



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Mecánica

**INFLUENCIA DEL TRATAMIENTO DE ENDURECIMIENTO A ALTA
TEMPERATURA EN EL COMPORTAMIENTO FRENTE A LA
CORROSIÓN POR PICADURAS DE UNA UNIÓN SOLDADA DE
ACERO INOXIDABLE AUSTENITICO**

Autor:

Herrero Luengo, Diego

Tutor:

De Tiedra Frontaura, M^a Del Pilar

DPTO: CMeIM/EGI/ICGF/IM/IPF

Valladolid, Junio - 2016





RESUMEN, PALABRAS CLAVE

Este proyecto estudia la influencia del tratamiento de endurecimiento por precipitación en el comportamiento frente a la corrosión por picaduras de una unión soldada de acero A-286 usando ensayos electroquímicos de polarización anódica (PA). Los ensayos se realizan sobre la sección longitudinal generada en un corte de la unión soldada, de forma que la superficie ensayada contiene metal base, zona afectada térmicamente y metal fundido.

Adicionalmente se realiza un estudio de la capacidad resistente de la unión soldada sometiendo a un ensayo de cizalladura en el que determinamos la influencia del tratamiento de endurecimiento por precipitación sobre la carga que la unión soldada soporta antes de romper.

Se llega a la conclusión que el tratamiento de 100h y 200h es el que mejor comportamiento frente a la corrosión nos ofrece ya que presentan mayor potencial de picadura, y el tratamiento de 100h es el que mayor carga soporta y por tanto el óptimo desde un punto de vista resistente.

Palabras clave:

Inoxidable austenítico

Endurecimiento por precipitación

Corrosión por picaduras

Ensayo electroquímico de polarización anódica

Soldadura por resistencia





ÍNDICE

1.- ANTECEDENTES Y OBJETIVOS	7
1.1.- ANTECEDENTES.....	7
1.2.- OBJETIVOS	9
2.- MATERIAL.....	11
2.1.- ACEROS INOXIDABLES	11
2.1.1.- INFLUENCIA DE LOS ELEMENTOS	13
2.1.2.- CLASIFICACIÓN DE LOS ACEROS INOXIDABLES.....	14
2.2.- ACEROS INOXIDABLES AUSTENÍTICOS	17
2.2.1.- PRECIPITACIÓN DE CARBUROS Y FASES INTERMETÁLICAS	18
2.2.2.- CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	19
2.2.3.- CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS	20
2.3.- EL ACERO INOXIDABLE A-286	21
3- ENDURECIMIENTO POR PRECIPITACIÓN	23
3.1.- CONDICIONES PARA PRODUCIR EL ENDURECIMIENTO POR PRECIPITACIÓN.....	24
3.2.- INFLUENCIA DEL TIEMPO DE ENVEJECIMIENTO	25
3.2.1.- INFLUENCIA EN LA MICROESTRUCTURA.....	25
3.2.2.- INFLUENCIA EN LA RESISTENCIA MECÁNICA Y LA DUREZA.....	26
3.2.3.- INFLUENCIA EN LA CORROSIÓN	28
4.- DESARROLLO EXPERIMENTOS.....	31
4.1.- TRATAMIENTO TÉRMICO	31
4.2.- PREPARACIÓN METALGRÁFICA.....	32
4.2.1.- CORTE.....	32
4.2.2.- EMPASTILLADO	33
4.2.3.- ROSCADO.....	34
4.2.4.- DESBASTE Y PULIDO.....	36
4.3.- ENSAYO DE CIZALLADURA.....	37
4.4.- ENSAYO DE CORROSIÓN POR PICADURAS.....	39
4.4.1.- COMPONENTES DEL ENSAYO DE CORROSIÓN POR PICADURAS	39
4.4.2.- MONTAJE DEL ENSAYO DE CORROSIÓN POR PICADURAS	44
4.4.3.- EJECUCIÓN DEL ENSAYO.....	47



4.4.4.- ENSAYO DE POLARIZACIÓN ANÓDICA	48
5.- RESULTADOS Y CONCLUSIONES	51
5.1.- RESULTADOS DEL ENSAYO DE CIZALLADURA	51
5.2.- RESULTADOS DEL ENSAYO DE POLARIZACIÓN ANÓDICA	53
6- BIBLIOGRAFÍA	65
6.1- BIBLIOGRAFÍA.....	65
6.2.- NORMATIVA.....	66
7.- ANEXO 1.....	67
7.1.- IMÁGENES ENSAYOS CIZALLADURA.....	67
7.2.- IMÁGENES ENSAYOS DE POLARIZACIÓN ANÓDICA.....	69



1.- ANTECEDENTES Y OBJETIVOS

1.1.- ANTECEDENTES

El principal componente del acero, el hierro, llegó desde Asia a Europa en el siglo XI a.C., y se expandió hacia occidente durante los 500 años siguientes, aunque no fue hasta el siglo XIV d.C. cuando hablamos de una utilización moderna en Europa central¹.

El acero fue descubierto accidentalmente, debido al calentamiento de mineral de hierro con carbón en recipientes, de tal manera que el hierro absorbía suficiente carbono para convertirse en acero. Fue ya en el siglo XIV cuando se empezó a producir en hornos de gran tamaño de los que se obtenía el arrabio el cual se refinaba obteniéndose acero. Hoy en día utilizamos para la fabricación del acero unos altos hornos similares aunque perfeccionados a los utilizados antiguamente².

El principal inconveniente de los aceros es la corrosión, la cual podríamos definir como el desgaste del metal en el medio en el que se encuentra, medio denominado corrosivo u oxidante, debido a su contenido en oxígeno, que es el elemento que tiende a combinarse con el acero para producir la corrosión. Esta corrosión supone un inconveniente para garantizar la fiabilidad y durabilidad de los aceros³.

Existen varias formas de evitar el fenómeno de la corrosión entre los que están:

- Impregnar el acero con una pequeña capa fina impermeable que evita la interacción metal–medio utilizando distintos tipos de recubrimiento.
- Formar aleaciones con otros elementos tales como cromo o níquel de tal manera que lo conviertan en químicamente resistente a la corrosión. Un ejemplo es el acero inoxidable.

De tal forma que para evitar este fenómeno de la corrosión en materiales metálicos, surgió el acero inoxidable. El acero inoxidable tiene la capacidad de protegerse a sí mismo en un ambiente oxidante, ya que se pasiva debido a la formación de una película superficial de óxido de cromo. El cromo de esta película reacciona con el oxígeno del medio al que está expuesto formando una película protectora e invisible.



