeño o aumentando la distancia entre el electrodo y la pieza. Se debe considerar que algunos materiales de aporte son más resistentes a la dilución. Es el caso de los electrodos de acero inoxidable que en general son menos sensibles que los electrodos ferríticos.



*Ilustración 10: Esquema de pieza donde en el cordón de soldadura se muestra la dilución.*

### **2.4.3 Diagrama de Schaeffler:**

El diagrama de Schaeffler (Ilustración 11) es una herramienta gráfica que se emplea para determinar si un electrodo es compatible con el material base, que debe ser un acero inoxidable, que se desea soldar.

Este diagrama nos permite determinar soldando la composición que tendrá el cordón de soldadura y si esa composición puede acarrear algún tipo de problema. En el eje horizontal (eje de las X) se representa el valor de cromo equivalente ( $Cr_{eq}$ ) y en el eje vertical (eje de las Y) el valor de níquel equivalente ( $Ni_{eq}$ ).

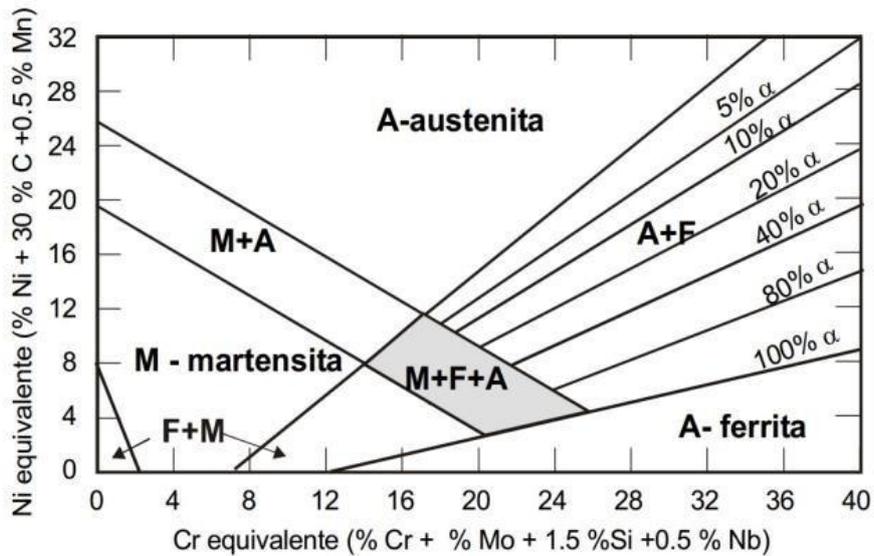
Para calcular el cromo y el níquel equivalentes de un acero inoxidable se emplean las siguientes ecuaciones.

$$Cr_{eq} = \%Cr + \%Mo + 1.5 \cdot (\%Si) + 0.5 \cdot (\%Nb)$$

*Ecuación 1: Cromo equivalente*

$$Ni_{eq} = \%Ni + 30 \cdot (\%C) + 0.5 \cdot (\%Mn)$$

*Ecuación 2: Níquel equivalente.*



*Ilustración 11: Diagrama de Schaeffler*

El diagrama de Schaeffler es una herramienta muy útil sobre todo para la soldadura de dos aceros inoxidables distintos entre un acero inoxidable y un acero al carbono, ya que nos permite predecir la posibilidad de aparición de defectos graves en la soldadura según la estructura que se forma en el cordón.

En la ilustración 12 se pueden apreciar las diferentes zonas diferenciadas por colores que corresponden a dichos defectos.

Rojo: Riesgo de fisura en caliente por temperaturas superiores a 1250°C.

Verde: Riesgo de fragilidad en temperaturas entre 500°C y 900°C.

Azul: Crecimiento del grano por temperaturas superiores a 1150°C.

Morado: Fisuración por temple por temperaturas inferiores a 400°C.

Diagrama de Schaeffler

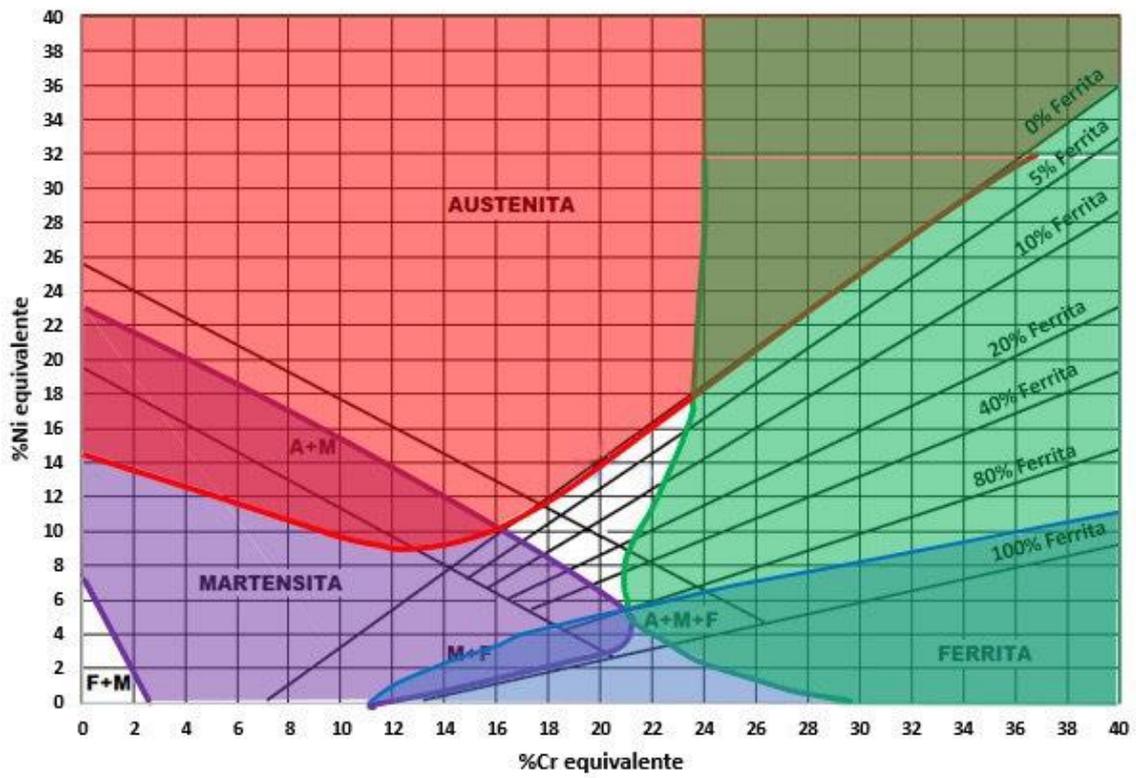


Ilustración 12: Diagrama de Schaeffler con las áreas de defectos durante el soldeo.

## 3. MATERIALES Y MÉTODOS

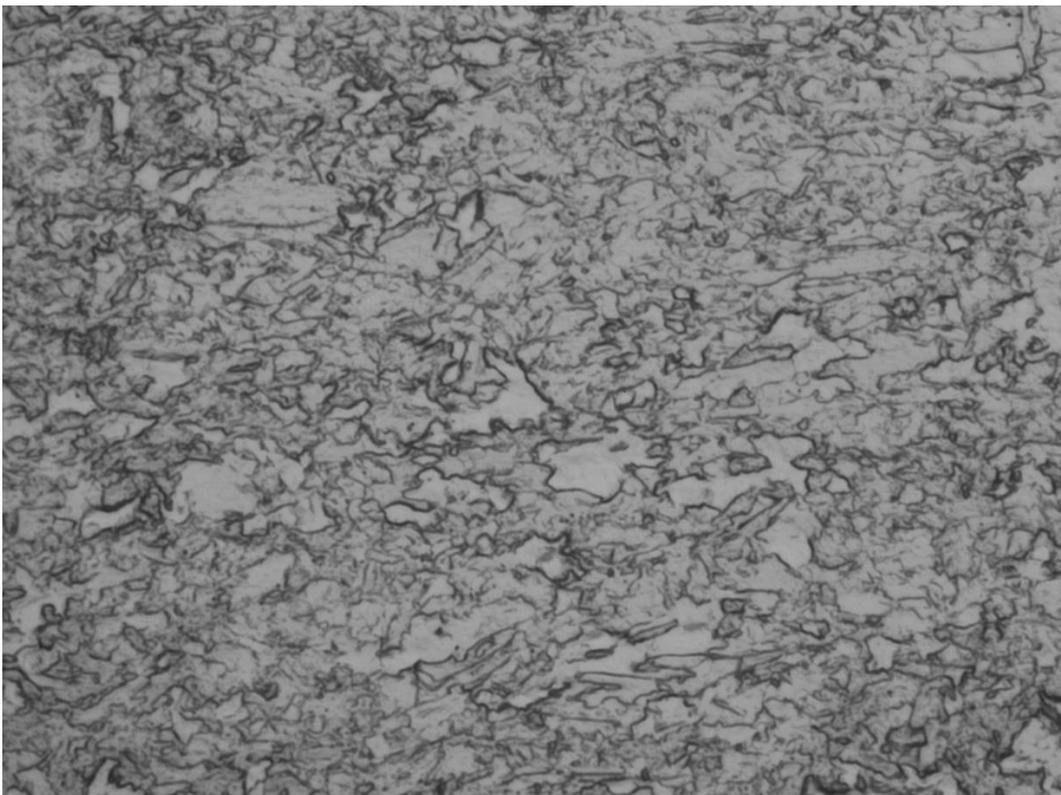
### 3.1 Materiales

#### 3.1.1 Acero S700MC:

El acero S700MC que es un acero termomecánico se encuentra dentro de los aceros laminados en caliente para su conformado en frío, caracterizado por su alta resistencia y baja aleación (aceros HSLA), que como se ha mencionado anteriormente, se caracterizan por tener buena tenacidad y soldabilidad.

La letra “S” en S700MC señala que se trata de un acero estructural, y el número 700 indica el límite elástico mínimo que debe tener el acero que es 700MPa.

Generalmente presenta una buena soldabilidad con soldadura convencional como la MAG.



*Ilustración 13: Micrografía del acero S700MC*

En la ilustración 13, se puede apreciar que el acero S700MC presenta un tamaño de grano pequeño a causa de los tratamientos térmicos y procesos de deformación a los que se somete.

Existen dos tratamientos termomecánicos que se suelen aplicar normalmente al acero S700MC (Ilustración 12) con la finalidad de mejorar sus propiedades mecánicas. Estos son el ausforming (deformación isotérmica) y el tempforming (conformado a temperatura controlada).

1. **Ausforming:** Tratamiento termomecánico mediante el cual el acero S700MC se deforma plásticamente a temperaturas elevadas, normalmente a unos 1273K, esto permite que se forme una microestructura bainítica fina y uniforme, compuesta por placas de bainita y carburos dispersos.

La microestructura bainítica es destacable por su alta resistencia y tenacidad, además esta presenta su estructura en forma de placas que ayuda a proporcionar una mayor resistencia a fractura y buena ductilidad, por otro lado, los carburos que se encuentran dispersos ayudan a mejorar la resistencia y la dureza del acero.

En cuanto a las propiedades mecánicas del acero S700MC, este tratamiento termomecánico ayuda a mejorar la resistencia a tracción, con ello el límite elástico, además también se ve mejorada su resistencia a fatiga y la capacidad de deformación en caliente.

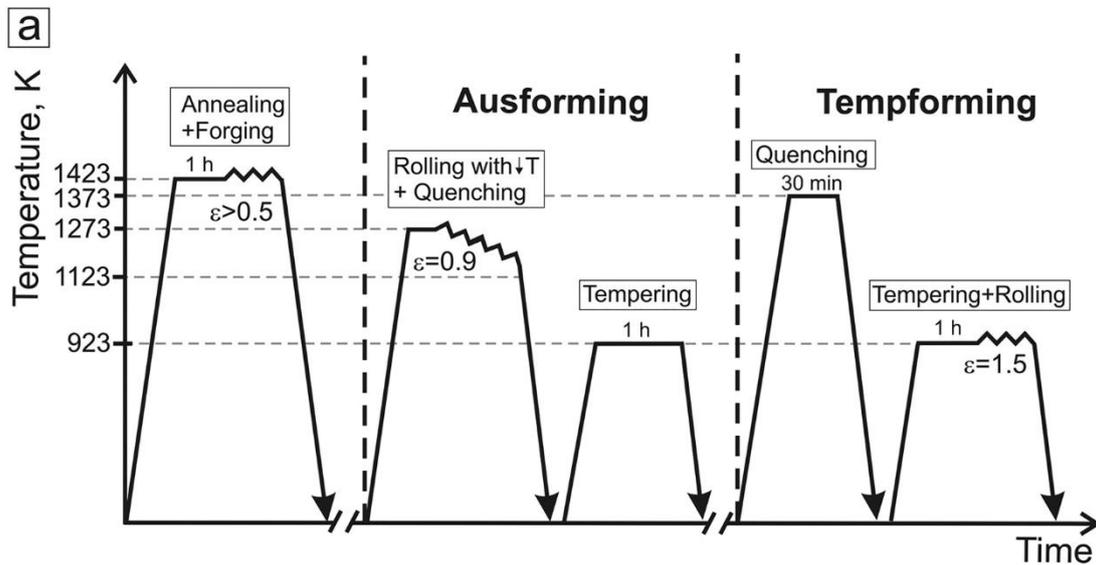
2. **Tempforming:** Tratamiento termomecánico mediante el cual se combina el conformado plástico en caliente con un enfriamiento controlado como el enfriamiento en agua o aire. El acero se suele calentar a una temperatura aproximada de 1373K durante unos 30 minutos y posteriormente se enfría desde los 923K durante 1 hora aproximadamente.

Al igual que en el ausforming, se obtiene una estructura bainítica fina y uniforme proporcionando al acero una combinación de resistencia y tenacidad.

En cuanto sus propiedades mecánicas destacan la resistencia a tracción, el límite elástico y la dureza del acero.

Las principales diferencias son que la temperatura de calentamiento es ligeramente superior en el tempforming, además en el caso del ausforming, se produce el proceso de laminación justo después del calentamiento, mientras que en el tempforming el proceso de laminación se produce en el enfriamiento controlado. En lo relacionado con la microestructura y propiedades mecánicas ambas son muy similares.

Debido al bajo contenido de carbono en el acero S700MC, la presencia de bainita no conduce a niveles de dureza comparables a los que se logran en aceros para temple con mayores contenidos en carbono y otros aleantes.



**Ilustración 14:** Tratamientos termomecánicos en el acero S700MC

La composición química y las características mecánicas que debe cumplir del acero S700MC son establecidas por la norma UNE-EN 10149-2 (Productos planos laminados en caliente de acero de alto límite elástico para conformado en frío).

Designación del tipo de acero		C	Mn	Si	P	S	Al total	Nb	V	Ti	Mo	B
		%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Designación simbólica	Designación numérica	máx.	máx.	máx.	máx.	máx.	mín.	máx.	máx.	máx.	máx.	máx.
S700MC	1.8974	0,12	2,10	0,60	0,025	0,015 <sup>b</sup>	0,015	0,09 <sup>a</sup>	0,20 <sup>a</sup>	0,22 <sup>a</sup>	0,50	0,005

<sup>a</sup> La suma de los contenidos de Nb, V y Ti debe ser como máximo del 0,22%.

<sup>b</sup> Si se acuerda en el momento de hacer el pedido, el contenido de azufre debe ser como máximo del 0,010% (análisis de colada).

**Tabla 1:** Composición química del análisis de colada para aceros con laminado termomecánico.

Designación del tipo de acero		Límite elástico mínimo $R_{eH}$  MPa <sup>a,e</sup>	Resistencia a tracción  $R_m$  MPa <sup>a,e</sup>	Alargamiento mínimo a la rotura  A  % <sup>a</sup>		Doblado a 180° con un diámetro mínimo del mandril de <sup>b,c</sup>
				Espesor nominal en mm		
Designación simbólica	Designación numérica			< 3 $L_o = 80 \text{ mm}$	$\geq 3$ $L_o = 5,65\sqrt{S_o}$	
S700MC	1.8974	700 <sup>d</sup>	750 - 950	10	12	2t

<sup>a</sup> Los valores del ensayo de tracción se aplican a probetas longitudinales.

<sup>b</sup> Los valores del ensayo de doblado se aplican a probetas transversales.

<sup>c</sup> t = espesor en mm de la probeta para el ensayo de doblado.

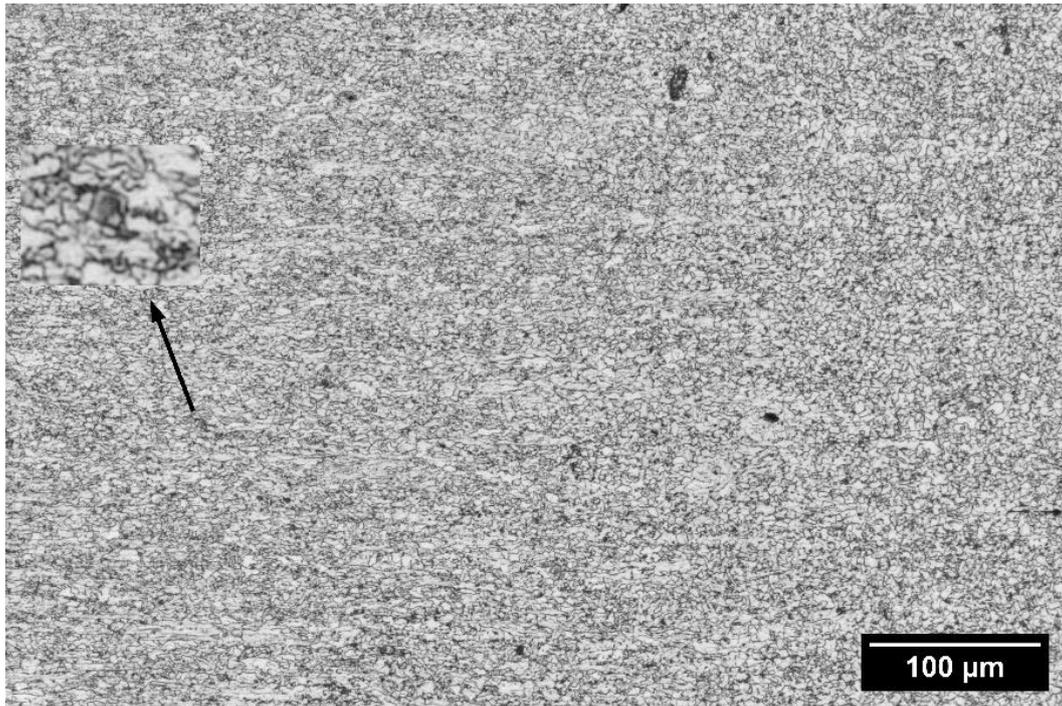
<sup>d</sup> Para espesores > 8 mm el límite elástico mínimo se puede reducir en 20 MPa <sup>e</sup>.

<sup>f</sup> 1 MPa = 1 N/mm<sup>2</sup>

**Tabla 2:** Características mecánicas de los aceros con laminado termomecánico.

En la siguiente ilustración, que corresponde a la microestructura del metal base S700MC, se observan granos bainíticos de tamaño notablemente reducido, lo que indica una formación de bainita fina. Este aspecto indica que se ha realizado un proceso de enfriamiento controlado que ha permitido la transformación de la austenita en bainita, favoreciendo así la obtención de una microestructura altamente resistente y tenaz.

Además, se ha identificado la presencia de algunos precipitados de nitruro de vanadio, tal y como indica la flecha. Estos precipitados actúan como agentes de endurecimiento y pueden contribuir al incremento de la resistencia mecánica del material.



*Ilustración 15: Microestructura del acero S700MC.*

### **3.1.2 Acero AISI – 304:**

El acero AISI – 304 es un acero inoxidable que se encuentra dentro de los aceros austeníticos. Su estructura está formada por una aleación de hierro, manganeso, carbono, fósforo, silicio, sulfuro, níquel y un contenido aproximado del 18% en cromo. Esta composición hace que sea uno de los aceros inoxidables más comunes y ampliamente utilizados gracias a su resistencia a la corrosión y oxidación.

El acero inoxidable AISI – 304 es muy buen material para trabajar en soldadura gracias a su buena soldabilidad, su baja sensibilidad a la fragilización, su estabilidad en la microestructura y su baja conductividad térmica entre otras.

La composición química y las propiedades físicas características que cumplir son establecidas por la norma UNE – EN 10088-1:2015 (Aceros inoxidables. Parte 1: Relación de aceros inoxidables) teniendo en cuenta que el acero AISI – 304 corresponde a la designación simbólica X5CrNi18-10.

Designación del acero		% en masa <sup>a</sup>										
Simbólica	Numérica	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	N	Cu <sup>c</sup>	Otros
X5CrNi18-10	1.4301	0,07	1,00	2,00	0,045	0,015 <sup>b</sup>	17,5 a 19,5	-	8,0 a 10,5	0,10	-	-

<sup>a</sup> Valores máximos si no se indica otra cosa.

<sup>b</sup> Para las barras, el alambón, el alambre, los perfiles, y los productos calibrados y los semiproductos afectados, se aplica un contenido máximo de azufre de 0,030%. Determinados contenidos de azufre pueden suponer una mejora de ciertas propiedades particulares. Para el mecanizado, se recomienda y autoriza contenido controlado de azufre comprendido entre el 0,015% y el 0,030%. Para el soldeo, se recomienda y autoriza un contenido controlado de azufre comprendido entre el 0,008% y el 0,030%. Para el pulido, se recomienda un contenido controlado máximo de azufre de 0,015%.

<sup>c</sup> Para los tipos de acero austeníticos destinados al estampado y a la extrusión en frío, se admite un contenido máximo de Cu del 1.0%

**Tabla 3:** Composición química (análisis de colada) de los aceros austeníticos resistentes a la corrosión. Acero AISI – 304.

Designación del acero		Forma del producto	Espesor	Límite elástico convencional al 0,2% $R_{p0,2}$	Límite elástico convencional al 1% $R_{p1,0}^c$	Resistencia a la tracción $R_m$	Alargamiento de rotura		Energía de flexión por choque (ISO-V)		Resistencia a la corrosión intergranular <sup>b</sup>	
Simbólica	Numérica						$A_{80}^{d,f}$ < 3 mm de espesor	$A^{d,g}$ ≥ 3 mm de espesor	$KV_2$ > 10 mm de espesor		en el estado de suministro	en estado sensibilizado <sup>i</sup>
		mm máx.	MPa *) mín. (tr.) <sup>d,e</sup>	MPa *)	% mín. (tr.)	% mín. (tr.)	J mín. (long.)	J mín. (tr.)				
Tipos normalizados												
X5CrNi18-10	1.4301	C	8	230	260	540 a 750	45 <sup>j</sup>	45 <sup>j</sup>	-	-	sí	no <sup>k</sup>
		H	13,5	210	250	520 a 720			100	60		
		P	75	210	250		45	45				

<sup>a</sup> El tratamiento en disolución puede omitirse si las condiciones para el trabajo en caliente y los siguientes enfriamientos se hacen de modo que se obtienen los requisitos para las propiedades mecánicas del producto y la resistencia a la corrosión intergranular tal y como se definen en la Norma EN ISO 3651-2.

<sup>b</sup> C = banda laminada en frío; H = banda laminada en caliente; P = chapa laminada en caliente.

<sup>c</sup> Sólo como guía.

<sup>d</sup> En el caso de bandas laminadas de anchura < 300 mm, si las probetas se toman longitudinalmente, el valor mínimo se reduce de la siguiente manera:  
 – límite elástico convencional – menos 15 MPa.  
 – alargamiento para longitud constante – menos 5%.  
 – alargamiento para longitud proporcional – menos 2%.

<sup>e</sup> Para productos laminados en caliente en continuo, pueden acordarse en el momento de la solicitar la oferta y hacer el pedido valores mínimos superiores a 20 MPa para  $R_{p0,2}$  y valores mínimos superiores a 10 MPa para  $R_{p1,0}$ .

<sup>f</sup> Los valores se aplican a probetas con una longitud entre marcas de 80 mm y una anchura de 20 mm. Pueden también utilizarse probetas con una longitud entre marcas de 50 mm y una anchura de 12,5 mm.

<sup>g</sup> Los valores se aplican a probetas con una longitud entre marcas de  $5,65 \sqrt{S_0}$ .

<sup>h</sup> Cuando se ensaye de acuerdo con la Norma EN ISO 3651-2.

<sup>i</sup> Véase la NOTA 2 del apartado 6.4.

<sup>j</sup> Para materiales de nivelación por estiramiento, el valor mínimo es un 5% más bajo.

<sup>k</sup> Tratamiento de sensibilización durante 15 min a 700 °C seguido de enfriamiento al aire.

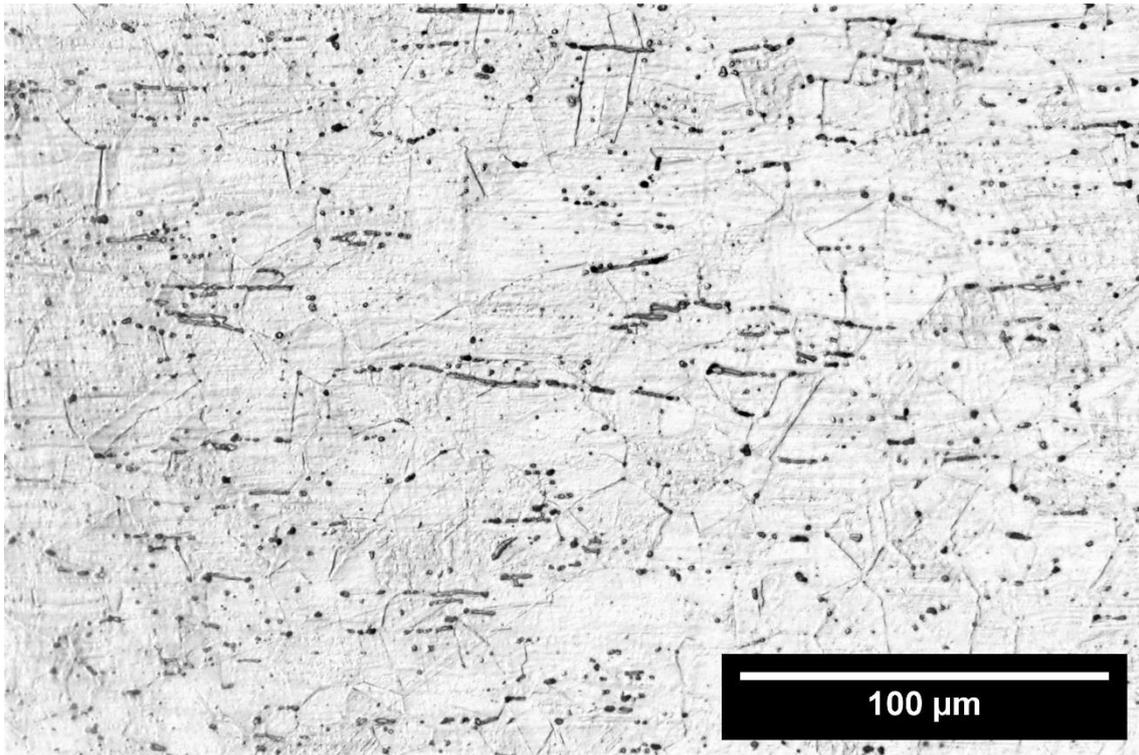
<sup>l</sup>) 1 MPa = 1 N/mm<sup>2</sup>.

**Tabla 4:** Características mecánicas temperatura ambiente para aceros austeníticos en estado recocido y resistencia a la corrosión intergranular.

Designación del acero	Densidad	Módulo de elasticidad a					Coeficiente medio de dilatación térmica entre 20°C y					Conducti- vidad térmica a 20°C	Capacida- d térmica específic a a 20°C	Resistivi- dad eléctrica a 20°C	Magnetizable	
		20°C	100°C	200°C	300°C	400°C	500°C	100°C	200°C	300°C	400°C					500°C
<b>Simbólica</b>	<b>Numérica</b>	<b>GPa</b>					<b>10<sup>-6</sup> x K<sup>-1</sup></b>					$\frac{W}{m \cdot K}$	$\frac{J}{kg \cdot K}$	$\frac{\Omega \cdot mm^2}{m}$		
X5CrNi18-10	14.301	200	194	186	179	172	165	16	16,5	17	17,5	18	15	500	0,73	no <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Pequeñas cantidades de ferrita y/o martensitas debidas a la deformación en frío aumentarán la susceptibilidad de magnetización.

**Tabla 5:** Datos de referencia de algunas propiedades físicas de los aceros austeníticos resistentes a la corrosión. Acero AISI – 304.



*Ilustración 16: Metalografía del acero inoxidable AISI-304.*

La microestructura del acero inoxidable AISI-304, presenta una estructura predominantemente austenítica, caracterizada por granos oscuros, alargados y delgados. Además, se ha identificado la presencia de un pequeño porcentaje de ferrita en la microestructura del acero AISI-304, la cual se encuentra alineada en la dirección de laminación.

La presencia de un pequeño porcentaje de ferrita es común en el acero inoxidable AISI 304, que es un acero austenítico con contenido de níquel y cromo. La formación de ferrita en la microestructura puede deberse a ciertas condiciones de soldadura o tratamientos térmicos a los que ha sido sometido el material. La alineación de la ferrita en la dirección de laminación sugiere que esta fase se ha orientado en la dirección preferencial de la laminación.

### **3.1.3 Acero AISI – 309:**

Como material de aporte en la soldadura se va a utilizar el acero inoxidable AISI – 309, que se encuentra dentro de la familia de aceros inoxidables austeníticos de cromo-níquel. Este acero proporciona una excelente resistencia a la corrosión, además de ofrecer buena resistencia a temperaturas ambiente y elevadas.

Algunas características y ventajas de utilizar el acero AISI – 309 como material de aporte en la soldadura son su composición química ya que lo hace compatible con los aceros inoxidables austeníticos como el AISI – 304 y AISI – 316, la resistencia a la oxidación a altas temperaturas y resistencia a la fluencia y el desgaste.

La composición química y las propiedades físicas características que cumplir son establecidas por la norma UNE – EN 10088-1:2015 (Aceros inoxidables. Parte 1: Relación de aceros inoxidables) teniendo en cuenta que el acero AISI – 309 corresponde a la designación simbólica X15CrNiSi20-12.

Designación del acero		% en masa <sup>a</sup>								
Simbólica	Numérica	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N	Otros
X15CrNiSi20-12	1.4828	0,20	1,50	2,00	0,045	0,015	19,0	11,0	0,10	-
			a				a	21		

<sup>a</sup> Valores máximos si no se indica otra cosa.

**Tabla 6:** Composición química (análisis de colada) de los aceros austeníticos y austenoferríticos refractarios. Acero AISI-309.

Designación del acero		Densidad	Coeficiente medio de dilatación térmica entre 20°C y					Conductividad térmica a 20°C	Capacidad térmica específica a 20°C	Resistividad eléctrica a 20°C	Magnetizable
Simbólica	Numérica	Kg/dm <sup>3</sup>	200°C	400°C	600°C	800°C	1000°C	$\frac{W}{m \cdot K}$	$\frac{J}{kg \cdot K}$	$\frac{\Omega \cdot mm^2}{m}$	
			10 <sup>-6</sup> x K <sup>-1</sup>								
X15CrNiSi20-12	14.828	7,9	16,5	17,5	18,0	18,5	19,5	15	500	0,85	no <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Ligeramente magnéticos por deformación en frío.

**Tabla 7:** Datos de referencia de algunas propiedades físicas de los aceros austeníticos y austenoferríticos refractarios. Acero AISI-309.

Seguidamente se va a emplear el diagrama de Schaeffler para determinar los posibles problemas que podrían aparecer empleando AISI-309 como material de aporte.

Para ello seguiremos las ecuaciones y el diagrama que se han mostrado en el apartado 2.4.3. Se debe tener en cuenta que en la soldadura MAG es típico utilizar una dilución

del 35%, lo que correspondería al 17.5% de cada metal base (S700MC y AISI-304) y al 65% en el metal de aporte.

$$Cr_{eq} = \%Cr + \%Mo + 1.5 \cdot (\%Si) + 0.5 \cdot (\%Nb)$$

$$Ni_{eq} = \%Ni + 30 \cdot (\%C) + 0.5 \cdot (\%Mn)$$

Para S700MC:

$$Cr_{eq-S700MC} = 0,0305 + 0,0076 + 1.5 \cdot (0,0256) + 0.5 \cdot (0,0674) = 0,1102\%$$

$$Ni_{eq-S700MC} = 0,0351 + 30 \cdot (0,0590) + 0.5 \cdot (1,8580) = 2,7340\%$$

Para AISI-304:

$$Cr_{eq-AISI-304} = 18,02 + 0 + 1.5 \cdot (0,43) + 0.5 \cdot (0) = 18,665\%$$

$$Ni_{eq-AISI-304} = 8,08 + 30 \cdot (0,024) + 0.5 \cdot (1,410) = 9,505\%$$

Para AISI-309:

$$Cr_{eq-AISI-309} = 23 + 0,75 + 1.5 \cdot (0,75) + 0.5 \cdot (0) = 24,875\%$$

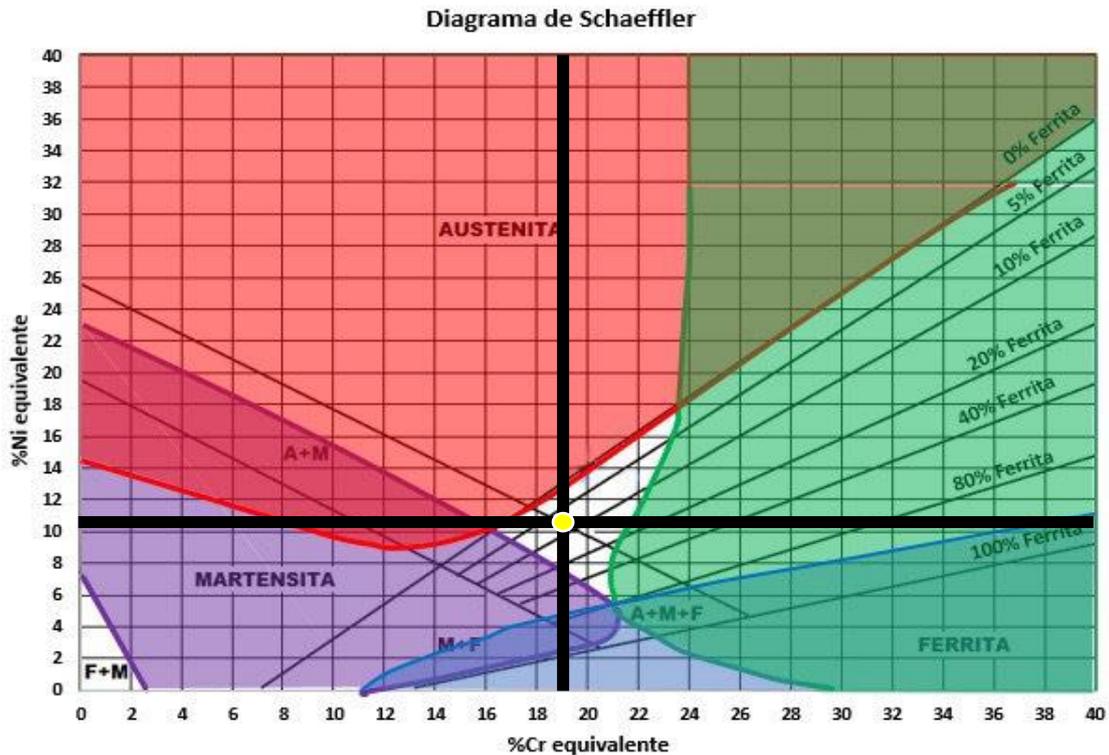
$$Ni_{eq-AISI-309} = 12 + 30 \cdot (0,020) + 0.5 \cdot (0) = 12,60\%$$

Para la soldadura con dilución del 35%:

$$Cr_{eq} = 0,175 \cdot Cr_{eq-S700MC} + 0,175 \cdot Cr_{eq-AISI-304} + 0,650 \cdot Cr_{eq-AISI-309} = 0,175 \cdot 0,1102 + 0,175 \cdot 18,665 + 0,650 \cdot 24,875 = 19,4544\%$$

$$Ni_{eq} = 0,175 \cdot Ni_{eq-S700MC} + 0,175 \cdot Ni_{eq-AISI-304} + 0,650 \cdot Ni_{eq-AISI-309} = 0,175 \cdot 2,7340 + 0,175 \cdot 9,505 + 0,650 \cdot 12,60 = 10,33\%$$

Por lo que podemos trazar dos rectas en el diagrama y hallar mediante el cruce de las rectas la zona donde se encontraría en el diagrama de Schaeffler.



*Ilustración 17: Representación de Cr<sub>eq</sub> y Ni<sub>eq</sub> para la soldadura MAG con dilución 35%.*

Como se aprecia con esa dilución, se encuentra dentro de la zona 10% de ferrita lo cual indica que el material de aporte se sitúa en una zona deseable para la soldadura y que en principio no tendría que dar problemas para realizar la unión.

Estos porcentajes se encuentran en una región que proporciona una proporción adecuada de ferrita y austenita, lo que resulta en una microestructura equilibrada y resistente. Esta combinación de ferrita y austenita es beneficiosa ya que ofrece una buena resistencia mecánica, tenacidad y resistencia a la corrosión en la zona afectada térmicamente (HAZ) de la soldadura.

La presencia de una cantidad adecuada de ferrita en la microestructura es esencial para mejorar la resistencia a la corrosión, especialmente en aplicaciones expuestas a ambientes agresivos. Al mismo tiempo, una cantidad controlada de austenita contribuye a la tenacidad y ductilidad del material, lo que es esencial para evitar la fragilidad y fractura frágil en la soldadura.

## 3.2 Ensayos mecánicos

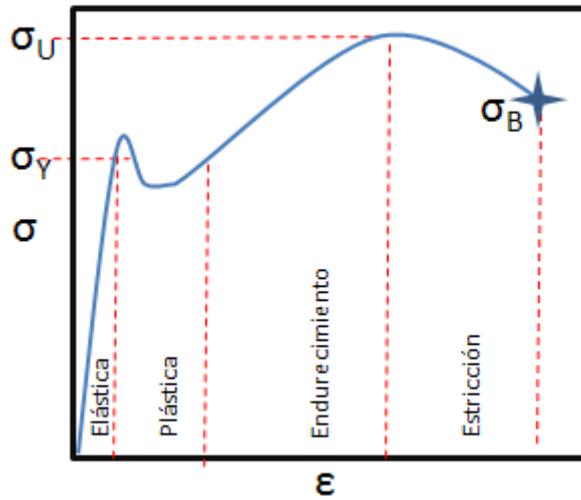
### 3.2.1 Ensayo de tracción:

En el ensayo a tracción, el material es sometido a una fuerza axial creciente hasta que se produce la fractura. Mediante este ensayo, se obtienen diferentes propiedades del material, como la resistencia a tracción, el límite elástico, la ductilidad y la tenacidad.

Durante el ensayo a tracción, se mide la carga aplicada y el alargamiento de la muestra a medida que la fuerza axial es aplicada. La relación entre la deformación y la carga aplicada es lo que se conoce como curva de tensión-deformación.

La curva tensión-deformación típica en el ensayo a tracción se compone de cuatro etapas (Ilustración 18):

1. **Elástica:** El material es deformado elásticamente y se comporta según la Ley de Hooke. La deformación es proporcional a la carga aplicada. En esta zona de la curva, al retirar la carga, el material es capaz de recuperar su forma original.
2. **Fluencia/Plástica:** Si se continúa aplicando fuerza después de haber superado el módulo elástico del material, este se deforma plásticamente, siendo esta deformación permanente sin un aumento significativo de la carga. La fluencia puede ser uniforme o no uniforme dependiendo del tipo de material que se esté sometiendo en el ensayo y las condiciones de este.
3. **Endurecimiento por deformación:** A medida que se continúa aplicando una carga, el material va endureciendo debido a la deformación plástica.
4. **Estricción:** Es la última etapa antes de la fractura, el material se estrecha y estrangula en la sección transversal.



*Ilustración 18: Curva típica tensión-deformación*

Se ha utilizado una máquina de ensayos a tracción uniaxial de Ibertest (Ilustración 19). Las muestras tienen una anchura aproximada de 20mm, por lo que tal y como establece la norma para piezas planas y de longitud menor a 3 mm, la longitud debe ser de 80mm y el ancho de 20mm. Para cada ensayo se ha calculado el grosor y la anchura exactos. Para determinar el límite elástico se ha usado un extensómetro.



*Ilustración 19: Máquina de tracción con extensómetro*

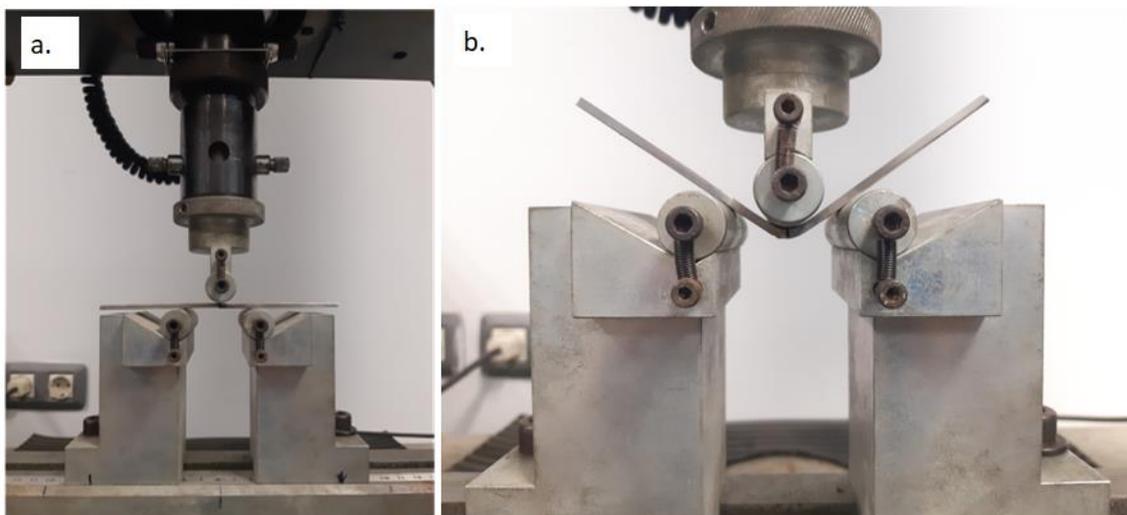
### 3.2.2 Ensayo de flexión:

El ensayo a flexión se emplea para evaluar la resistencia y ductilidad de los materiales sometidos a cargas de flexión. Existen tres tipos, el ensayo a flexión en 2 puntos, en 3 puntos y en 4 puntos, aunque para este proyecto se ha empleado el de 3 puntos. De acuerdo con la normativa sobre soldaduras de aceros este ensayo se usa para verificar que no aparecen grietas durante el ensayo.

En este ensayo se aplica una carga en forma de fuerza en el centro de la pieza y se mide su respuesta frente a la flexión. La muestra se somete a una carga que produce una curvatura en la misma. La carga se aplica en el centro de la pieza, lo que hace que la parte superior trabaje a tracción y la parte inferior a compresión.