El acero inoxidable es utilizado principalmente para la construcción de equipos para la industria química, láctea, alimenticia, biotecnológica, tales como cristalizadores, cubas de mezclado, recipientes a presión, tanques, evaporadores, intercambiadores de calor, tubería, bombas y válvulas. Su uso es especialmente significativo en condensadores de agua de mar, tuberías de agua para centrales térmica, componentes para depuradoras de sulfurización de gases de combustión, y se está ampliando para su aplicación para usos arquitectónicos⁴.

Nuestro acero estudio se engloba dentro de una gama de aceros, denominados inoxidables austeníticos. Este acero se caracteriza por su resistencia a la corrosión y es el motivo de la generalización de su empleo. Aun llamándose inoxidables, estos aceros no son de por sí una plena garantía de cara a la corrosión. Estos aceros son susceptibles a un tipo de corrosión localizada originada por los cambios estructurales inducidos por un determinado proceso de fabricación y por la temperatura a la que se somete durante su vida útil. No pueden soportar todo el conjunto de fenómenos de degradación conocidos bajo el nombre de corrosión ya que existen circunstancias o procesos tecnológicos en los cuales no ofrecen una respuesta aceptable al ser sometidos por ejemplo a agentes químicos o cuando se producen cambios desfavorables de la estructura interna del acero inoxidable.

El Acero inoxidable A-286 (material de nuestro estudio), es una superaleación base hierro (endurecible por precipitación), perteneciente a la gama de aceros inoxidables austeníticos. Es utilizado en la industria espacial, aeronáutica y nuclear. También se usa en la industria petroquímica y de extracción de petróleo en tornillería, elementos de fijación y componentes de bombas⁵.



1.2.- OBJETIVOS

En este proyecto, el objetivo es el estudio del comportamiento de una unión soldada por puntos del Acero A-286 (AISI 660), que es un acero de alta resistencia mecánica y alta resistencia a la corrosión, frente a la corrosión por picaduras. Para ello someteremos al material, previamente soldado, a un tratamiento de endurecimiento por precipitación, el cual se explicará más adelante. El estudio realizado pretende evaluar el comportamiento del acero, mediante la observación de las muestras, en dos aspectos principales:

- Influencia del tratamiento en las características mecánicas del material mediante ensayos de cizalladura para determinar la resistencia mecánica.
- Influencia del tratamientos en la corrosión del material, mediante ensayos de polarización anódica.

Mediante esto, el objetivo es obtener resultados acerca del tratamiento más óptimo, el que refleje mejores características mecánicas y mejor comportamiento frente a la corrosión.

Este proyecto se encuadra dentro de un conjunto de proyectos referidos al comportamiento en servicio de materiales metálicos que se vienen realizando por el departamento de Ciencias de los Materiales de la Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad de Valladolid.



2.-MATERIAL

2.1.- ACEROS INOXIDABLES

Los aceros inoxidables, son aleaciones a base de hierro, cromo, carbono y otros elementos, principalmente, níquel, molibdeno, manganeso, silicio y titanio, entre otros que le confieren una resistencia particular a algunos tipos de corrosión en determinadas aplicaciones industriales. Se puede definir (Según EN 10088) a los aceros inoxidables como aquellas aleaciones férricas que contienen cromo en una proporción mínima del 10,5%.

La principal característica de los aceros inoxidables es que poseen la capacidad de protegerse a sí mismos de la corrosión al pasivarse en un ambiente oxidante por medio de la formación de una película superficial de óxido de cromo. Este cromo reacciona con el oxígeno del aire y/o agua al que está expuesta la superficie del acero, formando una película pasiva protectora e invisible de óxido de cromo. La película pasiva posee la capacidad de reconstruirse si se la daña en un ambiente oxidante y el oxígeno entra en contacto con la aleación, manteniendo una protección permanente del acero ante el ataque corrosivo. En estas condiciones podemos hablar de un acero inoxidable en estado pasivo. La resistencia a la corrosión aumenta conforme lo hacen los niveles de cromo en la aleación y con la adición de molibdeno a la misma. La composición de esta capa pasiva es diferente con cada tipo de acero y con cada tipo de tratamiento al que se pueda someter.

Seleccionaremos los aceros inoxidables en función de las condiciones de uso que se requieran. Tendremos en cuenta la resistencia a la corrosión, la resistencia a ambientes agresivos, las características de fabricación, las propiedades mecánicas que presenten a determinadas temperaturas y por supuesto el coste de fabricación.

Como hemos dicho los aceros son aleaciones que contienen básicamente hierro y carbono, como componentes intrínsecos de cualquier acero, y cromo que es el elemento que proporciona al acero pasividad frente a medios oxidantes a través de la formación de la película de óxido de cromo.

Adicionalmente los aceros pueden incluir muchos otros elementos de aleación tales como Si, Mn, P, S, Ni, Mo, Cu, Ti, Nb, N, B, W, Se, Te, especialmente los inoxidables austeníticos. Cada elemento tiene una influencia más o menos notable en cada una de las fases cristalinas que nos va a determinar la estructura metalúrgica del acero y por tanto su tipo.

Podríamos realizar la clasificación de cada uno atendiendo a la influencia que cada uno tiene sobre la estructura final del acero.

- Formadores de ferrita, es decir, fase α , también denominados alfégenos o ferritizantes: Fe, Cr, Si, Ti, Nb, Mo, Mn.

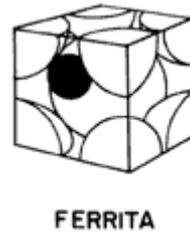
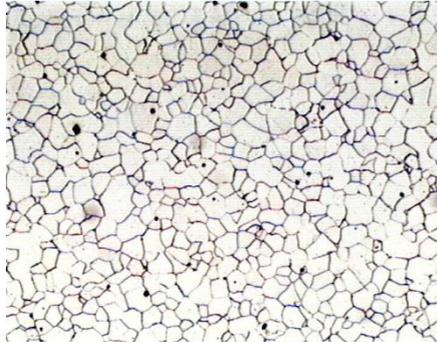


Figura 2.1. Estructura de la ferrita

- Formadores de austenita, es decir, fase γ , también denominados gammágenos o austenitizantes: C, Ni, N, Mn.

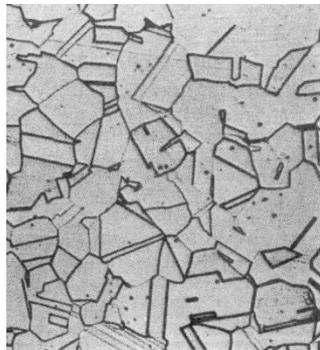


Figura 2.2. Estructura de la austenita

El manganeso está incluido en ambos grupos, debido a que tiene un papel doble: por un lado es formador de ferrita especialmente cuando su contenido es alto y por otro es un estabilizador de la austenita.