Durante el ensayo a flexión, son diferentes los parámetros importantes que se miden, como la deflexión de la pieza y la pendiente de la curva carga-deflexión, que nos permite obtener la resistencia a flexión y el módulo elástico entre otros.

Se ha empleado la máquina para los ensayos a flexión Ibertest Electrottest M100, equipada con un mandril y dos rodillos de 20mm.



*Ilustración 20: Máquina de ensayo a flexión: a: en posición inicial; b: durante el ensayo*

### 3.2.3 Ensayo de dureza:

El ensayo de dureza es una alternativa mucho más sencilla al ensayo de tracción. La resistencia del material a ser penetrado indica su resistencia de forma tanto cualitativa como, de forma indirecta, cuantitativa. El penetrador puede ser de diferentes tipos,

como por ejemplo redondeado o puntiagudo y de un material que sea más duro que la pieza que se somete al ensayo como por ejemplo acero endurecido o diamante.

Existen diferentes tipos de ensayos de dureza dependiendo del tipo de indentador, escala de dureza y procedimiento de medición entre otros, estos son ensayo Brinell, Rockwell, Vickers y Knoop. Para el análisis en este proyecto se ha empleado el ensayo de dureza Vickers.



*Ilustración 21: Microindentador Vickers MHT2*

En el ensayo de dureza Vickers se aplica una carga controlada entre 10 y 15 segundos sobre la superficie de la pieza a ensayar utilizando un penetrador en forma de pirámide con una punta de diamante, este tiene un ángulo entre las caras de la pirámide de  $136^\circ$ . Normalmente se aplica una carga del rango de 1 kgf a 120 kgf, dependiendo de la dureza que se espere del material, aunque en el ensayo de microdureza Vickers, que es el empleado en este trabajo, se pueden emplear cargas tan bajas como 10 gramos.

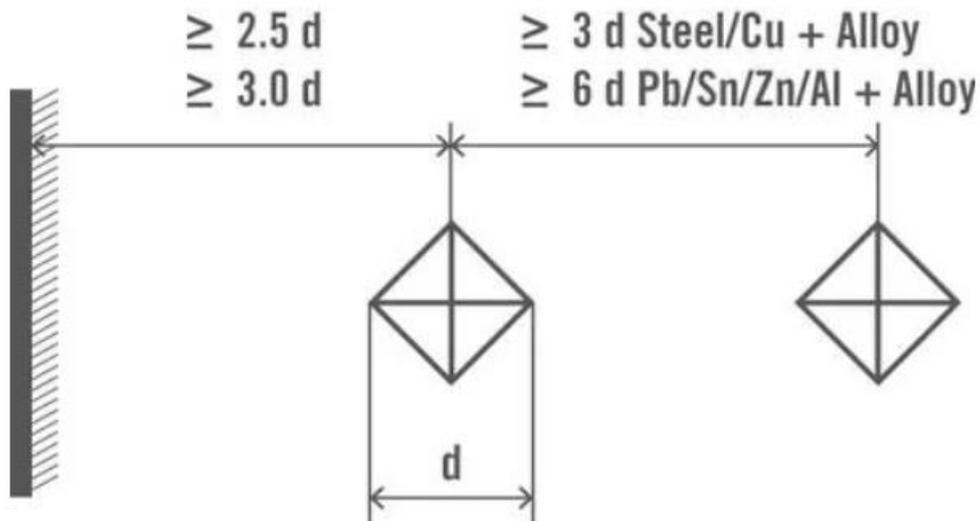
Durante el ensayo se miden la diagonal de indentación ( $d_1$ ) y la diagonal perpendicular ( $d_2$ ) para obtener la media aritmética [ $d=(d_1+d_2)/2$ ].

La dureza se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$HV = \frac{\text{carga en kgf}}{d \text{ en mm}^2}$$

*Ecuación 3: Fórmula para la obtención de dureza HV.*

Según se establece por normativa, y con la finalidad de evitar la obtención de resultados falsos de dureza debidos a la deformación de la estructura del material al haber realizado el ensayo, se debe dejar una distancia de 2.5 veces el valor medio de las dos diagonales entre el borde de la pieza y el centro de la indentación y 3 veces la media del valor medio de las dos diagonales entre dos indentaciones (Ilustración 22).



*Ilustración 22: Distancia mínima entre indentaciones*

### **3.2.4 Metalografía:**

La metalografía es una técnica que se emplea para examinar y poder estudiar la estructura interna de los diferentes materiales metálicos, proporcionando información sobre microestructura, distribución de granos y fases.

Se debe empezar la muestra sometiéndola a procesos de pulido y lijado con la finalidad de obtener una superficie plana y lisa adecuada para su análisis posterior en el microscopio.

Posteriormente la muestra se somete a un proceso de ataque químico para revelar su estructura interna, disolver selectivamente ciertas fases o resaltar características como el contorno de los granos.

Una vez se ha preparado la muestra y se ha atacado químicamente puede ser observada en el microscopio para proceder al análisis y la interpretación de resultados.

Para este proyecto, la muestra se ha embutido en metacrilato y se ha esmerilado usando papel de lija al agua y pasta de diamante de 3 y 1 micras para el pulido. Para el proceso de ataque químico, con la finalidad de poder visualizar las zonas de unión del acero bajo en carbono, se ha empleado nital-3 (una disolución de ácido nítrico en etanol al 3%), y un ataque electrolítico en ácido sulfúrico al 14% con una tensión de 2,1V para visualizar el acero inoxidable sin sobre atacar el acero S700MC. Finalmente, las muestras tratadas y atacadas químicamente se han observado en un microscopio óptico con diferentes aumentos.

### **3.2.5 Cupones de soldadura:**

Durante los diferentes ensayos se ha empleado un código para poder identificar los diferentes cupones de soldadura o probetas:

3 → Soldadura del acero S700MC con AISI-304.

9 → Aporte de AISI-309.

P → Arco pulsado, C → Cortocircuito o arco corto.

3 → Bisel a 30°, 0 → Sin bisel (separación de 2mm entre chapas).

S → Con respaldo cerámico en la parte de atrás y N → Sin respaldo cerámico.

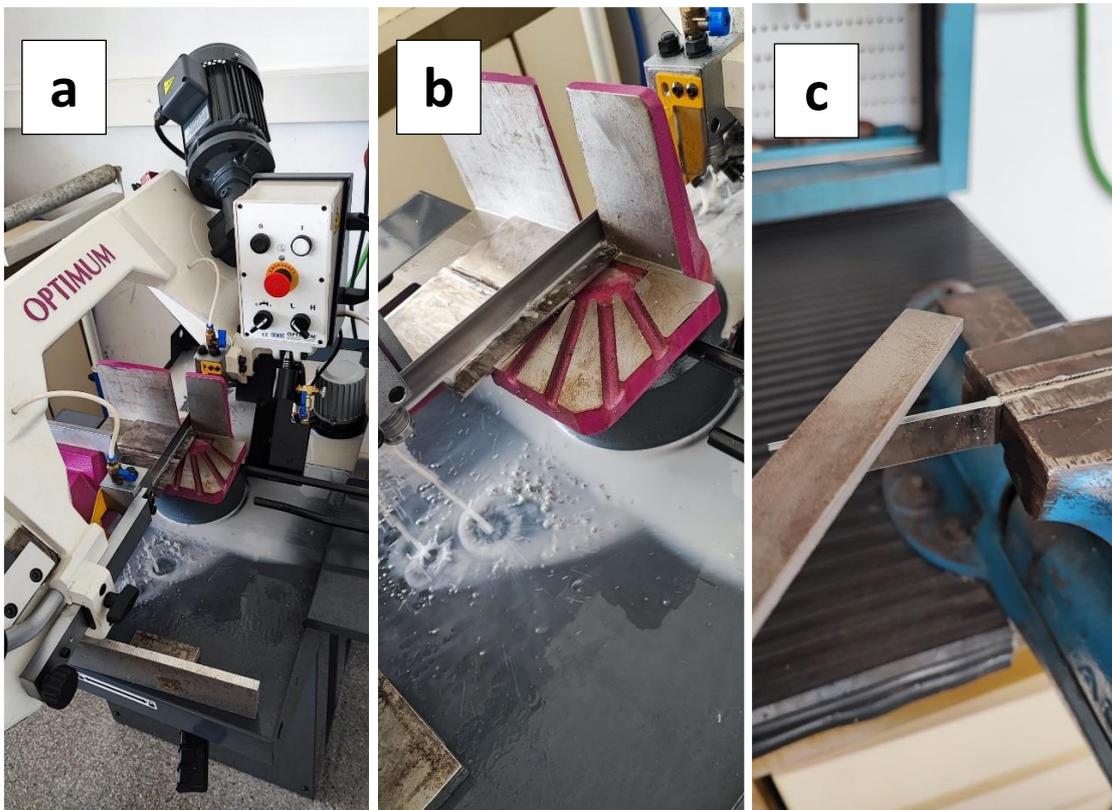


*Ilustración 23: Cupón soldado con respaldo cerámico en la parte posterior.*

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

A continuación, se va a realizar el análisis de los datos obtenidos en las soldaduras a partir de los ensayos de tracción, flexión, dureza y metalografía.

Para proceder a la realización de los diferentes ensayos, se ha tenido que cortar la chapa soldada de acero S700MC e inoxidable AISI-304 en cupones de aproximadamente 20 mm de ancho con una sierra de cinta para metal, posteriormente se ha retirado la rebaba con una lija para evitar cortes, y se ha rebajado el cordón de soldadura con una radial para los ensayos mecánicos.



*Ilustración 24: A y B: proceso de corte de la chapa en probetas; C: proceso de limado.*

#### 4.1 Ensayo de tracción

Se ha procedido a realizar el ensayo de tracción (tal y como se detalla en el apartado 3.2.1) de 8 probetas con características diferentes en la soldadura, obteniéndose la resistencia a tracción, el límite elástico y el módulo de elasticidad que se muestran en la tabla 7.

PROBETA	FUERZA MÁXIMA (kN)	RESISTENCIA A TRACCIÓN (MPa)	LÍMITE ELÁSTICO (MPa)	MÓDULO DE ELASTICIDAD (MPa)
39C0N	34,52	665,10	357,00	159290,20
39C0S	27,21	576,20	317,30	68355,90
39C3N	32,39	583,60	339,40	158012,90
39C3S	31,36	590,60	338,50	220280,30
39P0S	27,72	619,41	322,50	73547,1
39P0N	21,02	389,35	328,01	41315,30
39P3N	34,26	627,50	328,80	99993,60
39P3S	31,48	647,7	344,3	160657,7

*Tabla 8: Resultados obtenidos del ensayo a tracción de las diferentes probetas.*

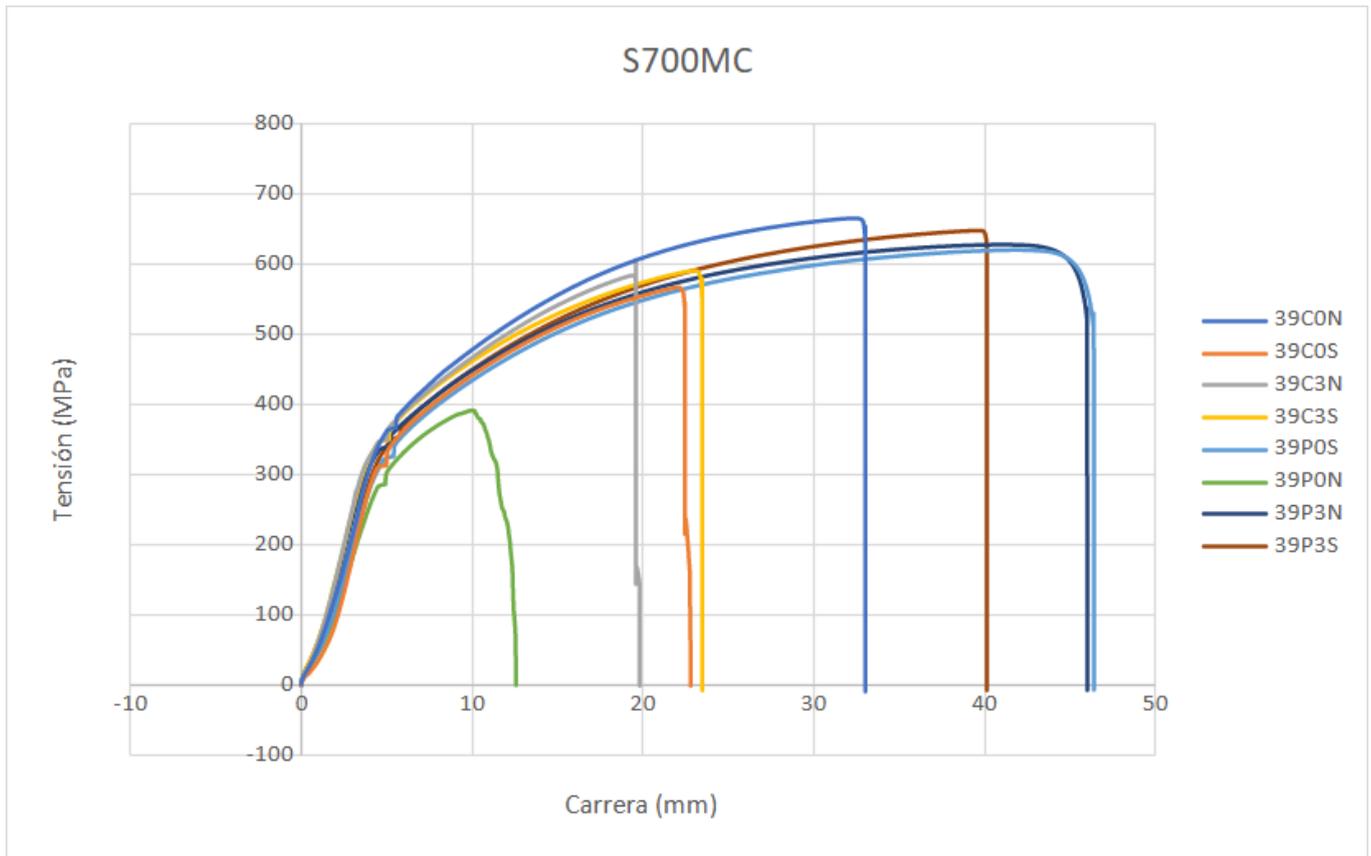
Para realizar el cálculo de la tensión se ha empleado la siguiente ecuación:

$$\sigma = \frac{F}{S}$$

*Ecuación 4: Obtención de la tensión en el ensayo de tracción.*

Siendo F la carga aplicada y S la sección de la probeta, calculada con su ancho y su espesor.

Seguidamente se muestra un gráfico de las curvas de tensión (MPa) frente a la carrera (mm) que se han obtenido en los diferentes ensayos a tracción.



**Gráfica 1:** Resultados ensayos a tracción de las diferentes probetas soldadas.

De los resultados obtenidos en este ensayo destructivo, podemos extraer las siguientes conclusiones analizando la tabla y la gráfica:

Gráficamente se puede apreciar que las curvas a tracción, así como las cargas de rotura, son bastante similares en lo referente a su resistencia máxima, exceptuando la curva 39P0N representada gráficamente de color verde (soldadura del acero S700MC con AISI-304 con aporte de AISI-309 mediante arco pulsado sin bisel y sin respaldo cerámico) debido a una falta de fusión en uno de los lados de la soldadura. El alargamiento obtenido en cada una de las muestras es, por otra parte, muy distinto, siendo el mayor el correspondiente a las probetas 39P0S y 39P3N.

La resistencia a tracción es la máxima resistencia de cada probeta antes de que se produzca la rotura, en este caso los valores están comprendidos entre 576,20 MPa y 665,10 MPa.

El límite elástico representa el punto en el que comienza deformación plástica de cada material, es decir, el momento en que la probeta ya no puede regresar a su forma original

una vez se deja de aplicar la carga, ya que esta ha dejado de deformarse elásticamente. Los valores varían entre 317,30 MPa y 357,00 MPa.

Por último, el módulo de elasticidad (E), mide la rigidez del material, en otras palabras, es la capacidad del material para resistir deformaciones elásticas. En los ensayos se han obtenido valores entre 41315,30 MPa y 220280,30 MPa.

Según el proceso de soldadura, las probetas cuya soldadura se ha realizado con arco pulsado (P) presentan valores de resistencia a tracción y límite elástico similares a las probetas soldadas a cortocircuito (C), sin embargo, el módulo de elasticidad parece ser más alto en las probetas con arco pulsado, lo que indica que proporciona más rigidez al material.

Las probetas a las cuales se les ha realizado un bisel a 30º (cuarto dígito en el código donde aparece un 3), presentan valores de resistencia a tracción más altos en comparación a las probetas sin bisel (cuarto dígito en el código donde aparece un 0), esto nos indica que el bisel puede influir en la distribución de la carga y la resistencia de la unión soldada, gracias a que se haya producido una mejor unión del cordón de soldadura entre las piezas.

Las probetas con respaldo cerámico (S) tal y como se puede apreciar en la gráfica, han sido las que más se han alargado antes de producirse la rotura, así mismo, también presentan valores de resistencia a tracción altos, lo que sugiere que realizar soldaduras sin respaldo empeora la resistencia de la soldadura.

A continuación, se muestran dos imágenes de las roturas en las diferentes probetas.



*Ilustración 25: Roturas de las probetas en el ensayo a tracción.*

Como se puede apreciar, las probetas han roto en diferentes puntos. Algunas de ellas por el cordón de soldadura y otras alejadas de este cordón.

En la mayor parte de casos la rotura se ha producido en la HAZ, donde el calor aportado durante la soldadura puede provocar cambios microestructurales importantes. Por otro lado, resulta curioso que en unos casos la rotura se ha producido en la HAZ del acero S700MC y en otros en la HAZ del AISI-304, lo que indica que la resistencia máxima de ambas zonas afectadas por el calor debe ser muy similar.

Para el caso de las probetas 39P3N y 39P3S, ambas presentan una curva de tracción muy similar a la que tendría el acero inoxidable. Además, que se haya producido la rotura en el material base y no en la soldadura, muestra que la unión soldada presenta una resistencia suficiente para soportar la fuerza aplicada durante la prueba, indicando que

la calidad de la soldadura es adecuada y ha sido realizada con éxito, además la soldadura presenta una resistencia superior a la del material base.

#### 4.2 Ensayo de flexión:

Siguiendo con los ensayos destructivos, se ha realizado un ensayo a flexión de las diferentes probetas.

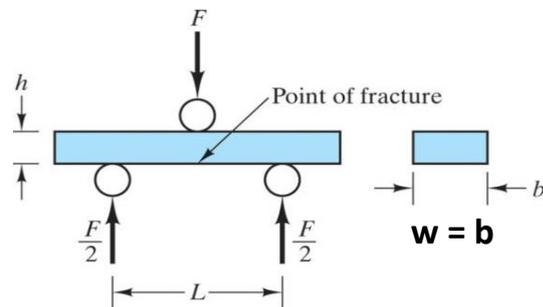
El ensayo a flexión nos proporciona información valiosa sobre la resistencia y el comportamiento mecánico de las uniones soldadas en condiciones de carga y desplazamiento o deformación.

La flexión es un ensayo mecánico donde las probetas se someten a fuerzas que generan curvaturas o deformaciones, permitiendo así evaluar la resistencia y capacidad de deformación de los materiales y las uniones soldadas para poder comprender su comportamiento bajo diferentes condiciones de carga.

Para calcular la tensión en el ensayo a flexión en tres puntos, usamos la siguiente ecuación.

$$\sigma = \frac{3 \cdot F \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2}$$

*Ecuación 5: Obtención de la tensión en el ensayo de flexión de 3 puntos.*



$$\text{Modulus of rupture} = \text{MOR} = \frac{3FL}{2bh^2}$$

*Ilustración 26: Esquema de ensayo a flexión en 3 puntos.*

Donde L=80 mm, b= ancho de cada probeta y h=3mm.

A continuación, en la tabla 8 se muestran los valores de fuerza máxima (N) que han obtenido las probetas, y nos proporcionan información sobre la calidad de la soldadura y la integridad de la unión. Un mayor valor de fuerza máxima indica que la soldadura es más fuerte y fiable.

<b>PROBETA</b>	<b>FUERZA MÁXIMA (N)</b>
<b>39C0N</b>	1418,9
<b>39C0S</b>	1589,4
<b>39C3N</b>	1530,4
<b>39C3S</b>	1509,2
<b>39P0S</b>	1615,2
<b>39P0N</b>	1592,9
<b>39P3N</b>	1299,7
<b>39P3S</b>	1160,4

*Tabla 9: Fuerza máxima obtenida en las diferentes probetas en el ensayo de flexión.*

La soldadura en la probeta 39C3S presentaba un pequeño defecto, es por lo que su resultado puede ser no fiable.