En función de la presencia de elementos alfégenos y gammágenos, la estructura final del acero, podrá ser ferrítica, austenítica o mixta

2.1.1.- INFLUENCIA DE LOS ELEMENTOS

La influencia que tiene cada uno de los elementos aleantes en el acero, es la siguiente⁶:

- Carbono: Es fuerte formador de la austenita. Forma carburos con el cromo que pueden dar lugar a la corrosión intergranular. Mejora las propiedades mecánicas a temperaturas elevadas y aumenta la resistencia a la corrosión.
- Cromo: Favorece la formación de ferrita y carburo. Incrementa la resistencia a la corrosión, la formación de la película de óxido y las propiedades mecánicas.
- Níquel: Favorece la formación de la austenita. Incrementa la resistencia a temperaturas elevadas, la resistencia a la corrosión, la tenacidad, la ductilidad, la resistencia eléctrica, la resistencia a la fatiga y la capacidad para ser soldado. Reduce la conductividad del calor.
- Titanio: Se añade principalmente para combinar con el carbono y reducir la susceptibilidad a la corrosión intergranular. Actúa como refinador de grano y favorece la formación de ferrita.
- Manganeso: Estabiliza la austenita a temperatura ambiente pero forma ferrita a temperaturas elevadas. Inhibe la fisuración en caliente por la formación de sulfuro de manganeso.
- Molibdeno: Mejora la resistencia a elevada temperatura, la resistencia a la corrosión y favorece la formación de ferrita y carburo
- Silicio: Favorece la formación de ferrita. Se añade en pequeñas cantidades como desoxidante. Mejora las propiedades de empleo a altas temperaturas, aunque disminuye la resistencia a la fisuración durante la soldadura.
- Fósforo, azufre y selenio: Incrementa la facilidad de mecanizado, aunque promueve la fisuración en caliente durante la soldadura. Disminuye la resistencia a la corrosión.
- Cobre: Aumenta la resistencia a la corrosión a ciertos medios ambientales. Disminuye la susceptibilidad a la corrosión bajo tensiones y produce efecto de envejecimiento.
- Azufre: En contenidos del orden de 0.2% mejora considerablemente la mecanización, pero disminuye la resistencia a la corrosión por picaduras. Para asegurar la soldabilidad operativa en algunos casos, su contenido debe rondar el 0.07%.



- Vanadio: Es un elemento desoxidante muy fuerte. Tiende a afinar el grano, es un gran formador de carburos y dificulta mucho el ablandamiento por revenido. Puede no influir en la templabilidad si se encuentra disuelto.
- Boro: Pequeñas cantidades mejoran notablemente la templabilidad. Su utilización presenta bastantes dificultades ya que es un desoxidante muy fuerte.
- Nitrógeno: Fuerte formador de la austenita. Como el carbono, el nitrógeno es 30 veces más efectivo que el níquel en la formación de la austenita. Asociado a un bajo contenido en carbono, el nitrógeno permite alcanzar unos límites de elasticidad elevados sin disminuir la resistencia a la corrosión intergranular.
- Niobio: Se añade principalmente para combinar con el carbono para reducir la susceptibilidad a la corrosión intergranular. Actúa como un refinador de grano, favorece la formación de ferrita y mejora la resistencia a la rotura por fluencia.

2.1.2.- CLASIFICACIÓN DE LOS ACEROS INOXIDABLES

Los aceros inoxidable son aleaciones complejas en las que entran en juego múltiples elementos. Su porcentaje y su variación cambian la porción de las fases presentes, lo cual da lugar a distinguir tres grandes familias de aceros inoxidable^{7,8}:

Austeníticos, ferríticos y martensíticos, pero también existen aceros de estructura dúplex, denominados austenoferríticos, en los que la composición está equilibrada para que junto a la austenita exista también una cierta cantidad de ferrita, y además los aceros inoxidable de endurecimiento por precipitación en los que aparecen, junto a la austenita fases de diferente naturaleza responsables del endurecimiento.

En las figuras 2.3 y 2.4 se ilustra la posición de las distintas familias de aceros inoxidable en función por un lado del porcentaje de cromo y níquel y por otro lado en función del porcentaje de cromo y el carbono.

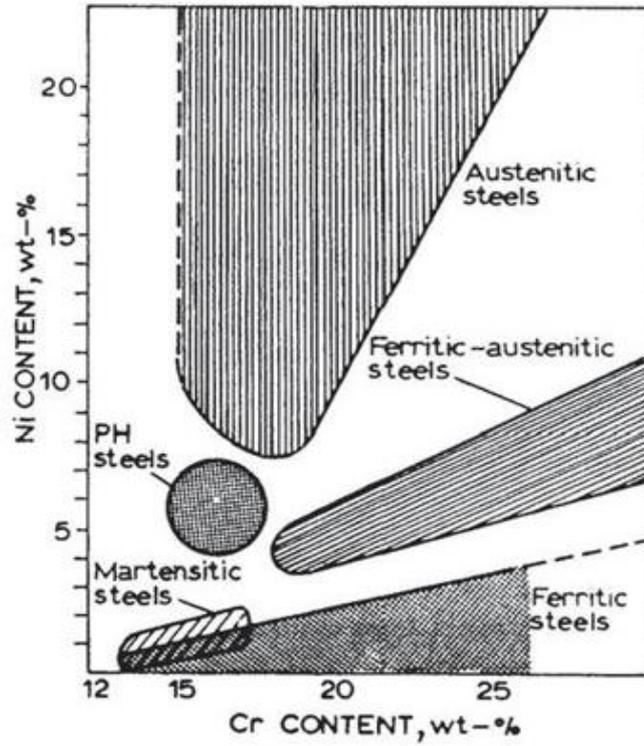


Figura 2.3. Tipos de aceros inoxidable en función del contenido en cromo y níquel