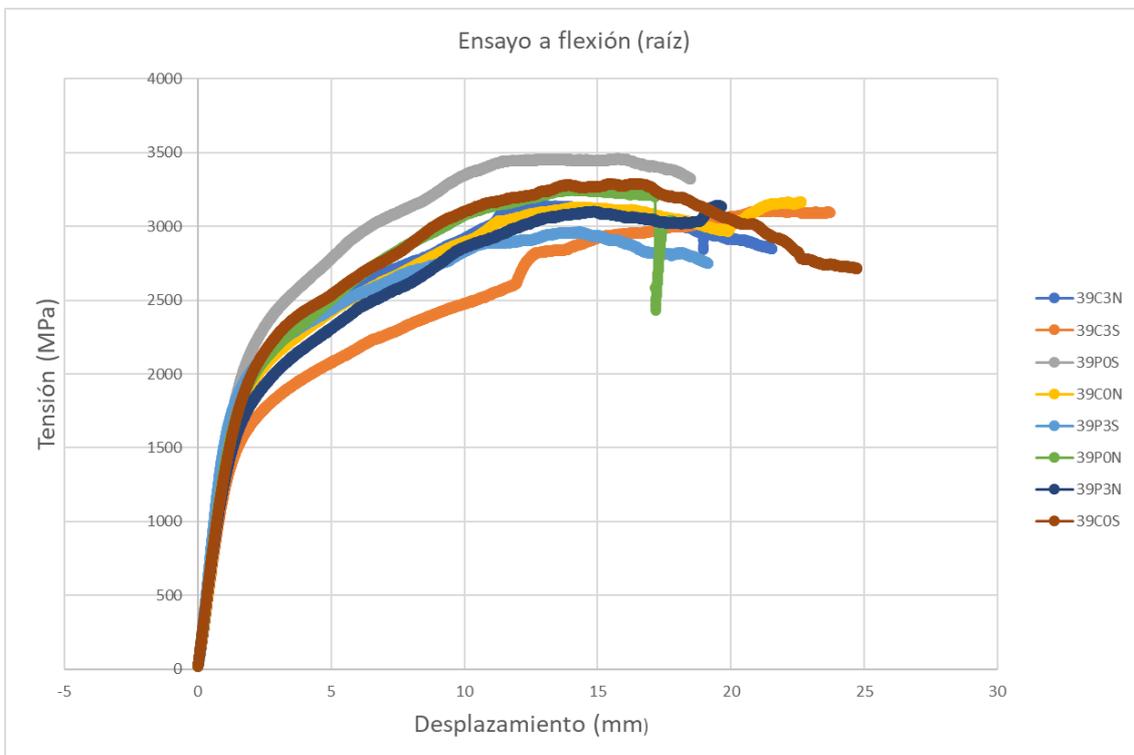
Aunque generalmente, todas las probetas presentan resultados bastante similares, se aprecia que la probeta que presenta una mejor resistencia a la flexión es la 39P0S y la que presenta una menor resistencia a la 39C3S.

Hay que comentar que se tuvo un problema durante los ensayos. Este es debido al desplazamiento de las probetas durante el ensayo, ya que casi todas se desplazaron hacia la zona del AISI-304 al alcanzar un determinado punto de carga debido a que este material es mucho más dúctil que al acero S700MC y la capacidad de deformación es asimétrica a ambos lados del punto central de apoyo.

A continuación, se adjunta una imagen de las probetas ensayadas donde se aprecia el al desplazamiento del cordón de soldadura respecto a la zona de plegado, así como un gráfico en el que se muestran los resultados de este ensayo. En la imagen se marca con un punto blanco donde queda el cordón de soldadura después de realizar en ensayo.



*Ilustración 27: Probetas después de realizar el ensayo a flexión.*



*Gráfica 2: Resultados de los ensayos de flexión.*

### 4.3 Ensayo de dureza:

Tal y como se ha mencionado anteriormente en el punto 2.4.1. "Zona Afectada Térmicamente (HAZ)", la dureza en esta zona de la soldadura es un aspecto importante que puede afectar de forma significativa a la resistencia y a la calidad en la unión entre el acero S700MC y el AISI-304.

Para comprender y estimar la dureza en esta zona, se deben considerar los siguientes factores:

1. **Composición del acero:** Los aceros inoxidable austeníticos, como es el caso del AISI-304, no pueden endurecer mediante el proceso de temple. Esto es debido a su estructura cristalina austenítica, por lo que no se espera que se produzca un endurecimiento elevado.
2. **Temperatura máxima alcanzada:** Si durante el proceso de soldadura se alcanza una temperatura cercana a los 727°C, que es la temperatura de inicio de la transformación a la fase austenítica en los aceros al carbono, tal y como se puede observar en la Ilustración 1, puede haber endurecimiento, aunque es más probable que suceda a partir de los 920°C, que es cuando el S700MC entra en la zona de austenización completa.
3. **Velocidad de enfriamiento:** La velocidad de enfriamiento en la Zona Afectada Térmicamente (HAZ) debe ser lo suficientemente elevada para que se pueda producir una transformación de la austenita a martensita o bainita, dando lugar a un incremento en la dureza en lugar de que se produzca la formación de ferrita, que es más blanda que la austenita.

Se debe tener también en cuenta que el calentamiento del material durante el proceso de soldadura puede provocar el crecimiento del tamaño de grano, y esto conlleva a que el material se vuelva más blando pudiendo afectar negativamente en las propiedades del acero S700MC que se caracteriza por tener una alta resistencia y tenacidad debido a su pequeño tamaño de grano, por lo que es importante tener especial cuidado en la formación de grano más grande en la HAZ durante la soldadura.

Aunque no se vaya a producir un gran incremento de dureza debido al poco porcentaje de carbono del que está formado nuestro acero, podemos estimar la dureza máxima alcanzable mediante la ecuación de Yurioka.

Para estimar la dureza con este método debemos aplicar la siguiente ecuación:

$$H_V = \frac{H_M + H_B}{2} - \frac{H_M - H_B}{2.2} \cdot \arctan(x)$$

**Ecuación 6:** Ecuación de Yurioka.

Donde:

$$H_M = 884 \cdot C(1 - 0.3C^2) + 294$$

$$CE_I = C + \frac{Si}{24} + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu}{15}$$

$$H_B = 145 + 130 \cdot \tanh(2.65CE_{II} - 0.69)$$

$$CE_{II} = C + \frac{Si}{24} + \frac{Mn}{5} + \frac{Cu}{10}$$

$$t_b = \exp(6.2CE_{III} + 0.74)$$

$$CE_{III} = C + \frac{Mn}{3.6} + \frac{Cu}{20}$$

Obtenemos el siguiente valor aproximado de dureza para nuestro acero S700MC y AISI-304 teniendo en cuenta que la composición de nuestra chapa de S700MC es C=0.05950%, Mn=1.85800%, Si=0.02560% y Cu=0.02000 (datos extraídos de la ficha del fabricante):

REF. CUPÓN ENSAYADO	HV (S700MC)
39C0N	203,41
39C0S	205,79
39C3N	209,47
39C3S	201,84
39P0S	210,14
39P0N	207,50
39P3N	199,86
39P3S	202,60

**Tabla 10:** Estimación de resultados de dureza para S700MC según ecuación de Yurioka.

Así mismo también se puede determinar hasta qué distancia de la soldadura (de la línea de fusión que separa el cordón de la HAZ) puede llegar a haber endurecimiento, empleamos la siguiente fórmula:

$$\frac{1}{T_p - T_o} = \frac{4,13 \cdot \rho \cdot C \cdot t \cdot Y}{H_{net}} + \frac{1}{T_m - T_o}$$

**Ecuación 7:** Máxima temperatura “ $T_p$ ” en un punto localizado a “ $Y$ ” mm de la línea de fusión.

Donde:

$T_p$  → Temperatura en la HAZ en el punto  $C$  → Calor específico del material J/g°C  
 $Y$  desde la línea de fusión.

$T_o$  → Temperatura inicial en la chapa en °C.  $Y$  → Distancia de la línea de fusión al punto en mm.

$T_m$  → Temperatura de fusión del material en °C.  $H_{net}$  → Energía neta absorbida.

$\rho$  → Densidad metal base g/mm<sup>3</sup>  $t$  → Espesor de la chapa en mm.

En nuestro caso:

$T_o$  → 25°C

$\rho$  → 0,00786 g/mm<sup>3</sup>

$C$  → 0,449 J/g°C

$t$  → 3 mm

$T_m$  → 1510 °C

El calor neto aportado se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$H_{neta} = f \cdot \frac{I \cdot U}{v}$$

**Ecuación 8:** Calor neto aportado.

Donde:

$f$  → rendimiento. Para soldadura MAG es 8.

$I$  → Intensidad

$U$  → Voltaje

$v \rightarrow$  Velocidad de soldeo en J/mm

Los valores de Intensidad, Voltaje, velocidad de soldeo y el rendimiento se muestran en la siguiente tabla.

REF. CUPÓN ENSAYADO	INTENSIDAD (A)	VOLTAJE (V)	VELOCIDAD DE SOLDEO (cm/min)	RENDIMIENTO	APORTE TÉRMICO NETO (KJ/cm)
39C0N	51	17.4	7.22	8	5.7
39C0S	56	17.6	9.09	8	5.2
39C3N	64	17.3	11.2	8	4.6
39C3S	59	17.1	7.89	8	6.1
39P0S	69	18	12.52	8	4.7
39P0N	61	18.2	10.84	8	4.9
39P3N	64	18.3	8.33	8	6.7
39P3S	63	18.1	9.28	8	5.9

*Tabla 11: Parámetros de soldeo de los diferentes cupones de ensayo y aporte térmico neto.*

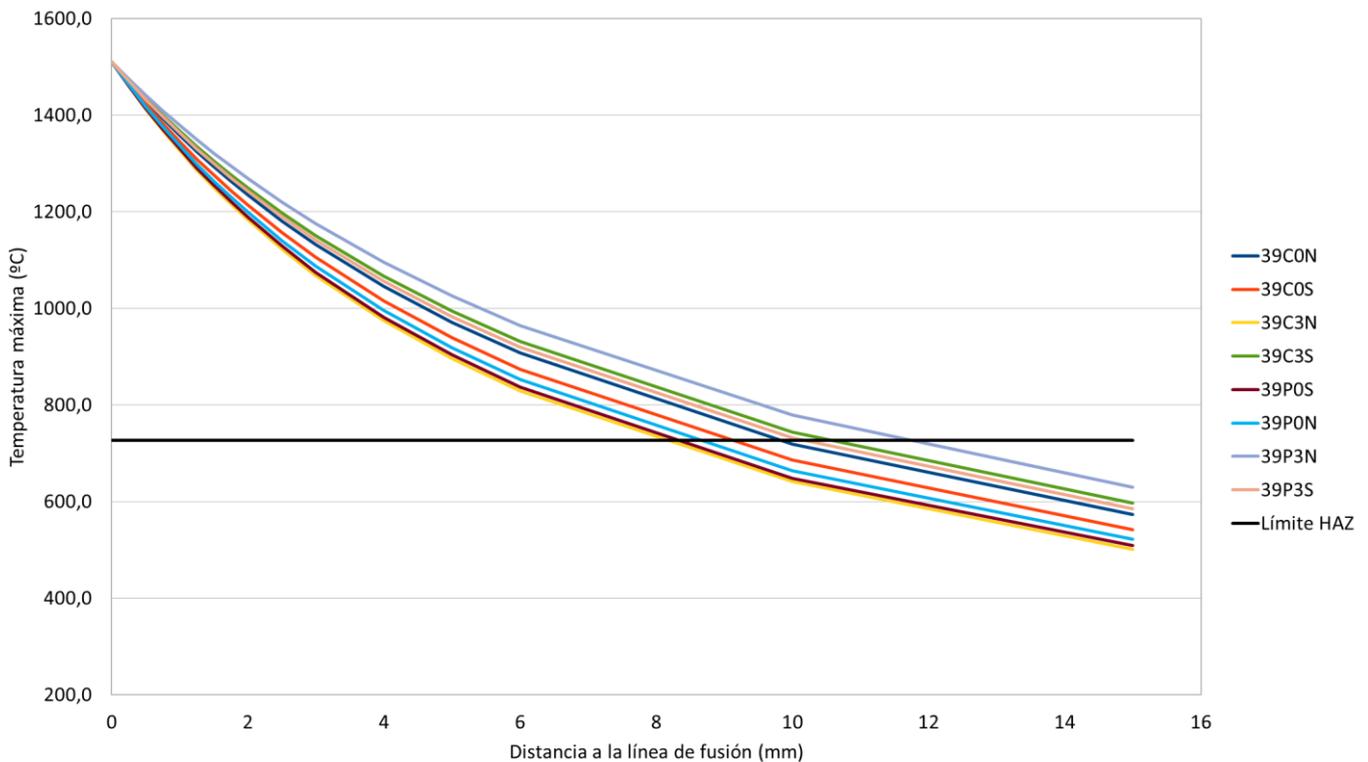
Mediante el uso de la Ecuación 7 y sustituyendo los datos mencionados anteriormente, así como asignando el valor de 727°C a  $T_p$  que es la temperatura por encima de la cual se puede esperar cierto endurecimiento (principio de la zona austenítica), podemos obtener el valor de la distancia de la línea de fusión al punto donde se encontraría el límite de la zona de la HAZ que estaría sometida a un posible endurecimiento.

Distancia de la línea de fusión al límite donde se encontraría la zona de la HAZ sometida a posible endurecimiento en los diferentes cupones soldados:

- 39C0N: 9,79 mm.
- 39C0S: 8,93 mm.
- 39C3N: 7,90 mm.
- 39C3S: 10,47 mm.
- 39P0S: 8,07 mm.
- 39P0N: 8,41 mm.
- 39P3N: 11,50 mm.
- 39P3S: 10,13 mm.

Con esta misma ecuación, es posible calcular las temperaturas máximas en la Zona Afectada Térmicamente (HAZ), con diferentes valores de  $Y$ .

Los resultados obtenidos de este cálculo se muestran en la siguiente gráfica:



**Gráfica 3:** Distribución de las temperaturas máximas en la HAZ para el acero S700MC.

A continuación, se realiza un análisis de la gráfica de la distribución de las temperaturas máximas en la HAZ en el acero S700MC.

Las mediciones de dureza en la HAZ muestran una correlación con la pendiente de la curva de temperatura máxima, esto sugiere que la pendiente de la curva de temperaturas está relacionada con las propiedades mecánicas del material, especialmente con la dureza de las muestras.

Particularmente, se puede identificar que la probeta 39C3N muestra una pendiente más pronunciada en comparación con la muestra 39P3N. Esta diferencia en la pendiente de las curvas sugiere que la muestra 39C3N experimenta un calentamiento y enfriamiento más rápido durante el proceso de soldadura.

Seguidamente, se puede realizar una estimación de la ubicación (distancia a la línea de la fusión) donde se podría producir la austenización completa en la zona afectada térmicamente. Mediante el uso del diagrama Fe-C (Ilustración 1) podemos determinar que la temperatura en la que se encuentra esta región según con el porcentaje de carbono es aproximadamente a los 920°C, por lo que tal y como se ha realizado

anteriormente con el uso de la Ecuación 7 y teniendo en cuenta que  $T_p=920^{\circ}\text{C}$  hallamos los valores de  $Y$ .

Distancia de la línea de fusión a la posible zona en la HAZ donde se podría producir una austenización completa:

- 39CON: 5,79 mm.
- 39C0S: 5,28 mm.
- 39C3N: 4,67 mm.
- 39C3S: 6,19 mm.
- 39POS: 4,77 mm.
- 39PON: 4,97 mm.
- 39P3N: 6,80 mm.
- 39P3S: 5,98 mm.

Podemos estimar la velocidad del acero de las diferentes probetas usando el parámetro  $t_{8/5}$ , que es el tiempo que tarda el material en enfriarse de  $800^{\circ}\text{C}$  a  $500^{\circ}\text{C}$ , y este se supone que es el mismo independientemente de la distancia a la línea de fusión. Se debe tener en cuenta que la temperatura máxima es diferente para cada punto, por lo que las curvas de enfriamiento también lo serán.

Para hallar  $t_{8/5}$  usamos la siguiente expresión:

$$t_{8/5} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot K \cdot \rho \cdot C} \cdot H_{net}^2 \cdot \frac{1}{e^2} \cdot \left[ \left( \frac{1}{500 - T_0} \right)^2 - \left( \frac{1}{800 - T_0} \right)^2 \right] \cdot F_2$$

**Ecuación 9:** Tiempo que tarda el material en enfriarse de  $800^{\circ}\text{C}$  a  $500^{\circ}\text{C}$ .

Donde:

$F_2$  → Factor de disipación bidireccional.       $H_{net}$  → Energía neta absorbida.

$K$  → Conductividad térmica del acero en W/mmK.       $e$  → Espesor de la chapa en mm.

$\rho$  → Densidad del material en  $\text{kg}/\text{mm}^3$ .       $T_0$  → Temperatura inicial de la chapa en  $^{\circ}\text{C}$ .

$C$  → Calor específico del material en  $\text{J}/\text{kg}^{\circ}\text{C}$ .

En nuestro caso:

$$F_2 \rightarrow 1 \text{ (soldadura a tope)}$$

$$H_{net} \rightarrow \text{Depende de la probeta.}$$

$$K \rightarrow 0,0795 \text{ W/mmK.}$$

$$e \rightarrow 3 \text{ mm.}$$

$$\rho \rightarrow 7860 \cdot 10^{-9} \text{ kg/mm}^3.$$

$$T_0 \rightarrow 25 \text{ }^\circ\text{C.}$$

$$C \rightarrow 449 \text{ J/kg}^\circ\text{C.}$$

REF. CUPÓN ENSAYADO	APORTE TÉRMICO NETO (J/mm)	T <sub>8/5</sub> (s)
<b>39C0N</b>	570	56,66
<b>39C0S</b>	520	47,16
<b>39C3N</b>	460	36,90
<b>39C3S</b>	610	64,90
<b>39P0S</b>	470	35,53
<b>39P0N</b>	490	41,88
<b>39P3N</b>	670	78,29
<b>39P3S</b>	590	60,71

**Tabla 12:** Resultados del tiempo que tarda el material en enfriarse desde 800°C a 500°C.

Así mismo también podemos hallar la evolución de la temperatura con el tiempo mediante el uso de la siguiente ecuación suponiendo que 727°C es válido para esta ecuación:

$$\frac{dT}{dt} = k \cdot (T - T_0) \rightarrow T = T_0 + (T_i - T_0) \cdot e^{-kt}$$

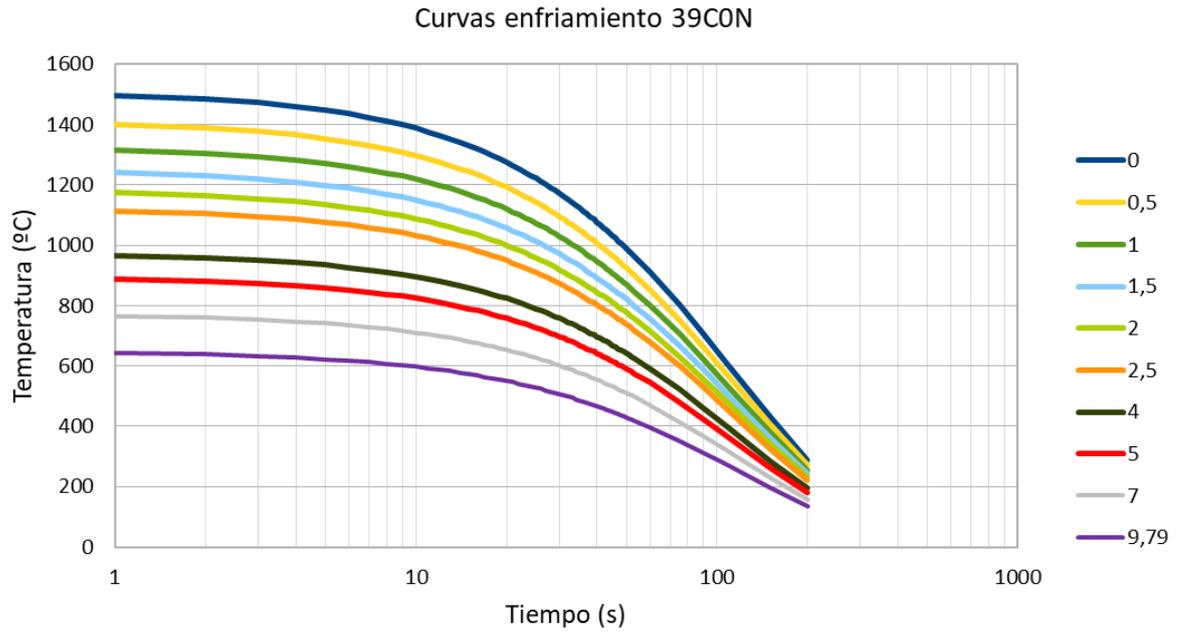
**Ecuación 10:** Ley de enfriamiento de Newton.

Donde T=727°C, T<sub>0</sub>=25°C (temperatura ambiente) y T<sub>i</sub>=T<sub>p</sub> para cada probeta.

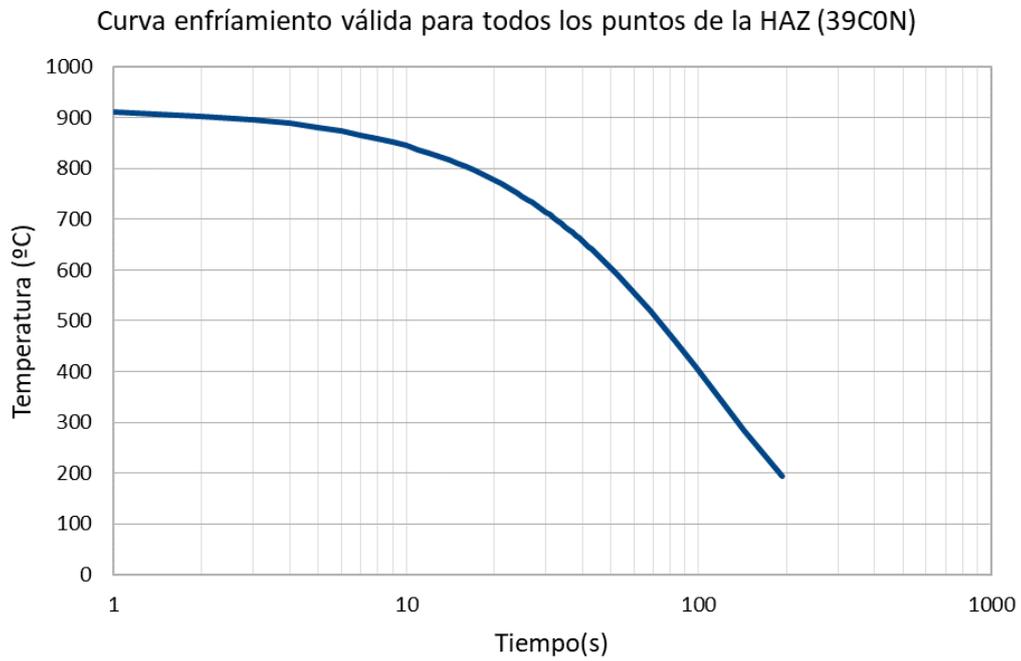
REF. CUPÓN ENSAYADO	K (s <sup>-1</sup> )
39C0N	0,0690
39C0S	0,0310
39C3N	0,1592
39C3S	0,0076
39P0S	0,1652
39P0N	0,0117
39P3N	0,0438
39P3S	0,0805

*Ecuación 11: Evolución de la temperatura con el tiempo.*

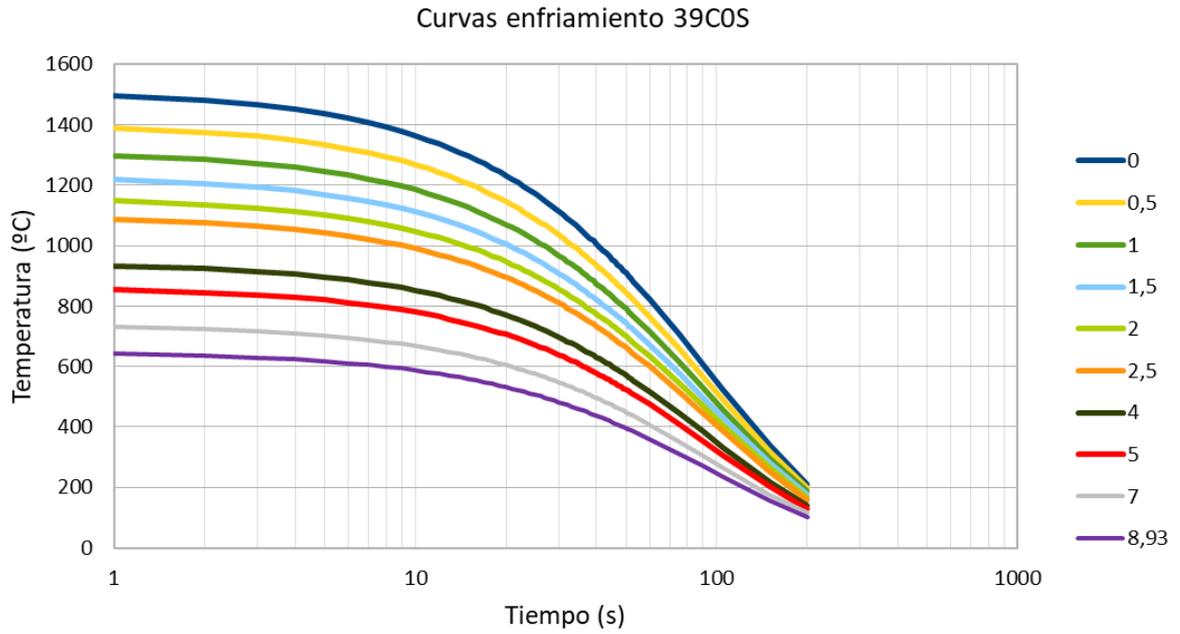
A continuación, se muestran las gráficas con las curvas de enfriamiento de cada probeta, así como la curva de cada probeta desde los 920°C que es válida para todos los puntos de la HAZ ya que es donde se produce la temperatura de austenización y finalmente una gráfica con la comparativa de las curvas de enfriamiento.



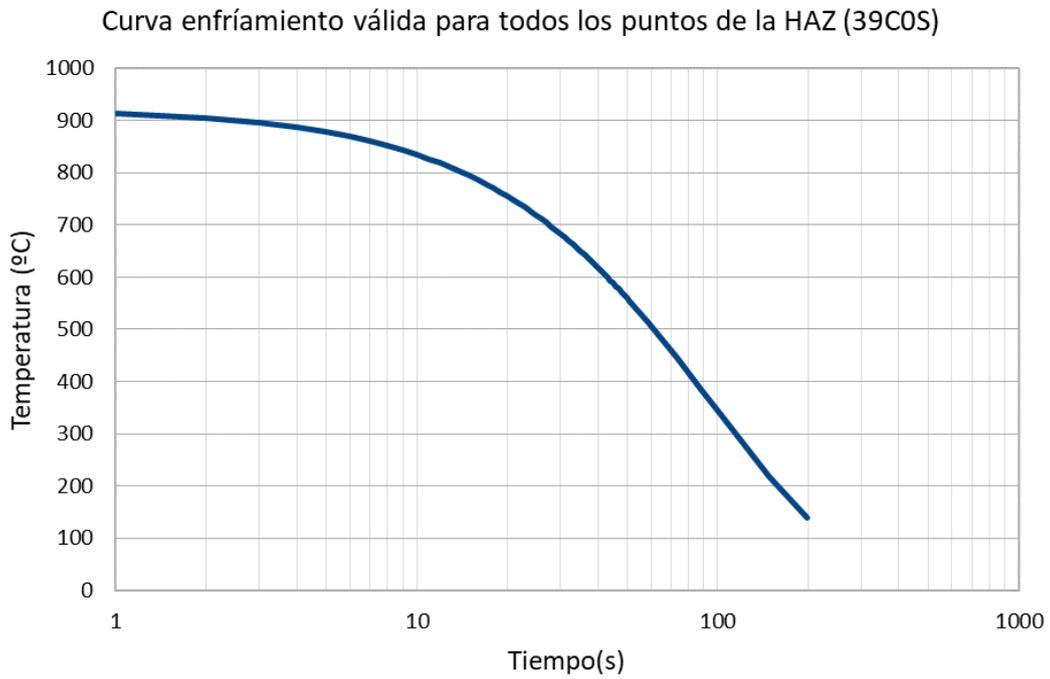
**Gráfica 4:** Curvas de enfriamiento 39C0N.



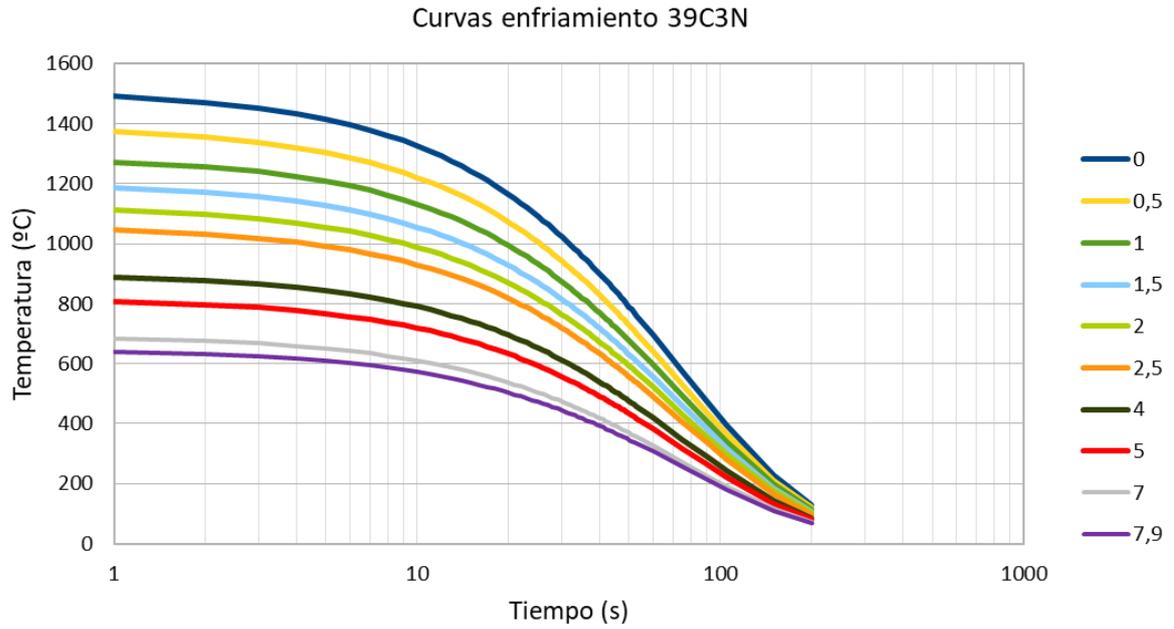
**Gráfica 5:** Curvas de enfriamiento válida para todos los puntos de la HAZ 39C0N.



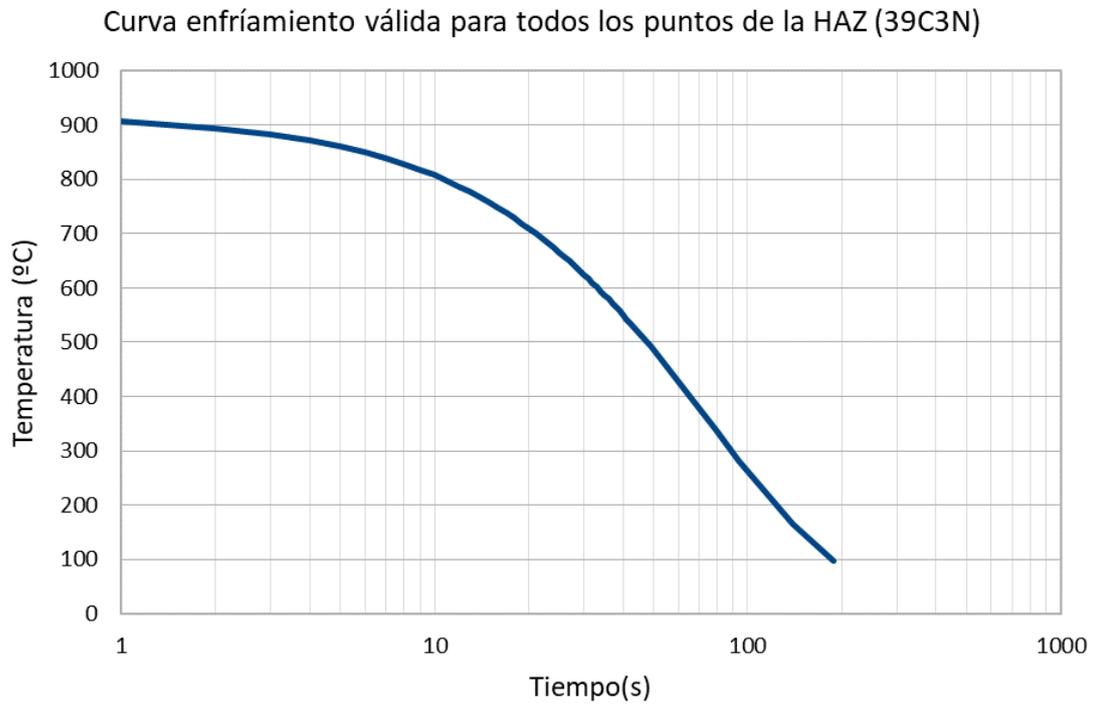
**Gráfica 6:** Curvas de enfriamiento 39C0S.



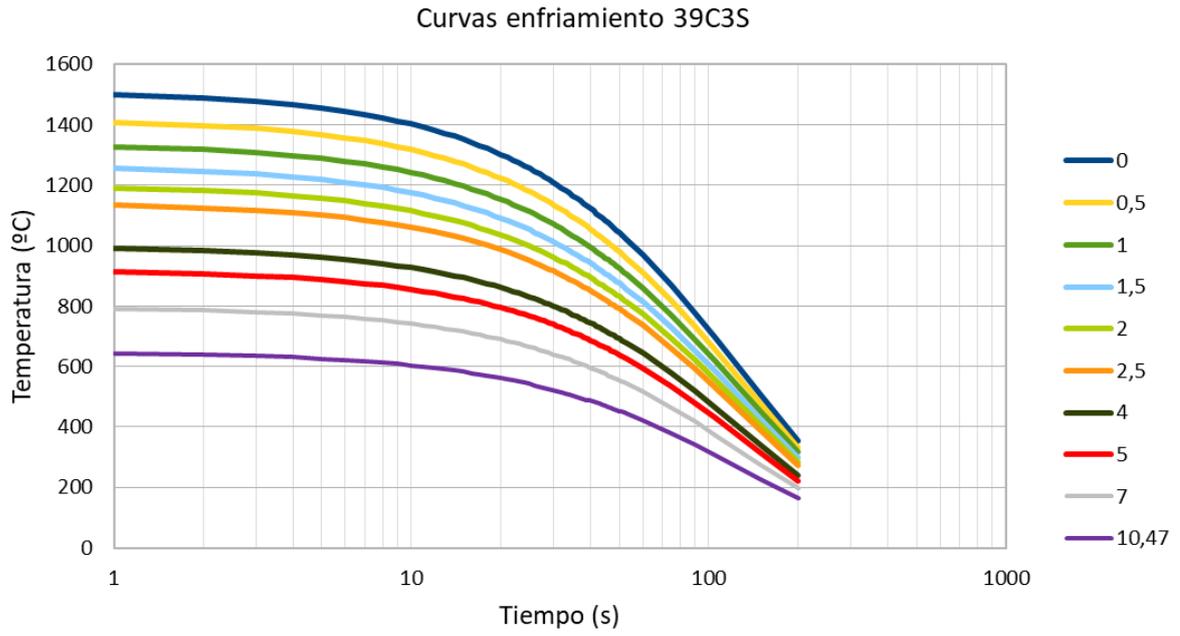
**Gráfica 7:** Curvas de enfriamiento válida para todos los puntos de la HAZ 39C0S.



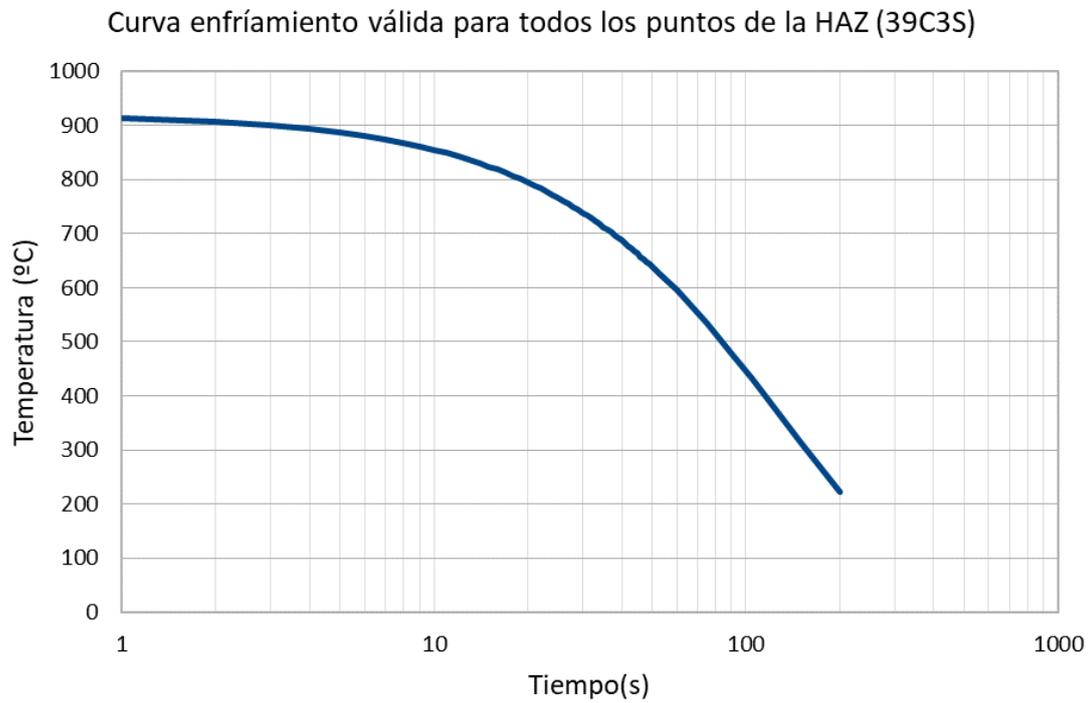
**Gráfica 8:** Curvas de enfriamiento 39C3N.



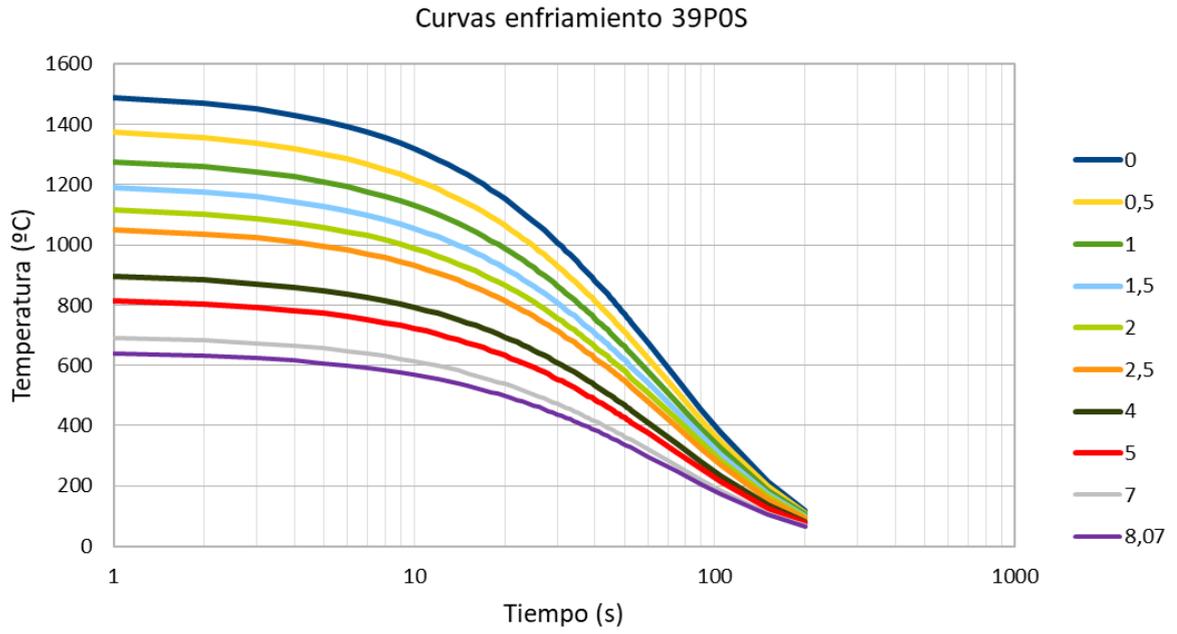
**Gráfica 9:** Curvas de enfriamiento válida para todos los puntos de la HAZ 39C3N.



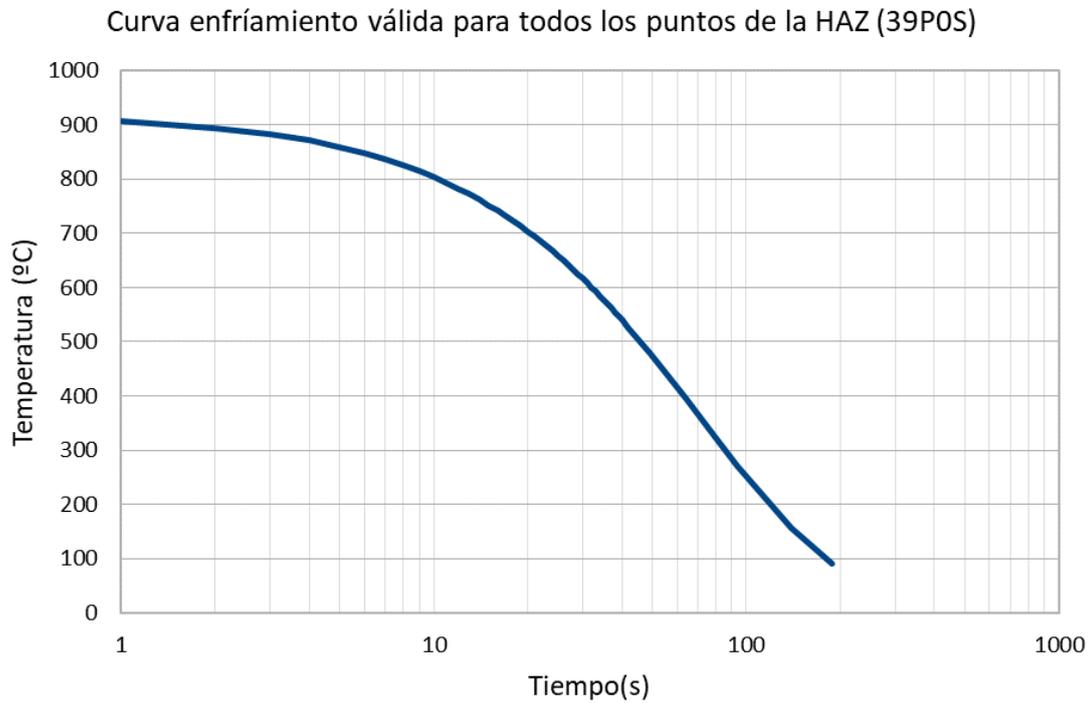
**Gráfica 10:** Curvas de enfriamiento 39C3S.