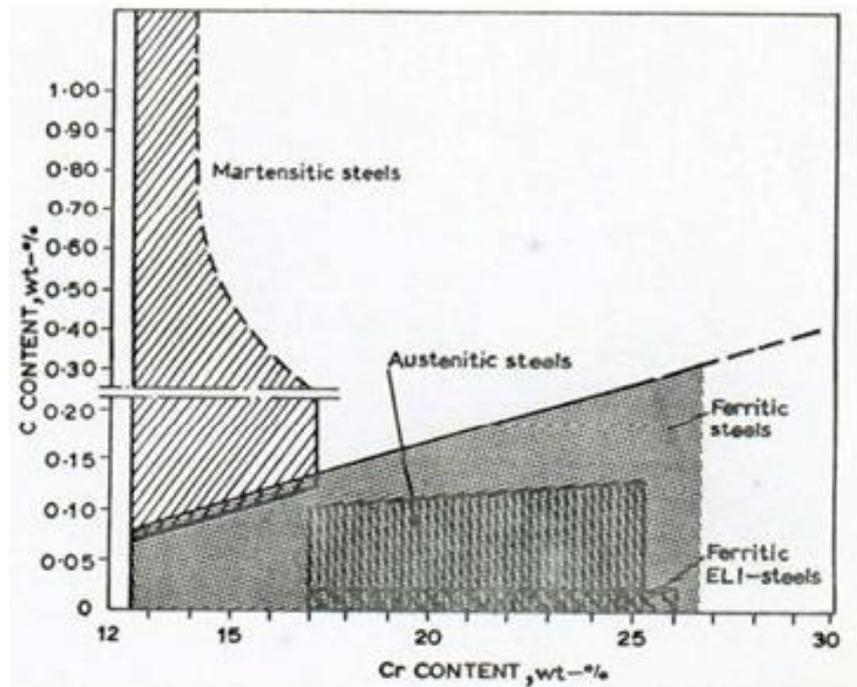


Figura 2.4. Tipos de aceros inoxidable en función del contenido en cromo y molibdeno



Las principales características de las principales familias de aceros inoxidables son:

- **Aceros austeníticos:** Son los usados más ampliamente. Poseen excelentes propiedades a baja temperatura y buena resistencia a altas temperaturas. Sólo pueden ser endurecidos mediante trabajo en frío y son no magnéticos o levemente magnéticos en estado templado. La resistencia a la corrosión es excelente en un amplio rango de ambientes corrosivos. Exhiben una buena soldabilidad y presentan excelentes propiedades de tenacidad y ductilidad. Tienen una estructura cúbica centrada en las caras. La composición química de estos aceros es: contenido en carbono $\leq 0.1\%$, contenido en cromo entre el 16% y el 26%, contenido en níquel entre el 6% y el 27% y contenido en molibdeno menor al 5%. También puede contener otros elementos como Mn, Ti, Si, Nb, Cu, N, W y B.
- **Aceros ferríticos:** No son endurecibles por tratamiento térmico y sólo ligeramente endurecibles por trabajo en frío. Son magnéticos y tienen una buena resistencia a la corrosión en muchos ambientes pero unas propiedades moderadas o mediocres de tenacidad, ductilidad y soldabilidad. Tienen una estructura cúbica centrada en el cuerpo. La composición química de estos aceros es: contenido en carbono entre 0.01% y 0.35%, contenido en cromo entre el 16% y el 30%. También puede contener otros elementos como Mn, Si, Ti y Nb.
- **Aceros martensíticos:** Tienen por lo general buenas propiedades mecánicas y bajo coste. Se pueden endurecer y fortalecer por tratamiento térmico, y endurecerse sólo ligeramente por trabajo en frío. Son fuertemente magnéticos, resisten a la corrosión en ambientes moderados y presentan unas propiedades mediocres de tenacidad, ductilidad, resistencia a la corrosión y soldabilidad. Tienen una estructura hexagonal compacta. La composición química de estos aceros es: contenido en carbono entre 0.1% y 1.4%, contenido en cromo entre el 11% y el 18%. También pueden contener otros elementos como Mn, Si y Ni.
- **Austenítico-ferríticos:** Son aleaciones base hierro con cromo, molibdeno y una cantidad de estabilizadores de la austenita como níquel y nitrógeno para lograr el balance deseado entre las fases ferríticas y austeníticas de donde deriva su denominación dúplex. Tiene la ventaja de poseer una elevada resistencia mecánica alcanzando valores de límite elástico entre 700 y 900 MPa.



2.2.- ACEROS INOXIDABLES AUSTENÍTICOS

Podemos describir los aceros inoxidable austeníticos en términos de aleación de tres componentes, que son hierro, cromo y níquel. Las aleaciones comerciales contendrán entre otros componentes carbono, silicio, manganeso y azufre.

La microestructura de estos aceros consiste básicamente en una única fase de cristales poligonales llamada austenita, siempre y cuando el material haya sido sometido a un tratamiento térmico de solubilización, cuyo objetivo es la eliminación de las heterogeneidades estructurales que se forman debido a los procesos de fabricación.

Estos aceros tienen una estructura cúbica centrada en las caras (FCC), que se forma debido a la presencia abundante de elementos austenitizantes.

Esta estructura cúbica centrada en las caras, proporciona al acero su tenacidad, su ductilidad, reducción de área y una excelente resistencia al impacto, aun trabajando a temperaturas criogénicas. Estos aceros además presentan una excelente soldabilidad.

Estos aceros inoxidable austeníticos presentan una composición química que se basa en el balance entre elementos aleados que promueven la formación de ferrita entre los que están principalmente el cromo, aunque también el molibdeno, niobio, titanio, aluminio, vanadio y wolframio; y elementos aleados que promueven la formación de austenita entre los que se encuentra principalmente el níquel, aunque también el carbono, el nitrógeno y el cobre que promueven la transformación de ferrita a austenita a alta temperatura.

Aunque el manganeso no promueva la transformación de ferrita a austenita a alta temperatura, estabiliza la austenita con respecto a la formación de martensita a bajas temperaturas. El manganeso promueve la solubilidad del nitrógeno en el acero (al igual que el cromo), haciendo posible una familia de aceros inoxidable austeníticos bajos en níquel que son altos en manganeso y nitrógeno.

2.2.1.- PRECIPITACIÓN DE CARBUROS Y FASES INTERMETÁLICAS

El acero de estudio, aun teniendo una resistencia a la corrosión elevada, sigue siendo susceptible de experimentar diversos tipos de corrosión localizada como la corrosión intergranular y la corrosión por picaduras. La precipitación de carburos o sensibilización en los bordes de grano, puede ocurrir cuando los aceros inoxidables austeníticos son calentados durante cierto tiempo en un rango de temperaturas que va de 425° a 870°. El tiempo determina la cantidad de carburo precipitado. Cuando los carburos precipitan en el borde de grano, el área adyacente se vacía de cromo. El carburo formado en los aceros inoxidables austeníticos convencionales es $(Cr Fe)_{23} C_6$ o $M_{23} C_6$. Cuando la precipitación es relativamente continua, el empobrecimiento hace a los aceros inoxidables propensos a la corrosión intergranular, La sensibilización también disminuye la resistencia a otras formas de corrosión tales como la corrosión por picaduras, la corrosión intersticial y la corrosión bajo tensión.