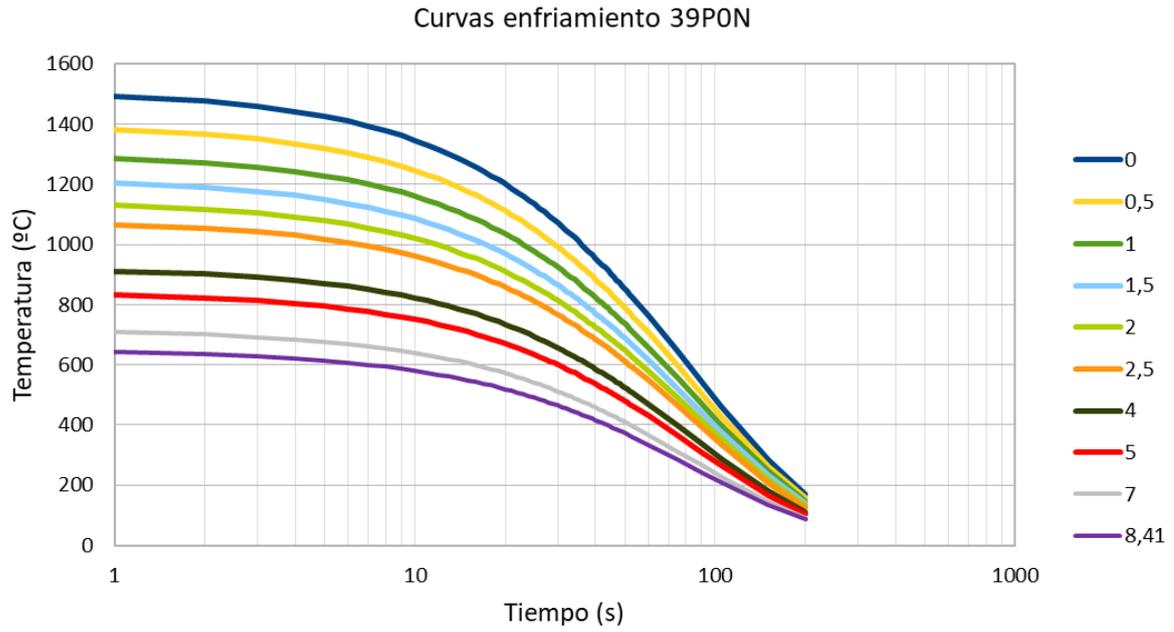
**Gráfica 11:** Curvas de enfriamiento válida para todos los puntos de la HAZ 39C3S.



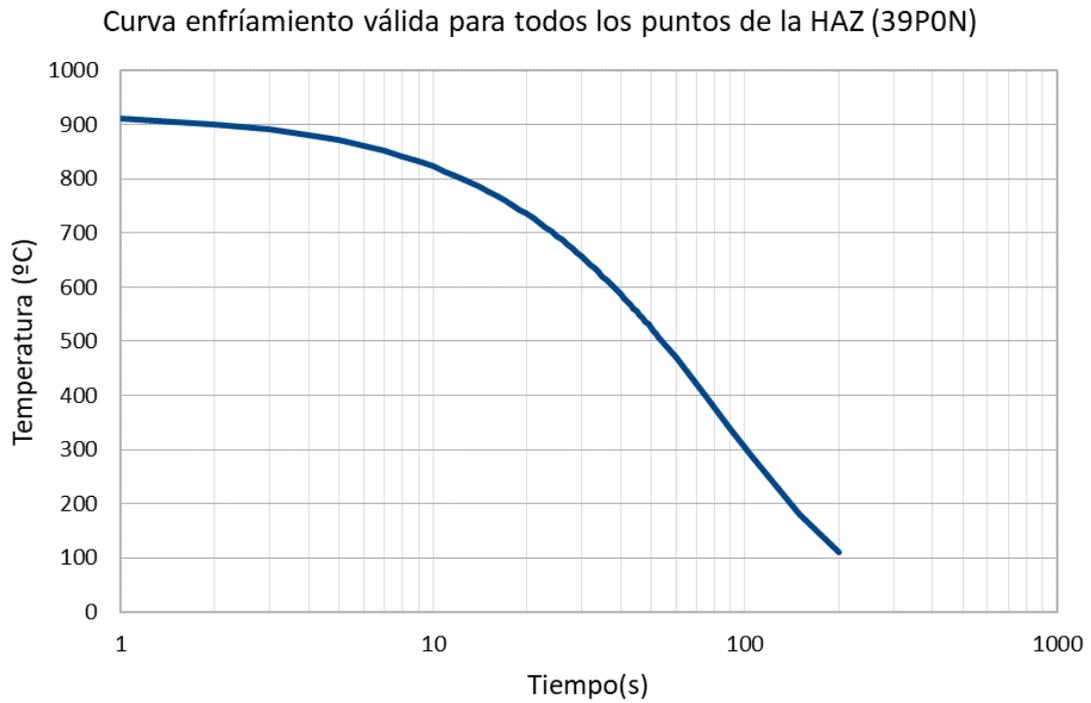
*Gráfica 12: Curvas de enfriamiento 39P0S.*



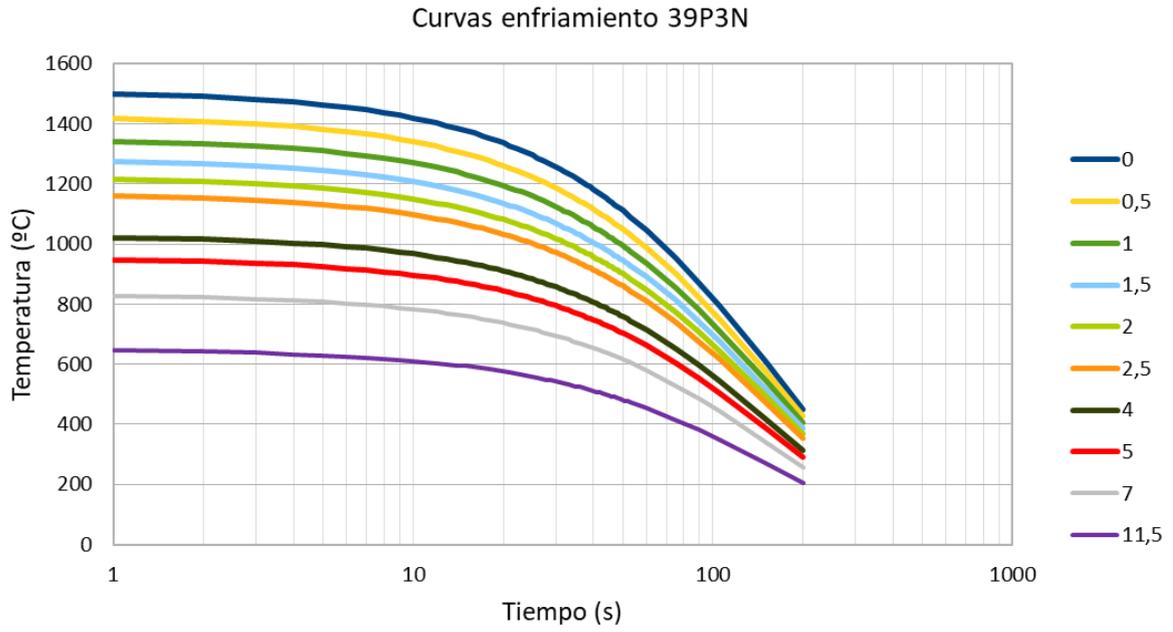
*Gráfica 13: Curvas de enfriamiento válida para todos los puntos de la HAZ 39P0S.*



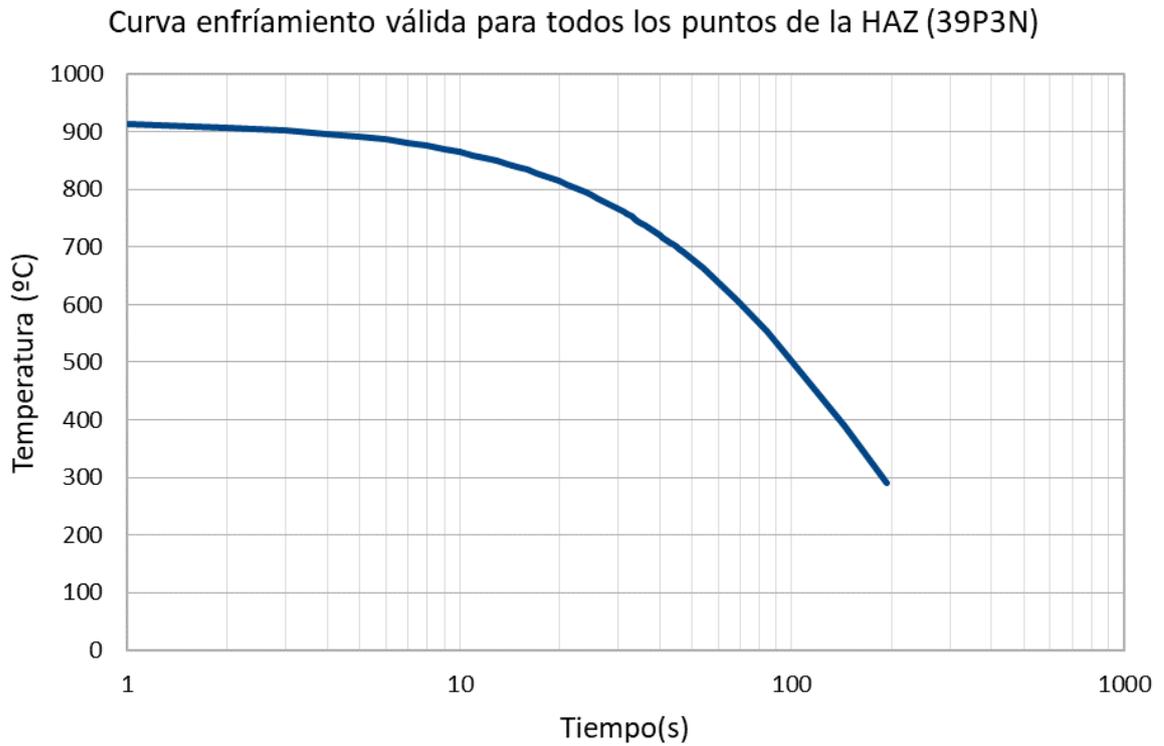
**Gráfica 14:** Curvas de enfriamiento 39P0N.



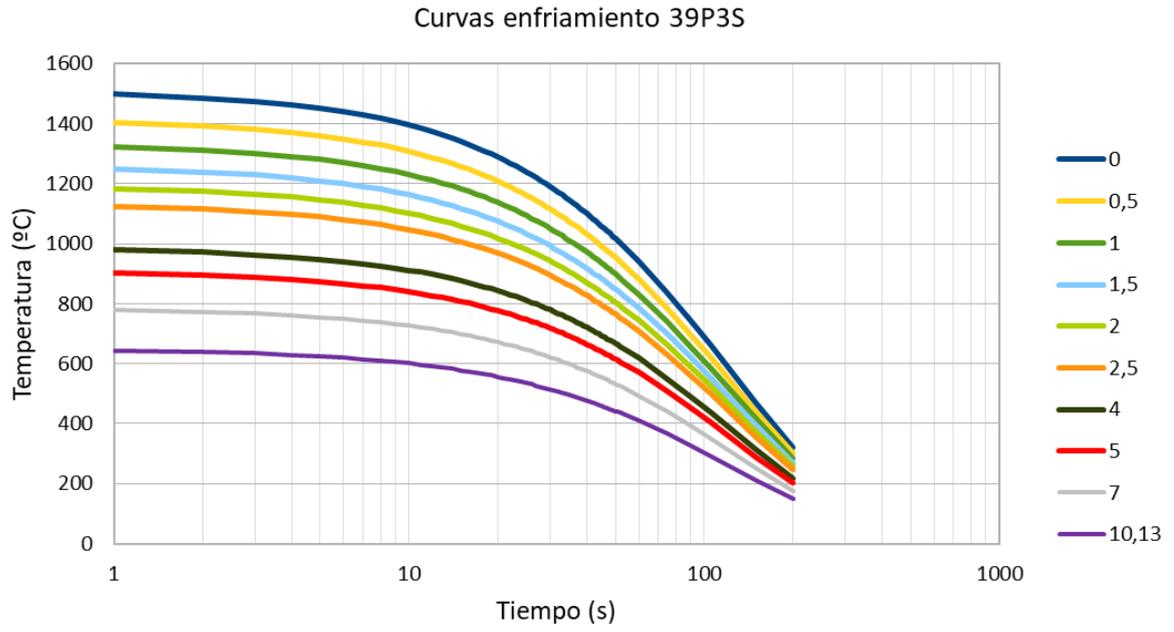
**Gráfica 15:** Curvas de enfriamiento válida para todos los puntos de la HAZ 39P0N.



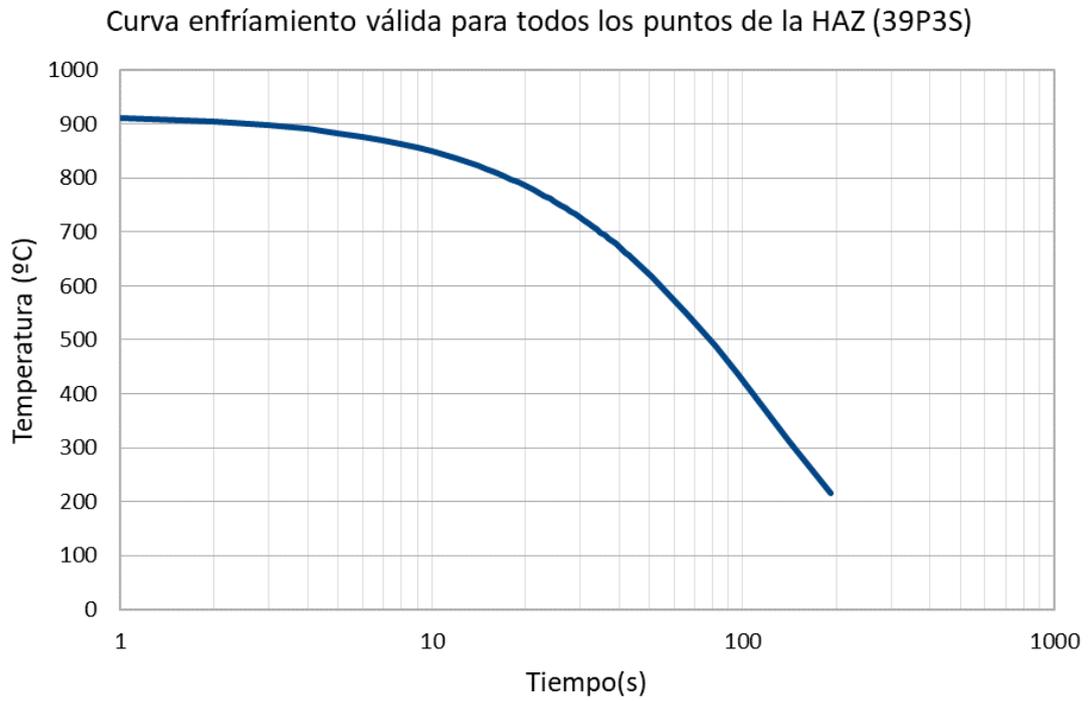
**Gráfica 16:** Curvas de enfriamiento 39P3N.



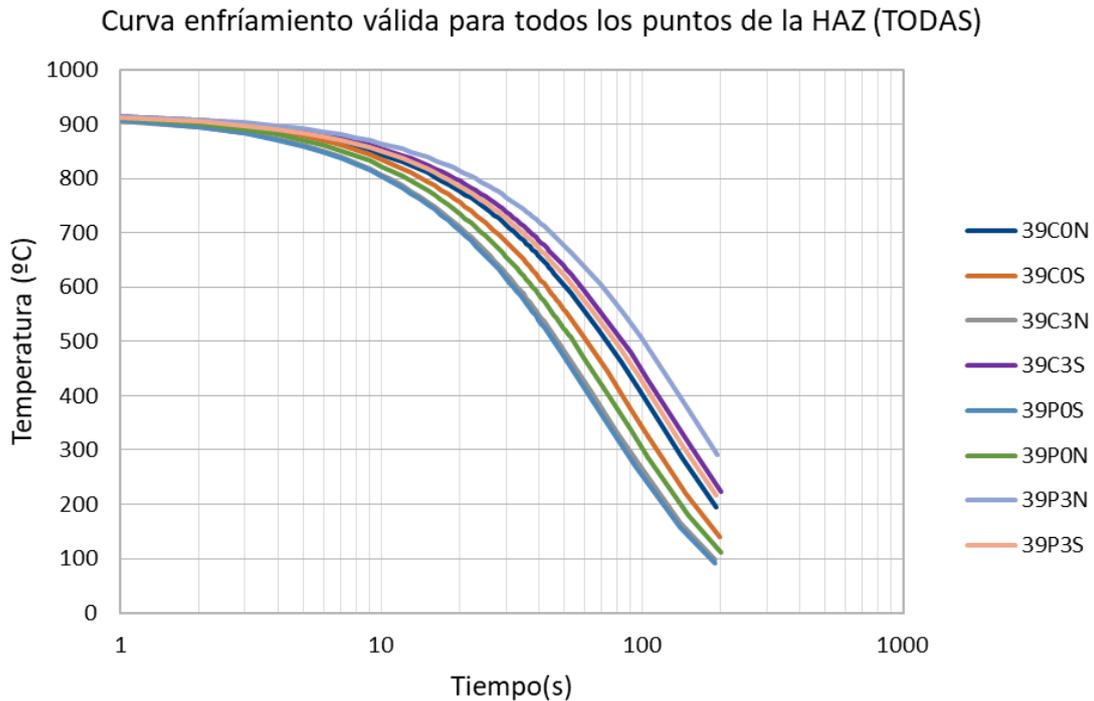
**Gráfica 17:** Curvas de enfriamiento válida para todos los puntos de la HAZ 39P3N.



**Gráfica 18:** Curvas de enfriamiento 39P3S



**Gráfica 19:** Curvas de enfriamiento válida para todos los puntos de la HAZ 39P3S.



**Gráfica 20:** Curvas de enfriamiento válidas para todos los puntos de la HAZ (TODAS).

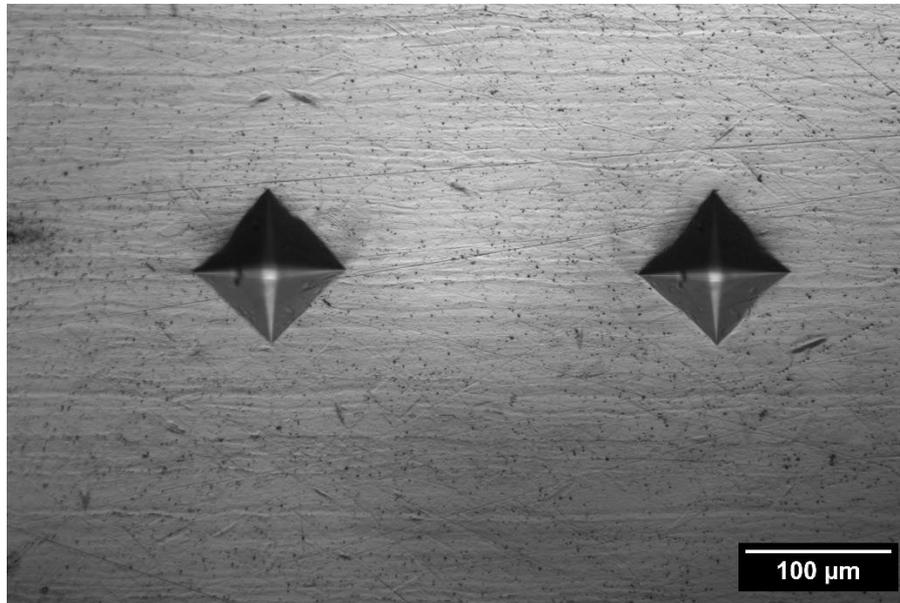
Como se aprecia en la gráfica, destacan dos probetas, la 39P3N por tener una mayor pendiente y la 39P0S por ser la que menor pendiente tiene de todas.

Curva enfriamiento 39P3N (soldadura del acero S700MC con AISI-304, aporte de AISI-309, arco pulsado, bisel a 30°, sin respaldo cerámico): Esta probeta muestra una pendiente pronunciada en la curva de enfriamiento, esto indica que el proceso de enfriamiento fue más rápido que del resto de muestras. La presencia de un bisel a 30° puede haber influido en incrementar la velocidad de enfriamiento, ya que se reduce el espesor en el tope a soldar y permite una disipación más rápida del calor, además al soldar mediante arco pulsado proporciona una mayor flexibilidad en el control del calor aportado, lo que también puede haber influido en la rapidez del enfriamiento, además al no tener respaldo cerámico, hace que el calor se disipe mejor durante la soldadura aumentando la velocidad de enfriamiento.

Curva de enfriamiento 39P0S (soldadura del acero S700MC con AISI-304, aporte de AISI-309, arco pulsado, sin bisel, con respaldo cerámico): Esta probeta muestra una pendiente menor en la curva de enfriamiento, lo que nos muestra que tarda más en disminuir su

temperatura, esto se puede deber a la ausencia de bisel y a la presencia de respaldo cerámico que restringe la disipación de calor durante la soldadura.

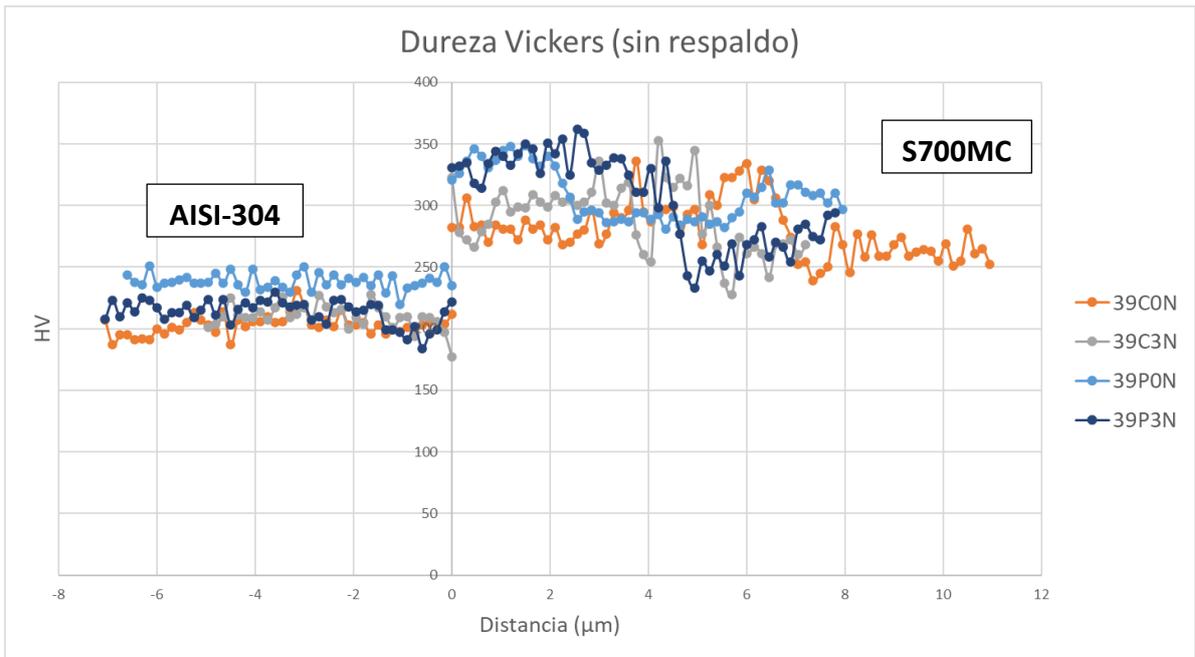
En la siguiente imagen se aprecia una muestra del acero S700MC con indentaciones del ensayo de dureza.



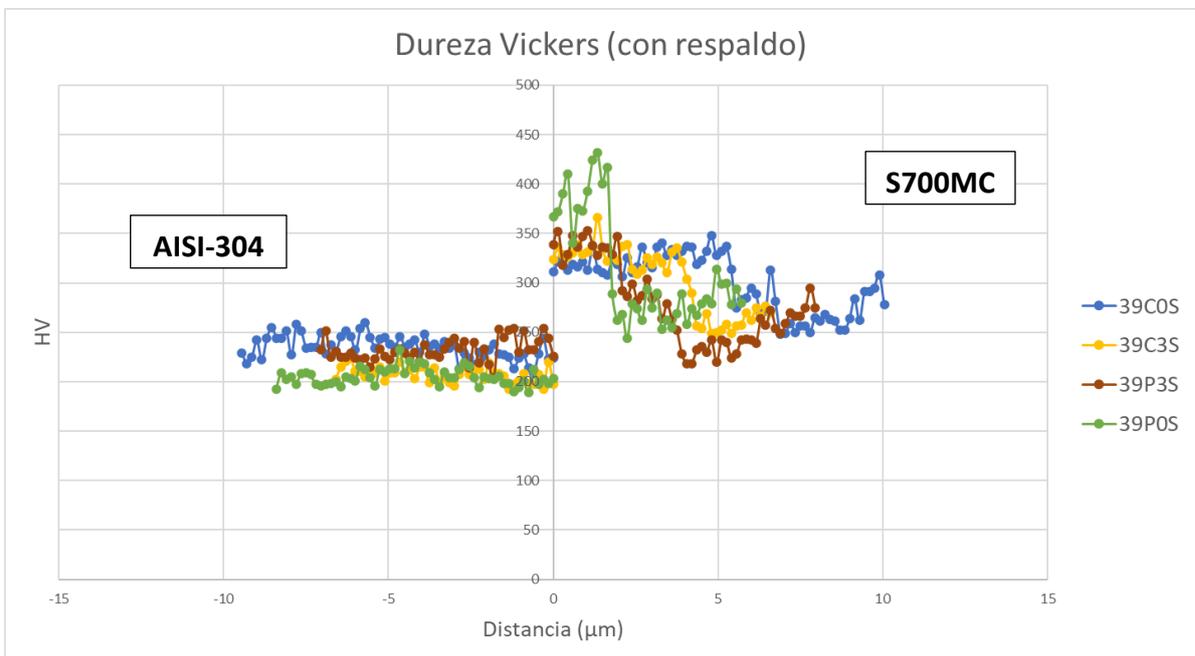
*Ilustración 28: Ejemplo de indentación en prueba de dureza.*

Para poder tener una aproximación del valor de dureza HV en el acero S700MC, el inoxidable AISI-304, a continuación, se muestran unos gráficos con los valores de dureza medidos en la zona afectada térmicamente, teniendo en cuenta que la zona más alta de dureza corresponde con S700MC (derecha), y la más baja y estable con el inoxidable AISI-3040 (izquierda).

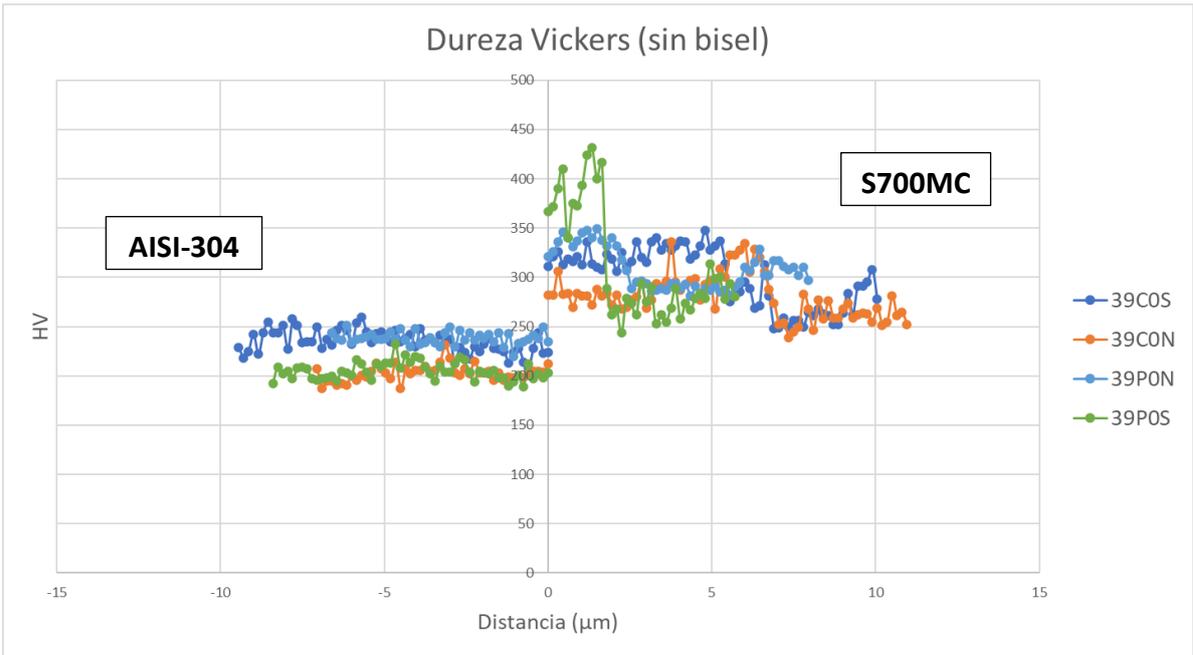
Se muestran los gráficos por separado de las probetas sin respaldo (N), con respaldo (S), sin bisel (0), con bisel (3), arco pulsado (P), cortocircuito (C) y finalmente un gráfico en el que se representan todas las muestras.



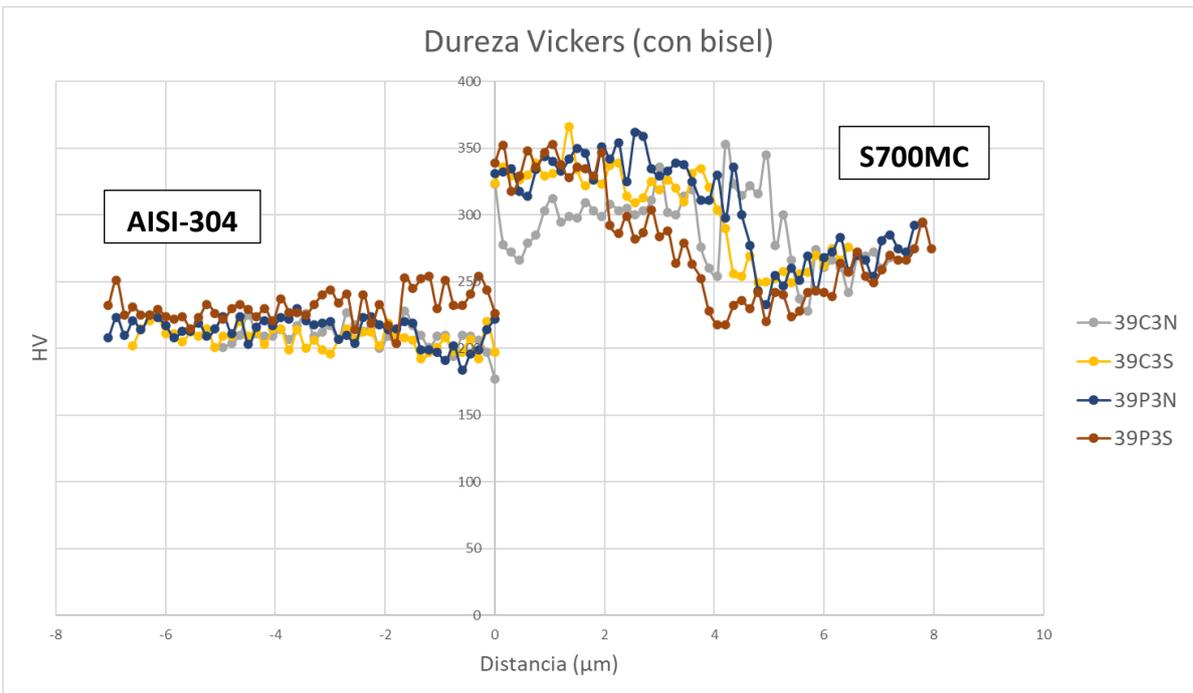
*Gráfica 21: Dureza Vickers sin respaldo.*



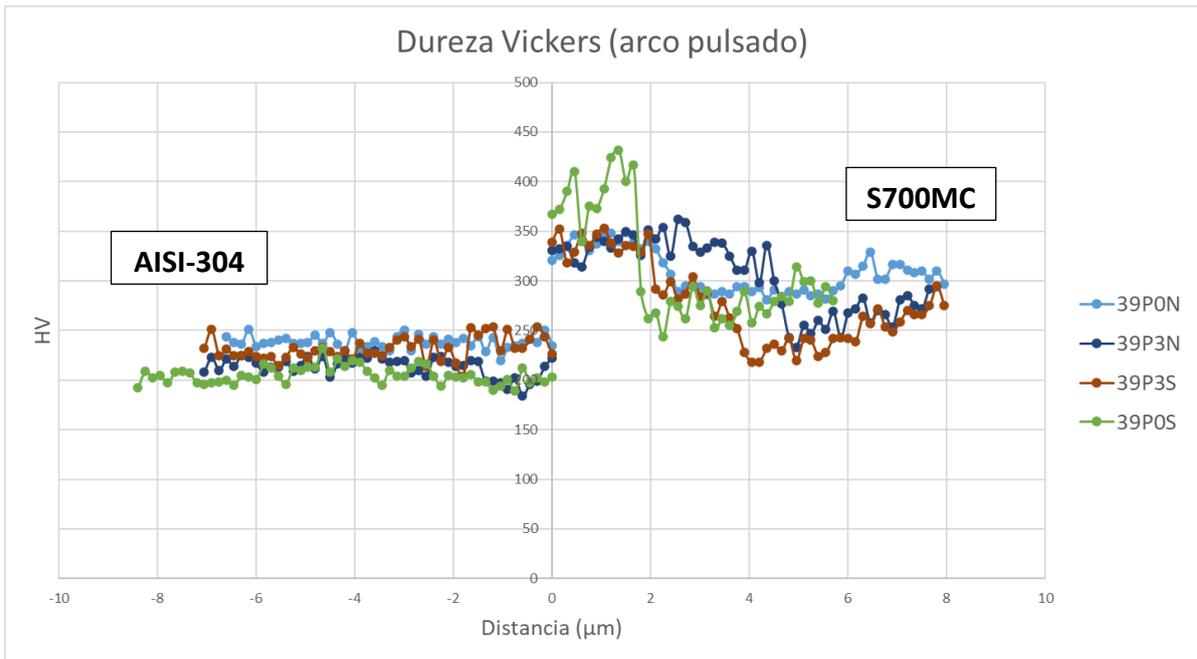
*Gráfica 22: Dureza Vickers con respaldo.*



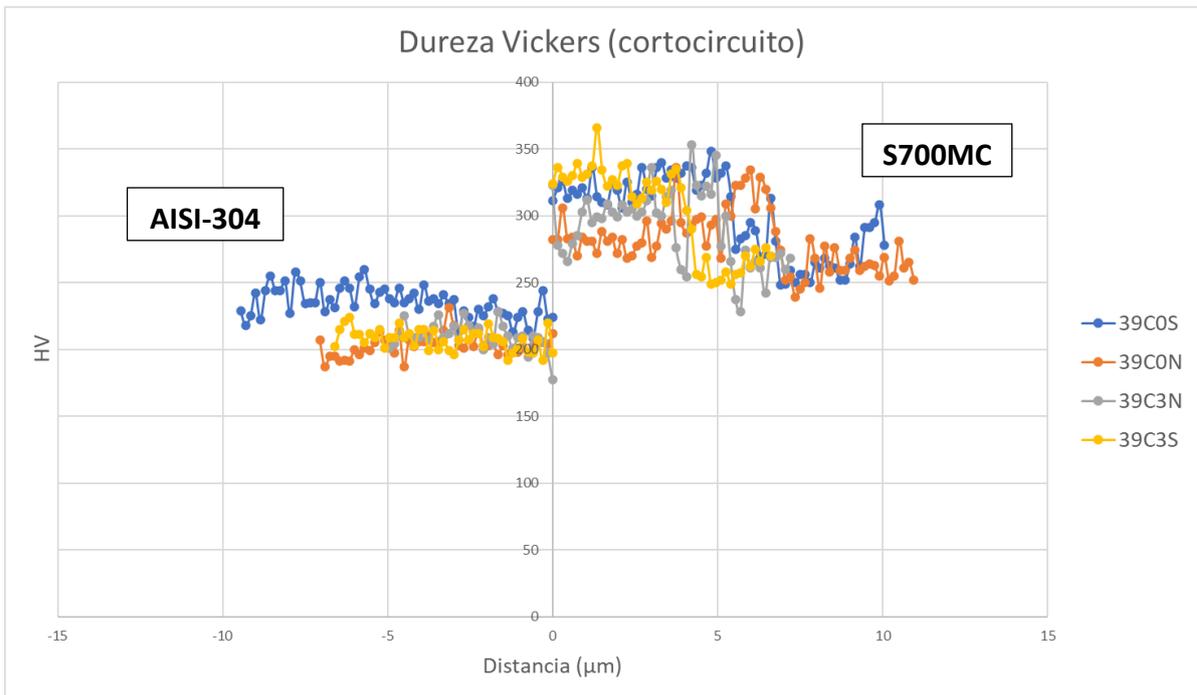
*Gráfica 23: Dureza Vickers sin bisel.*



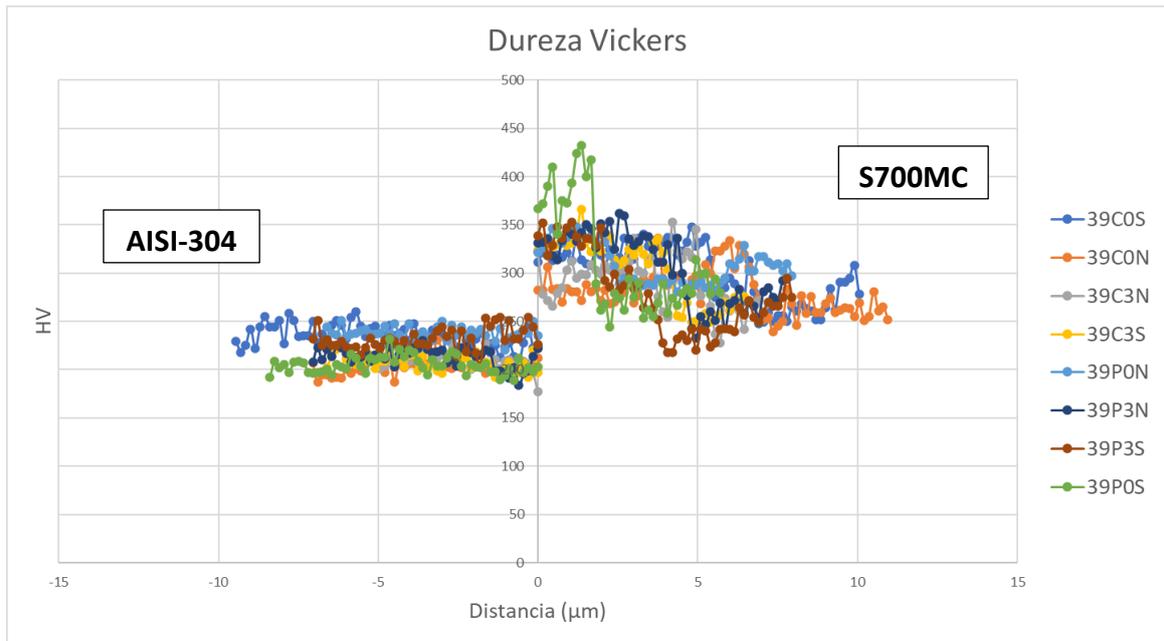
*Gráfica 24: Dureza Vickers con bisel.*



*Gráfica 25: Dureza Vickers arco pulsado.*



*Gráfica 26: Dureza Vickers cortocircuito.*



*Gráfica 27: Dureza Vickers de todas las muestras.*

Los resultados obtenidos muestran una variación significativa en la dureza entre las diferentes probetas ensayadas. La dureza máxima se ha registrado en la probeta 39P0S, que corresponde a una configuración de arco pulsado, sin bisel y con respaldo cerámico en la parte de atrás. El valor de dureza máximo obtenido en esta probeta es de 432, lo que indica una mayor resistencia a la deformación plástica y una mayor capacidad para soportar cargas mecánicas, aunque también una mayor fragilidad, esto debería suponer que en el ensayo a tracción tuviera un valor moderado de fuerza de tracción, pero no es el caso. Esto se puede deber a que la microestructura del material de la probeta contribuya a presentar ambas propiedades. Por ejemplo, una microestructura fina y uniforme puede aumentar la resistencia a la tracción y al mismo tiempo proporcionar una dureza.

La elección del material de aporte (AISI-309) puede tener un efecto significativo en la dureza de la soldadura, y dependiendo de la composición y las condiciones de soldadura, el material de aporte puede dar lugar a diferentes microestructuras y durezas en la zona afectada por el calor.

Los parámetros del proceso de soldadura, como la intensidad de la corriente, el voltaje y la velocidad de soldadura, también pueden influir en las propiedades mecánicas y la

dureza de la soldadura. Un proceso de soldadura bien controlado puede proporcionar una alta resistencia a la tracción y una dureza adecuada.

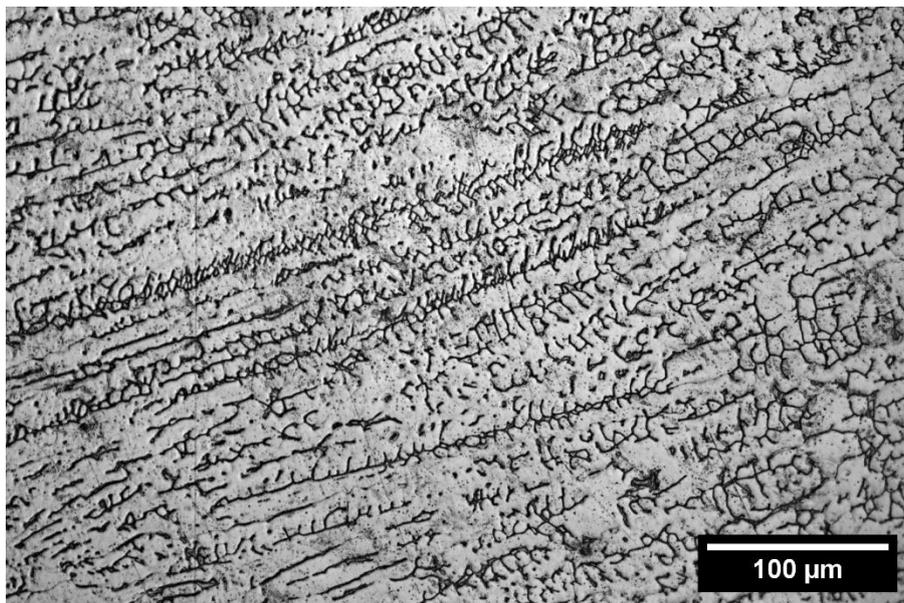
Por otro lado, la dureza mínima se ha observado en la probeta 39CON, que corresponde a una configuración de cortocircuito, sin bisel y sin respaldo cerámico. El valor de dureza mínimo registrado en esta probeta es de 187, lo que indica una menor resistencia a la deformación plástica y, potencialmente, una menor capacidad para soportar cargas mecánicas.