Las curvas tiempo-temperatura de sensibilización son utilizables para mejorar el comportamiento evitando la sensibilización y para ilustrar los efectos del contenido en carbono en estos fenómenos. Estas curvas están generalmente normalizadas y verificadas.

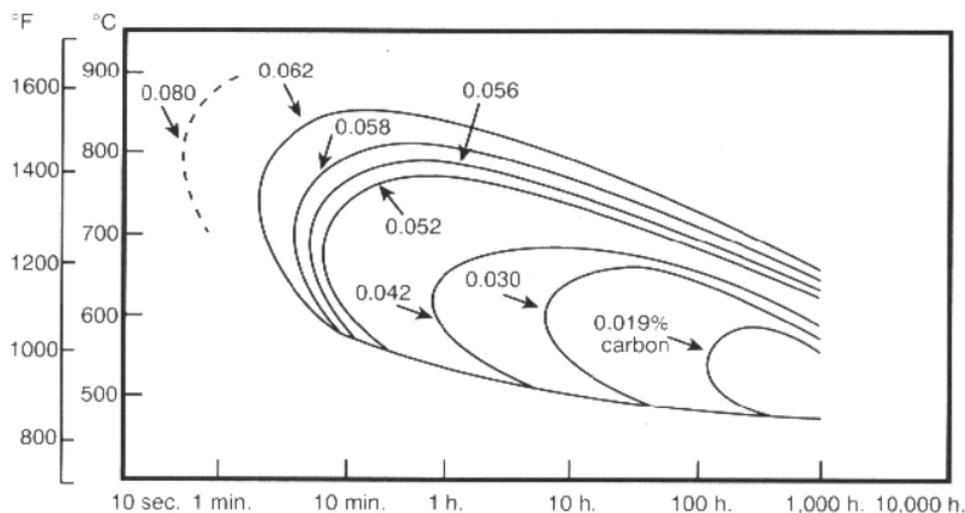


Figura 2.5. Curva tiempo-temperatura de sensibilización

La precipitación de la fase sigma y de otras fases intermetálicas aumenta la propensión a la corrosión y a la fragilización. La fase sigma es rica en cromo y molibdeno que puede hacer a los aceros susceptibles a la corrosión por picaduras, corrosión intergranular y corrosión intersticial. Esto ocurre generalmente en aceros inoxidable de alta aleación (con alto porcentaje de cromo y molibdeno). La fase sigma puede aparecer entre 540°C y 900°C.

2.2.2.- CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

Los aceros inoxidables austeníticos tienen las siguientes características físicas a temperatura ambiente:

- Módulo de elasticidad a tracción y compresión en torno a 200 KN/mm².
- Coeficiente de Poisson entre 0.26 y 0.30.
- Peso específico 8 Kg/dm³.
- Módulo elástico de torsión entre 76 y 78 KN/ mm².
- Calor específico, tiene un valor cercano al de los aceros aleados no inoxidables, 500 J/Kg°K.
- Permeabilidad magnética inferior a 1,02 en estado de recocido. Son amagnéticos en este estado.
- Coeficiente de conductividad térmica muy reducido, comparado al valor de los aceros aleados no inoxidables, entre 12 y 15 W/m°K.
- Coeficiente de dilatación térmica, algo superior comparado a los aceros aleados no inoxidables, entre 16 y 17.10⁻⁶ °K⁻¹.
- Resistividad eléctrica superior a la de los aceros aleados no inoxidables y a la de los inoxidables ferríticos y martensíticos. entre 0.7 y 1 mm² Ω/m

A temperaturas inferiores a la temperatura ambiente, aumenta el peso específico y disminuye la resistividad eléctrica, la conductividad térmica, el coeficiente de dilatación térmica y el calor específico.

A temperaturas muy superiores a la temperatura ambiente disminuye el módulo de elasticidad y el peso específico, y aumenta el coeficiente de dilatación térmica, el calor específico, el coeficiente de conductividad térmica y la resistividad eléctrica. Por lo que podemos ver qué ocurre prácticamente lo contrario a si la temperatura es inferior a la ambiente.

2.2.3.- CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS

El límite de elasticidad de un acero inoxidable austenítico es comparable a otros aceros bajos en carbono. Las mínimas propiedades mecánicas de un acero inoxidable recocido son:

- Límite de elasticidad entre 205 y 275 MPa.
- Esfuerzos a tracción entre 520 y 760 MPa.
- Alargamientos entre el 40% y el 60%.

Los aceros inoxidables austeníticos no pueden ser templados por tratamientos térmicos, pero endurecen rápidamente por deformación plástica en frío. Tienen una alta resistencia si se forman mediante trabajo en frío, especialmente por laminado donde pueden alcanzar una resistencia a tracción de 1200 MPa o incluso mayor.

Los aceros inoxidables austeníticos están sometidos al fenómeno de acritud para alcanzar valores pertinentes de carga de rotura y límite elástico, manteniendo valores relativamente elevados de alargamiento y estricción. El modo de variación de las características en función de la acritud es distinta según la composición del acero austenítico. Generalmente cuanto más estable es la estructura austenítica menor es la variación de las características. La permeabilidad magnética de estos aceros que es normalmente muy baja, próxima a la del vacío (se consideran incluso amagnéticos), tiende a aumentar con el aumento de acritud porque se produce la transformación de austenita en martensita (que si es magnética).

Por tanto:

- Los aceros inoxidables austeníticos, aun careciendo de características mecánicas elevadas, en particular por lo que interesa al límite elástico, ofrecen buenas posibilidades de mejorarlas al ser deformados en frío.
- Las características de tenacidad, manifestadas por los valores de resiliencia, alargamiento y estricción, son muy elevados. En especial tenemos los aceros con nitrógeno lo cuales presentan independientemente de la acritud, valores de resistencia elevados comparado con los tipos tradicionales.
- Las características de resistencia a la fatiga son bastante buenas si se tiene en cuenta el bajo valor de las cargas de límite elástico.
- Algunos aceros inoxidables austeníticos pueden sufrir transformaciones de fase, con aparición de martensita cuando se someten a fatiga. En la resistencia a la fatiga el grado de inestabilidad de la austenita es un factor importante, el cual se puede mejorar o reducir.



A temperaturas inferiores a la ambiente, estos aceros, presentan una disminución constante de resiliencia, en tanto que los ferríticos y martensíticos presentan una zona de transición con una brusca disminución de la resiliencia. Los aceros austeníticos presentan un aumento de sus características de resistencia al bajar la temperatura, disminuyendo el alargamiento y la estricción. Cuando el material ha sido deformado en frío se observan valores proporcionalmente más elevados para la carga de rotura y el límite elástico mientras que los valores del alargamiento y de estricción son por lo general más bajos. La resistencia a la fatiga aumenta tanto en estado solubilizado como en estado puro. En cuanto a la resistencia al choque, los aceros inoxidables austeníticos mantienen características óptimas de resistencia al choque incluso a temperaturas muy bajas.

A temperaturas superiores a la ambiente, presentan buenas características frente a la oxidación para aplicaciones a alta temperatura.

2.3.- EL ACERO INOXIDABLE A-286

El acero A286 es una superaleación base hierro-níquel ampliamente usada en la industria de las turbinas de gas, espacial y nuclear a alta temperatura. La característica principal de este tipo de materiales es que presentan propiedades mecánicas similares en las condiciones de servicio como a su temperatura ambiente, además de una buena resistencia a la corrosión debido a su contenido en cromo. Es un acero inoxidable al cual se le somete a un tratamiento de solubilizado que estabiliza las condiciones iniciales del material y posteriormente a un tratamiento de envejecido, responsable del endurecimiento ⁹⁻¹³.

El comportamiento en la precipitación de las fases γ' y η presentes en el acero A286 es importante para lograr que el mismo tenga unas propiedades óptimas.

Durante el envejecido se produce la precipitación de la fase ordenada FCC γ' $\text{Ni}_3(\text{Al,Ti})$ coherente con la matriz austenítica. Tras largos tiempos de envejecimiento, deja de ser coherente con la matriz y se vuelve inestable transformándose en fase η , perjudicando las propiedades mecánicas del acero. La precipitación se produce mediante el fenómeno de difusión, dependiendo por tanto de la temperatura y el tiempo (inversamente proporcionales). Cuanta mayor sea la temperatura, menor tiempo se requerirá para el precipitado de la fase γ' , por ejemplo. Escogemos la temperatura de 720°C para realizar el tratamiento de envejecido ya que se produce un cambio importante en el comportamiento frente al endurecimiento ¹⁴.

En la microestructura del acero tras el tratamiento podremos observar zonas libres de fase γ ´ alrededor de la fase η , lo que confirma que esta se forma a expensas de la fase γ ´. La formación de finos bloques de fase η en los bordes de grano mejora considerablemente las propiedades de la aleación a altas temperaturas. El problema surge en que se deteriora el comportamiento de la aleación en aplicaciones a temperatura ambiente.

En estos aceros inoxidables austeníticos de endurecimiento por precipitación, la temperatura de inicio de la martensita es tan baja que no pueden transformarse en ella. El contenido en níquel es suficientemente alto para estabilizar completamente la austenita a temperatura ambiente.

La naturaleza altamente estable de la matriz austenítica elimina todos los problemas potenciales relacionados con la fragilización, incluso a temperaturas extremadamente bajas.

Al igual que todos los aceros inoxidables endurecibles por precipitación, la resistencia del A-286 (AISI 600) se puede aumentar trabajándolo en frío antes del envejecimiento.

Como hemos dicho, utilizamos un acero inoxidable austenítico tipo A-286, cuya composición de fábrica es la que se muestra en la siguiente tabla:

COMPOSICIÓN A-286 (%PESO)						
%C	%Cr	%Ni	%Ti	%Mn	%Mo	%Si
0.032	14.98	24.74	2.30	1.24	1.18	0.50
%V	%Al	%B	%P	%S	%Fe	
0.29	0.16	0.0046	0.011	0.0003	RESTO	

Tabla 2.6. Composición en porcentaje en peso del acero inoxidable A-286

Como observamos es un acero formado principalmente por hierro, cromo y níquel, al que añadimos ciertos elementos que le confieren determinadas características que ya se han descrito anteriormente.

3-ENDURECIMIENTO POR PRECIPITACIÓN

El endurecimiento por precipitación es el tratamiento más importante para realzar las propiedades mecánicas en los aceros no ferríticos en estado sólido. También tiene un interés muy especial en el aluminio ¹⁵.

Este proceso es utilizado en diferentes sectores de la industria tales como:

- Industria aeronáutica: Se utiliza en los remaches de aluminio aleado. Después de ser remachados, tendrá lugar el envejecimiento a temperatura ambiente, que dará como resultado un incremento en la resistencia y la dureza.
- Fabricación de motores de aviones
- Aceros para la industria aeroespacial debido a su peso y resistencia a la corrosión, para utilizarlos en álabes de turbinas.
- Ejes, paletas, conos de cola y dispositivos de postcombustión de industria gaseosas que empleen motores con turbinas.
- Equipos de procesamiento de alimentos y textil.
- Fabricación de intercambiadores de calor y calentadores de aire.
- Aplicaciones que requieran alta resistencia a la corrosión a altas temperaturas con un alto límite elástico.

Los aceros inoxidable endurecibles por precipitación o PH (precipitation hardening) son aleaciones de hierro, cromo y níquel que se caracterizan por la resistencia obtenida a partir del endurecimiento por tratamiento térmico de envejecimiento.

Estos aceros pueden ser martensíticos, austeníticos o intermedios entre ambos, dependiendo de la proporción Cr/Ni. Lo que realmente distingue a estos aceros es la adición de determinados elementos tales como Al, Ti, Mo y Cu, que dan lugar a la aparición de compuestos intermetálicos de manera controlada. Así, el endurecimiento por medio de estos compuestos se debe realizar por precipitación desde una matriz martensítica. Para ello se somete al material a un tratamiento de solubilización a una temperatura de unos 1050°C con posterior enfriamiento al aire, dando lugar a una matriz martensítica sobresaturada. A continuación, se envejece el acero a una temperatura comprendida entre 455 y 565°C, que da lugar a la precipitación de los compuestos intermetálicos endurecedores.



El principal objetivo de este tipo de tratamiento es obtener aceros de alta aleación con los que alcanzar durezas y resistencias elevadas. Con estos nuevos aceros obtendremos unas prestaciones mecánicas mucho mayores que con los tratamientos tradicionales, acompañado de una aceptable tenacidad.

El límite elástico de los aceros inoxidables PH está comprendido entre 515 MPa y 1415 MPa, y la resistencia mecánica entre 860 MPa y 1520 MPa. Cuando son trabajados en frío antes de ser sometidos a tratamientos de envejecimiento, se consiguen aún mayores resistencias.