#### 4.4 Metalografía:

A continuación, se muestra una imagen correspondiente a la metalografía del cordón de soldadura, en el cual se muestra una estructura típicamente austenítica, lo cual es consistente con la utilización del material de aporte AISI-309.

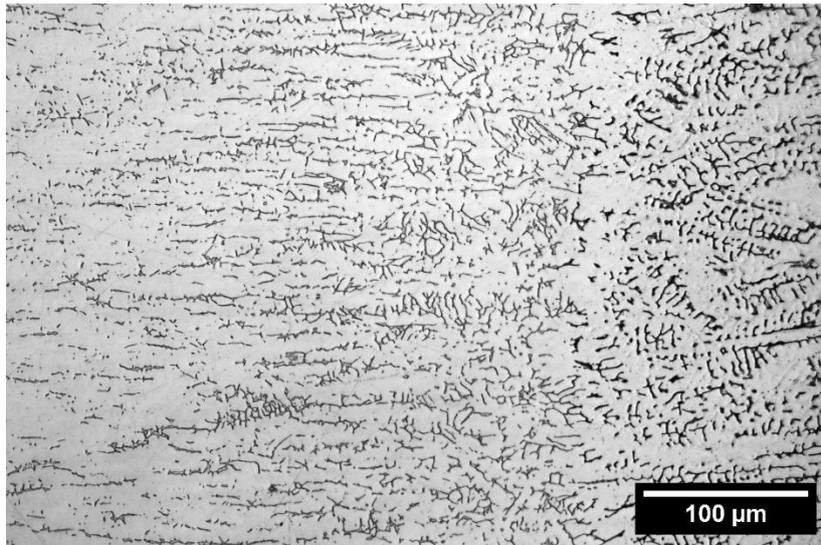
Además, la microestructura del cordón de soldadura muestra un patrón de grano dendrítico alargado. Esto indica que, durante el proceso de solidificación, los granos cristalinos se han formado en direcciones preferenciales, adoptando una morfología dendrítica que refleja la dirección del crecimiento térmico. Esta microestructura dendrítica es común en procesos de solidificación en aleaciones.

También se ha identificado pequeñas islas de ferrita en la microestructura del cordón de soldadura.



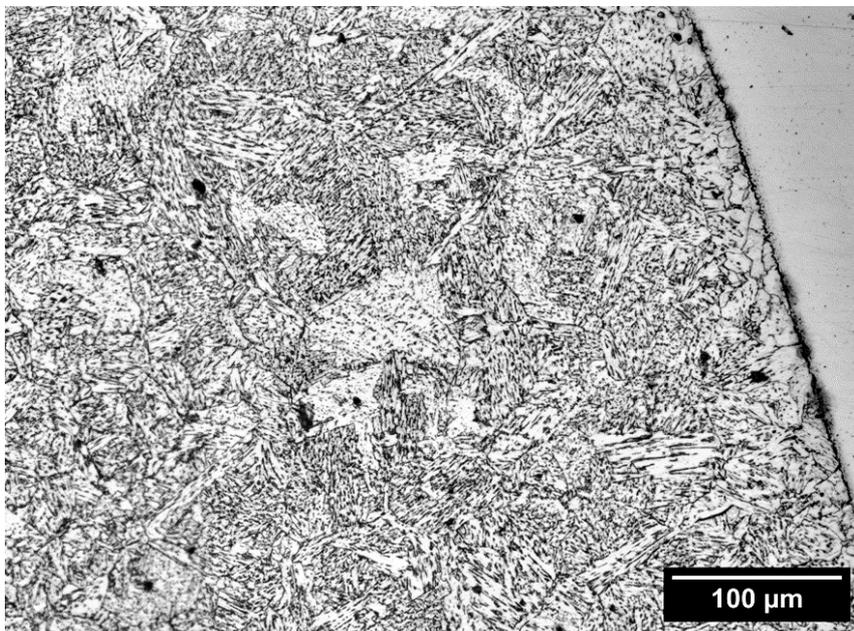
*Ilustración 29: Microestructura del cordón de soldadura.*

El análisis metalográfico muestra cambios en la Zona Afectada Térmicamente (HAZ) del acero inoxidable AISI-304 tras la soldadura. Se observa la recrystalización de los granos y una pérdida de la orientación original de estos.



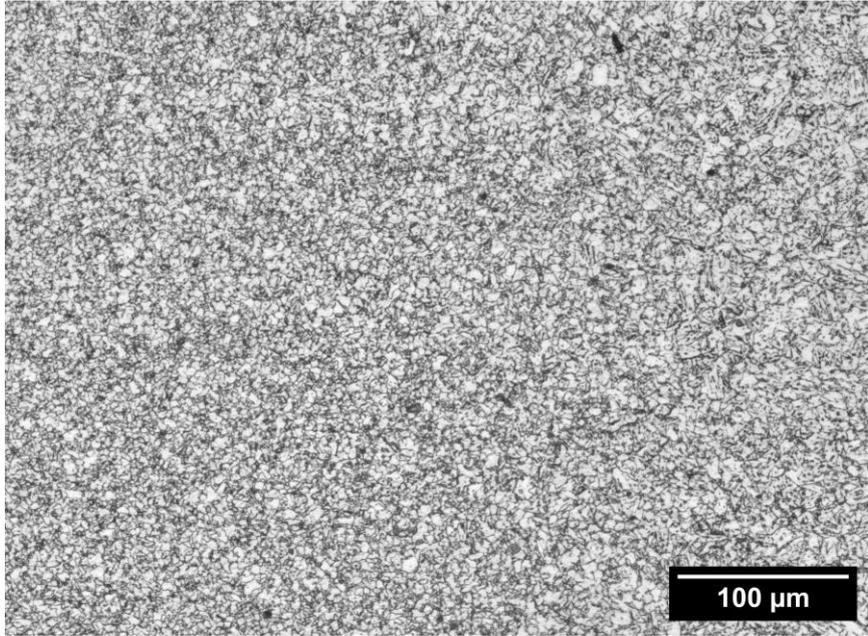
*Ilustración 30: Microestructura del acero inoxidable AISI-304 en la HAZ.*

Seguidamente, se muestra la microestructura de la HAZ del acero S700MC en la que observa un marcado y significativo crecimiento de grano, revelando así mismo, una configuración de tipo martensítico-báinitica con una precipitación de carbonitruros de titanio (Ti) y vanadio (V) que justifica el incremento de la dureza.



*Ilustración 31: Microestructura del acero S700MC en la HAZ.*

En la siguiente imagen se ha identificado una zona donde el grano ha experimentado un proceso de recristalización y ha crecido el tamaño de grano, sin llegar a superar la temperatura de austenización, por lo que en esta región, la dureza resultante es inferior en comparación con la del metal base.



*Ilustración 32: Microestructura con recristalización.*

## 5. PLIEGO DE CONDICIONES

El presente pliego de condiciones establece los requisitos, objetivos y normativa que concierne a este proyecto titulado “Selección del procedimiento de soldadura y análisis de las propiedades para la unión disimilar entre el acero termomecánico S700MC y el inoxidable AISI-304 presente en vehículos ferroviarios usando AISI-309 como material de aporte”. El objetivo de este proyecto es investigar y analizar las propiedades de las uniones soldadas entre estos materiales disimilares, así como determinar el procedimiento de soldadura más adecuado para poder asegurar una unión de alta calidad y resistencia.

Todos los ensayos realizados han sido tutelados por el director de este proyecto.

La totalidad del material aportado ha sido por parte de la Universitat Politècnica de València (UPV).

El alcance de este trabajo/proyecto es de nivel académico.

### **Objetivos del trabajo:**

1. Investigar y analizar las diferentes propiedades mecánicas como la tenacidad, la dureza y la resistencia a tracción de las diferentes muestras soldadas entre el acero S700MC y el inoxidable AISI-304 usando AISI-309 como material de aporte.
2. Estudiar y comparar las diferentes microestructuras obtenidas en las uniones soldadas para comprender la influencia de los distintos procedimientos de soldadura.
3. Evaluar la influencia de los procedimientos de soldadura teniendo en cuenta la fragilidad y resistencia de las uniones disimilares.

### **Metodología:**

1. **Revisión bibliográfica:** Se revisará literatura relacionada con la soldadura de los materiales disimilares, propiedades mecánicas y microestructurales de las uniones formadas.
2. **Selección del procedimiento de soldadura:** Se escogerá el proceso de soldadura más relevante para la unión entre S700MC y AISI-304,

considerando factores de gran importancia como la compatibilidad de los materiales, eficiencia y facilidad de implementación.

3. **Preparación de las muestras:** Se procederá a la preparación de las muestras más representativas de la unión disimilar mediante el proceso de soldadura seleccionado.
4. **Ensayos mecánicos:** Se realizarán las pruebas de tracción, dureza y flexión de las muestras preparadas, siguiendo la normativa y estándares vigentes.

#### **Especificaciones de materiales y equipos:**

- Pantalla protectora para soldadura.
- Radial.
- Discos para desbaste.
- Máquina de corte de sobremesa Remet TR100 Evolution.
- Prensa de montaje en caliente Struers LaboPress-3.
- Pulidora/esmeriladora Struers LaboPol-5.
- Medidor de microdureza.
- Sierra de cinta FEMI 792.
- Microscopio óptico Nikon Microphot FX.
- Cámara de microscopio Optikam CP-20.
- Botella de gas.
- Pletina de S700MC (3mm de espesor).
- Pletina de AISI-304 (3mm de espesor).
- Piqueta soldadura.
- Base soldadura.
- Máquina de soldadura.
- Guantes de trabajo.
- Gafas de protección.
- Polainas.
- Mandil.
- Nital-3

**Normativa empleada:**

**UNE-EN ISO 15607:2003.** Especificación y cualificación de procedimientos de soldeo para los materiales metálicos. Reglas generales.

**UNE-EN ISO 15609-1:2004.** Especificación y cualificación de procedimientos de soldeo para los materiales metálicos. Especificación del procedimiento de soldeo.

**UNE-EN ISO 6947:2011.** Soldaduras. Posiciones de trabajo. Definición de los ángulos de pendiente y de rotación.

**UNE-EN ISO 6892-1:2017.** Materiales metálicos. Ensayo de tracción. Parte 1: Método de ensayo a temperatura ambiente. (ISO 6892-1:2016).

**UNE-EN ISO 9017:2018.** Ensayos destructivos de soldaduras de materiales metálicos. Ensayo de rotura.

**UNE-EN 15085-2:2021.** Aplicaciones ferroviarias. Soldeo de vehículos y de componentes ferroviarios.

**UNE-EN 10088-1:2015.** Aceros inoxidables. Parte 1: Relación de aceros inoxidables.

**UNE-EN 10088-2:2015.** Aceros inoxidables. Parte 2: Condiciones técnicas de suministro para chapas y bandas de aceros resistentes a la corrosión para usos generales.

**UNE-EN 10095:2000.** Aceros y aleaciones de níquel refractarios.

**UNE-EN 10149-2:2014.** Productos planos laminados en caliente de acero de alto límite elástico para conformado en frío. Parte 2: Condiciones técnicas de suministro para aceros en estado de laminado termomecánico.

## 6. PRESUPUESTO

En este apartado del proyecto se va a realizar un análisis de los recursos empleados para el desarrollo de este, es por ellos que a continuación se va a mostrar el presupuesto correspondiente considerando los diferentes elementos que influyen en los costes asociados.

En primer lugar, se ha prestado atención a las horas dedicadas por el estudiante en la realización de este proyecto, teniendo en consideración tanto el tiempo invertido, así como el costo asociado al trabajo de esas horas. Esto proporciona una visión clara de los recursos humanos involucrados y su impacto económico en el desarrollo de este proyecto.

Seguidamente se ha evaluado el material consumible empleado durante la realización de los diferentes ensayos en el proyecto. Para ello se han tenido en cuenta los elementos como los insumos, herramientas empleadas y consumibles necesarios. Cada uno de los elementos ha sido valorado económicamente, permitiendo así una comprensión clara de los costos asociados al material consumible.

Finalmente se ha considerado la amortización de los diferentes equipos empleados. Esto implica evaluar el valor de los equipos, su vida útil estimada y distribuir su costo a lo largo del tiempo. De esta manera, se puede obtener una estimación más realista de los gastos relacionados con los equipos empleados en el proyecto.

A continuación, se muestran las tres tablas correspondientes en las que se ha dividido el presupuesto tal y como se iba de detallar.

<b>HORAS ESTUDIANTE</b>			
<b>CONCEPTO</b>	<b>HORAS</b>	<b>€/HORA</b>	<b>TOTAL</b>
Corte y rectificado de muestras	70	15,00 €	1.050,00 €
Preparación metalográfica	4	15,00 €	60,00 €
Ensayos de tracción	15	15,00 €	225,00 €
Ensayos de flexión	15	15,00 €	225,00 €
Ensayos de dureza	40	15,00 €	600,00 €
Microscopía electrónica	2	25,00 €	50,00 €
Redacción y otros	154	15,00 €	2.310,00 €
<b>TOTAL HORAS ESTUDIANTE</b>	<b>300</b>		<b>4.520,00 €</b>

*Tabla 13: Total de horas dedicadas por el estudiante y costo.*

<b>CONSUMIBLES</b>			
<b>CONCEPTO</b>	<b>UNIDADES</b>	<b>€/UNIDAD</b>	<b>TOTAL</b>
Cupones de soldadura	16	38,00 €	608,00 €
Papel de lija	2 packs	100,00 €	200,00 €
Pasta de diamante	2	35,00 €	70,00 €
Almohadilla de pulido	1 pack	95,00 €	95,00 €
Polvo de PMMA para montaje	1	180,00 €	180,00 €
Reactivo químico	1	20,00 €	20,00 €
Guantes de látex	1 packs	9,90 €	9,90 €
<b>TOTAL CONSUMIBLES</b>			<b>1.182,90 €</b>

*Tabla 14: Costo de consumibles.*

AMORTIZACIÓN DE EQUIPOS						
CONCEPTO	PRECIO	PERIODO AMORTIZACIÓN (Años)	MANTENIMIENTO/AÑO	PERIODO AMORTIZACIÓN (horas)	HORAS DE USO	TOTAL
Máquina de ensayo universal Ibertest MD100-2	17.500,00 €	20	180,00 €	3550	7	41,61 €
Máquina de corte de sobremesa Remet TR100 Evolution	9.800,00 €	20	310,00 €	9000	2	3,56 €
Prensa de montaje en caliente Struers LaboPress-3	7.650,00 €	20	150,00 €	4550	7	16,38 €
Pulidora/esmeriladora Struers LaboPol-5	3.400,00 €	20	70,00 €	6300	30	22,86 €
Medidor de microdureza	14.600,00 €	20	270,00 €	1800	40	444,44 €
Sierra de cinta FEMI 792	7.200,00 €	20	420,00 €	1800	23	199,33 €
Microscopio óptico Nikon Microphot FX	15.000,00 €	20	250,00 €	360	30	1.666,67 €
Cámara de microscopio Optikam CP-20	1.100,00 €	20	15,00 €	2000	30	21,00 €
<b>TOTAL</b>						<b>2.394,85 €</b>

Tabla 15: Amortización de equipos.

## 7. CONCLUSIÓN

A lo largo de este trabajo de final de grado, se ha llevado a cabo un estudio sobre la selección del procedimiento de soldadura y el análisis de las propiedades en la unión disimilar entre el acero termomecánico S700MC y el acero inoxidable AISI-304, ambos ampliamente utilizados en vehículos ferroviarios. El objetivo principal ha sido evaluar la viabilidad y eficacia del proceso de soldadura, así como analizar las características mecánicas y metalúrgicas de las uniones soldadas utilizando el material de aporte AISI-309.

Se ha optado por el proceso de soldadura MAG debido a su eficiencia y aplicabilidad en aplicaciones industriales, especialmente en la unión de aceros inoxidables.

Los ensayos mecánicos realizados, como la tracción y la flexión, han permitido evaluar las propiedades mecánicas de las uniones soldadas, como la resistencia a la tracción, la tenacidad y la ductilidad. Los resultados obtenidos han demostrado que la soldadura MAG con material de aporte AISI-309 ha proporcionado uniones con propiedades mecánicas adecuadas para aplicaciones en vehículos ferroviarios, cumpliendo con los estándares y requisitos específicos de la industria, como es el caso de las probetas 39P3N (arco pulsado, con bisel y sin respaldo), 39P0S (arco pulsado, sin bisel y con respaldo) y 39P3S (arco pulsado, con bisel y con respaldo), en todos estos casos la resistencia de la unión es superior a las del acero AISI-304.

Las probetas quizás menos adecuadas debido a su baja resistencia a tracción en comparación con las demás soldaduras son la 39C0S (cortocircuito, sin bisel y con respaldo) y 39C3N (cortocircuito, con bisel y sin respaldo).

Por lo que, con estos ensayos, se puede determinar que es mejor la soldadura en arco pulsado que en cortocircuito.

La evaluación de la dureza de las diferentes probetas soldadas ha proporcionado información valiosa sobre la resistencia y la homogeneidad de la microestructura en las zonas de soldadura y la Zona Afectada Térmicamente (HAZ). Los resultados han demostrado una variación en la dureza entre las diferentes configuraciones de soldadura, lo que ha permitido comprender la influencia de los parámetros de soldadura y el proceso de enfriamiento en las propiedades mecánicas resultantes.

En resultados de dureza obtenidos, se ha observado un comportamiento notablemente distinto en las propiedades de dureza entre los materiales evaluados. Específicamente, se han encontrado patrones en los valores de dureza del acero AISI-304, el cordón de soldadura y el acero S700MC cercano al cordón de soldadura.

En el caso del acero AISI-304, se ha verificado una constancia en sus valores de dureza, exhibiendo una variación prácticamente inexistente a lo largo de las mediciones realizadas. Esta estabilidad en la dureza sugiere que el material mantiene una estructura micrográfica uniforme, lo cual es un indicativo positivo de su homogeneidad y consistencia en términos mecánicos.

Es importante destacar que el acero S700MC muestra un incremento cerca del cordón de soldadura, posteriormente disminuyen los valores de dureza hasta finalmente volverse a estabilizar.

Además, la metalografía ha sido una herramienta clave para el análisis microestructural de las diferentes zonas de la soldadura. La observación de las diferentes estructuras de grano y la identificación de los posibles defectos e inclusiones en la HAZ han sido fundamentales para evaluar la calidad y la integridad de las uniones soldadas.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

- Aceropedia.** (03 de 05 de 2023). Obtenido de Acero HSLA: ¿Qué es acero de baja aleación de alta resistencia?: <https://aceropedia.com/tipos-de-acero/acero-hsla/>
- Blog SEAS.** (18 de 05 de 2023). Obtenido de Uso del diagrama de Shaeffler para el soldeo de inoxidable: <https://www.seas.es/blog/produccion-mantenimiento/uso-del-diagrama-de-shaeffler-para-el-soldeo-de-inoxidables/>
- Bohnart, E. R.** (2018). *Welding Principles and Practices*. McGraw-Hill Education.
- BONNET.** (08 de 05 de 2023). Obtenido de Clasificación de los aceros inoxidables: <https://www.bonnet.es/clasificacionacerinox.pdf>
- CARO, J. C., & FUENTES VIDAL, J.** (2020). *EFFECTO DE LOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS EN LA MICROESTRUCTURA*. Montería: Universidad de Córdoba.
- Cía. General de Aceros S.A.** (28 de 04 de 2023). Obtenido de AISI 304: <https://www.cga.com.co/producto/aisi-304/>
- Grumeber.** (26 de 05 de 2023). Obtenido de Acero Inoxidable AISI 304 | Propiedades.
- Lippold, J. C., & Kotecki, D. J.** (2005). *Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels*. Wiley.
- MATETEC.** (23 de 05 de 2023). Obtenido de Acero Alto Límite Elástico: <https://www.matetec.com/chapa-de-bobina/bob-acero/bob-acero-alto-limite-elastico/>
- Merino Casals, C.** (2017). *Aceros Inoxidables*. Dextra Editorial.
- NKS.** (27 de 05 de 2023). Obtenido de Aceros Inoxidable 309 y 309S: <https://nks.com/es/distribuidor-de-acero-inoxidable/acero-inoxidable-309-y-309s/>
- SHACKELFORD, J. F.** (2005). *Introducción a la ciencia de materiales para ingenieros*. Pearson.

- SSAB.** (28 de 04 de 2023). Obtenido de Strenx 700MC - Acero estructural con una conformidad en frío excelente: <https://www.ssab.com/es-es/marcas-y-productos/strenx/oferta-de-productos/700/mc-d-e>
- Strenx.** (23 de 05 de 2023). Obtenido de Strenx 700MC D/E: <https://www.ssab.com/es-mx/marcas-y-productos/strenx/oferta-de-productos/700/mc-d-e>
- Struers.** (29 de 05 de 2023). Obtenido de Metalografía del acero de herramientas de alta aleación: <https://www.struers.com/es-ES/Knowledge/Materials/Tool-steel>
- Universidad de Málaga (UMA).** (30 de 03 de 2023). Obtenido de Tema 4. Aleaciones Hierro-Carbono. Aceros y Fundiciones.:  
[http://webdeptos.uma.es/qicm/Doc\\_docencia/Tema4\\_CM.pdf](http://webdeptos.uma.es/qicm/Doc_docencia/Tema4_CM.pdf)
- ZwickRoell.** (28 de 05 de 2023). Obtenido de Ensayo de flexión:  
<https://www.zwickroell.com/es/sectores/ensayo-de-materiales/ensayo-de-flexion/>
- ZwickRoell.** (29 de 05 de 2023). Obtenido de Ensayo de dureza Vickers: ISO 6507, ASTM E384: <https://www.zwickroell.com/es/sectores/metales/normas-para-metales/ensayo-de-dureza-vickers-iso-6507/>