3.1.- CONDICIONES PARA PRODUCIR EL ENDURECIMIENTO POR PRECIPITACIÓN

La característica común de todas las aleaciones tratadas por endurecimiento es que se produce por la precipitación de partículas submicroscópicas cuyo tamaño es del orden de 5×10^{-5} mm que se forman en la última fase del tratamiento y aparecen incrustadas en la matriz o solución sólida de la aleación, siendo este fenómeno de precipitación el que ha servido para dar el nombre de este proceso.

Para que todo esto suceda se tienen que cumplir las siguientes condiciones:

- Que las dos fases sólidas sean solubles una en otra en un amplio rango de temperaturas y que disminuya la solubilidad de una de ellas en la otra al disminuir la temperatura.
- Elección de una composición adecuada. Deben señalarse límites muy precisos en los contenidos de diversos elementos.
- El tamaño crítico de las partículas precipitadas debe de ser el adecuado. Durante el proceso de precipitado, estas partículas pueden variar y podríamos obtener resultados diferentes a los esperados por lo que debemos hacer un estudio previo del tamaño con el que se consiguen mayores propiedades mecánicas. Generalmente la máxima dureza se consigue con partículas cuyo tamaño es del orden de 5×10^{-5} , las cuales no son observables con microscopios ópticos.

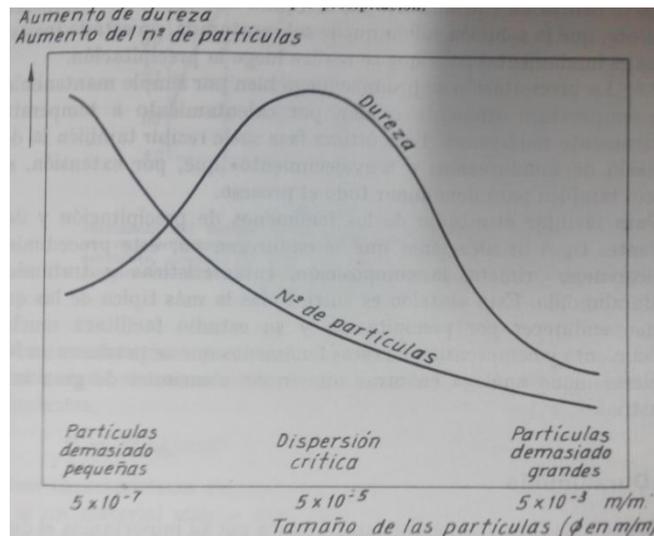


Figura 3.1. Influencia del tamaño y del número de partículas sobre la dureza

Si se cumplen estas tres condiciones, las partículas que precipitan, pueden impedir el deslizamiento (el movimiento de las dislocaciones) que tiende a producirse entre los planos cristalinos de las aleaciones al ser sometidas a fuertes sollicitaciones, y por tanto, aumenta la resistencia a tracción.

3.2.- INFLUENCIA DEL TIEMPO DE ENVEJECIMIENTO

3.2.1.- INFLUENCIA EN LA MICROESTRUCTURA

Con el fin de que se forme un precipitado a partir de una matriz sólida, deben ocurrir los procesos de nucleación y crecimiento. El intercambio total de energía libre requerida para la nucleación de un precipitado sólido esférico a partir de la matriz es de vital importancia.

El precipitado no ocupa el mismo volumen que la matriz por lo que es deformado, y por tanto, se requiere de energía adicional para adecuar el precipitado en la matriz.

Nucleación: Ocurre más fácilmente sobre superficies ya presentes en la estructura, ya que se minimiza el término asociado con la energía superficial. Por tanto el precipitado se nuclea con más facilidad en los bordes de grano y en otros defectos de la red.

Crecimiento: Ocurre mediante una difusión de largo alcance y redistribución de los átomos. Los átomos durante la difusión deben cambiar sus posiciones originales tras moverse hacia el núcleo a través del material que los rodea e incorporarse en la estructura del precipitado. En algunos casos, estos átomos en difusión estarán fuertemente unidos dentro de una fase y por tanto el proceso de desprendimiento limitará la velocidad de crecimiento. En otros casos la fijación de los átomos en difusión hacia el precipitado en razón de la deformación de la red, limita el crecimiento. Este resultado a veces lleva a la formación de precipitados que tienen



una relación especial con la estructura de la matriz, minimizando la deformación. En la mayor parte de los casos el factor que controla el proceso es la difusión.

Durante este tratamiento es posible que aparezcan en la matriz de las aleaciones un cierto porcentaje de partículas submicroscópicas las cuales serán solubles en la fase principal a altas temperaturas y no lo son a otras temperaturas.

Si se realizan tratamientos térmicos de forma que primero se realice una solubilización a alta temperatura seguida de un enfriamiento rápido con permanencia a temperatura ambiente o a temperaturas un poco más altas, es posible un control muy aceptable del tamaño y número de partículas que precipitan y también de las propiedades mecánicas de estos materiales.

3.2.2.- INFLUENCIA EN LA RESISTENCIA MECÁNICA Y LA DUREZA

A medida que se incrementa el tiempo de envejecimiento, se van formando las zonas de precipitación y su tamaño se incrementa; además, la aleación se hace más fuerte, y menos dúctil.

Estas propiedades mecánicas alcanzan un valor máximo durante la precipitación a una temperatura dada y, después, disminuyen gradualmente como consecuencia del sobre-envejecimiento. Este ablandamiento es consecuencia natural de la aproximación de la aleación al estado de equilibrio, al aumentar el tiempo durante el que la aleación se mantiene a esa temperatura. Estas propiedades mecánicas tan elevadas aparecen debido a que las partículas que precipitan pueden impedir, en determinadas ocasiones el deslizamiento que tiende a producirse entre los planos cristalinos de las aleaciones al ser sometidas a la acción de fuertes sollicitaciones. De esta forma se obtienen resistencias a la tracción muy elevadas. Dichas partículas actúan como clavijas o cuñas que fijan los cristales y son necesarias cargas muy importantes para producir el deslizamiento de los planos atómicos principales. Se puede decir que estas partículas bloquean las dislocaciones por lo tanto aumentara su resistencia mecánica y su dureza^{16, 17}.

Por tanto, una aleación muy sobre-envejecida sería esencialmente idéntica a una aleación recocida, es decir, una aleación en la que la estructura de equilibrio se produce por medio de un enfriamiento lento desde la temperatura del tratamiento de solución.

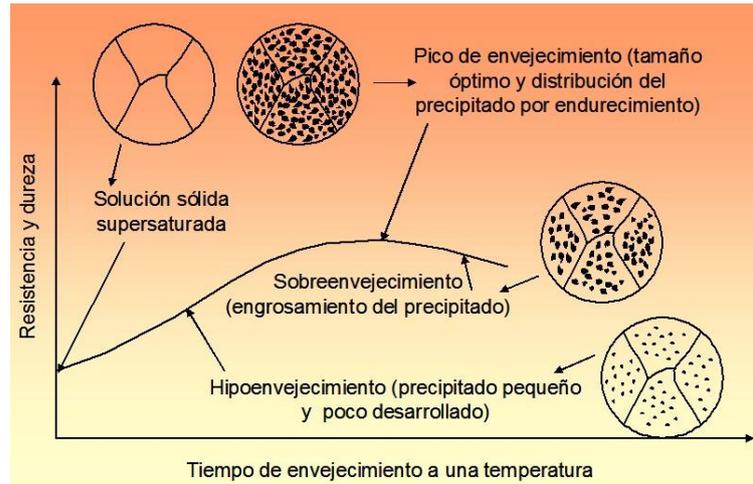


Figura 3.2. Curva esquemática a una temperatura para una aleación endurecible por precipitación

En referencia a la figura 3.1, una aleación endurecible por precipitación en la condición de solución sólida sobresaturada se encuentra en un estado de alta energía, se trataría del estado inicial. Este estado de energía es relativamente inestable y la aleación tiende a buscar un estado de menor energía por la descomposición espontánea de la solución sólida sobresaturada en fases metaestables o fases de equilibrio. Cuando la solución sólida sobresaturada de la aleación endurecida por precipitación se envejece a una temperatura relativamente baja, para la que solo se dispone una pequeña cantidad de energía de activación, se forman agrupación de átomos segregados llamadas zonas de precipitación.

El nivel energético superior es para la solución sólida sobresaturada, y el nivel inferior para el precipitado en equilibrio. La aleación puede ir espontáneamente de un nivel energético superior a uno inferior si hay suficiente energía de activación para la transformación y si las condiciones cinéticas son favorables¹⁸.



Figura 3.3. Niveles energéticos en función del precipitado de la solución sólida saturada



3.2.3.- INFLUENCIA EN LA CORROSIÓN

El acero objeto de estudio es un acero A286 que contiene níquel, molibdeno y cromo. El níquel es estabilizador de la austenita y hace que crezca en tamaño, eliminando gran parte de la ferrita y por tanto dando como resultado buenas propiedades frente a la corrosión.

A medida que se va realizando el tratamiento de endurecimiento por precipitación, los granos de material crecen y esto afectará a las propiedades mecánicas del acero en función de la temperatura a la que se realice. Al existir menor cantidad de bordes de grano, que es la zona potencialmente más inestable, aseguramos que la corrosión es menor.

Los elementos precipitados a determinadas temperaturas podrán reforzar o perjudicar esta protección a la corrosión en función del tamaño y cantidad en la que precipiten.

Debido a su gran presencia, el níquel será el elemento más importante para evitar la corrosión pero el resto de inclusiones también tendrá importancia:

- Cromo: Favorece el endurecimiento y mejora la resistencia al desgaste y a la corrosión. En caso de que el metal se oxide se produce una capa de óxido de cromo que si en algún momento llegase a eliminarse, se volvería a formar debido a la combinación de cromo y oxígeno.
- Manganeso: Es un elemento fundamental y básico en todos los aceros comerciales. Actúa como desoxidante y neutraliza los efectos nocivos del azufre, facilitando la laminación, le moldeo y otras técnicas de trabajo en caliente. Aumenta la penetración que se produce tras un posible temple e interviene y contribuye en su resistencia y su dureza.
- Aluminio: Aunque está presente en pequeñas cantidades, actúa como desoxidante para el acero fundido e interviene en la formación de la fase y responsable del endurecimiento.
- Titanio: Se emplea como desoxidante e inhibe el crecimiento granular. Aumenta la resistencia a altas temperaturas. También interviene en la formación de la fase y responsable del endurecimiento.
- Molibdeno: Mediante el aumento de la penetración del temple, mejora las propiedades del tratamiento térmico. Aumenta también la resistencia a altas temperaturas y la dureza.



Como podemos observar todos los elementos de aleación tienen efectos anticorrosivos. La complejidad de del tratamiento será encontrar la temperatura y el tiempo correcto en el cual entren en comunión el número correcto de elementos de aleación así como el tamaño de grano de austenita óptimo.



4.-DESARROLLO EXPERIMENTOS

4.1.- TRATAMIENTO TÉRMICO

Antes de proceder a la preparación metalográfica, se realizará el tratamiento térmico de las soldaduras de acero A-286 que son objeto de estudio. El tratamiento térmico se realizará a 720°C de temperatura.

Para ello utilizaremos un horno que puede alcanzar una temperatura de 1200 °C. Será un proceso que requerirá tiempo y cuidado debido a las altas temperaturas del horno.



Imagen 4.1. Horno utilizado para el tratamiento térmico

Vamos a realizar el tratamiento térmico en 12 muestras. 6 se van a ensayar mediante ensayos macro, y otras 6 someterán a ensayos de tracción. Por tanto, se precalienta el horno a 720°C de temperatura y se introducen las probetas en el mismo mediante unas pinzas y utilizando unos guantes que protejan de las altas temperaturas. Todo esto se realizará con precaución y lo más rápido posible para que la temperatura del horno disminuya lo menos posible. La siguiente tabla muestra para cada probeta, el tiempo que ha estado en el horno y la intensidad utilizada en la ejecución de la soldadura de los puntos que se van a usar en la metalografía y ensayos de corrosión

Tiempo tratamiento endurecimiento	Intensidad punto	Intensidad probeta de tracción
30 min	6,18	6,03
10h	6,16	5,9
25h	6,29	6,03
50h	6,16	6,03
100h	6,16	5,9
200h	6,16	6,03

Tabla 4.2. Intensidad soldadura-tiempo envejecimiento de cada punto

4.2.- PREPARACIÓN METALGRÁFICA

Para comenzar a realizar el estudio, se disponen de 6 muestras soldadas mediante puntos a la que se le realizamos una serie de cortes.

4.2.1.- CORTE

Se va a realizar un corte de las placas de material a lo largo del punto, en dirección longitudinal al mismo, mediante una tronzadora de precisión (Figura 4.3). Si en el proceso de corte se producen rebabas, se realizará un desbaste para eliminarlas.



Imagen 4.3. Tronzadora de precisión

4.2.2.- EMPASTILLADO

Para realizar el empastillado, se utilizará una máquina de empastillado como la que aparece en la imagen 4.4.

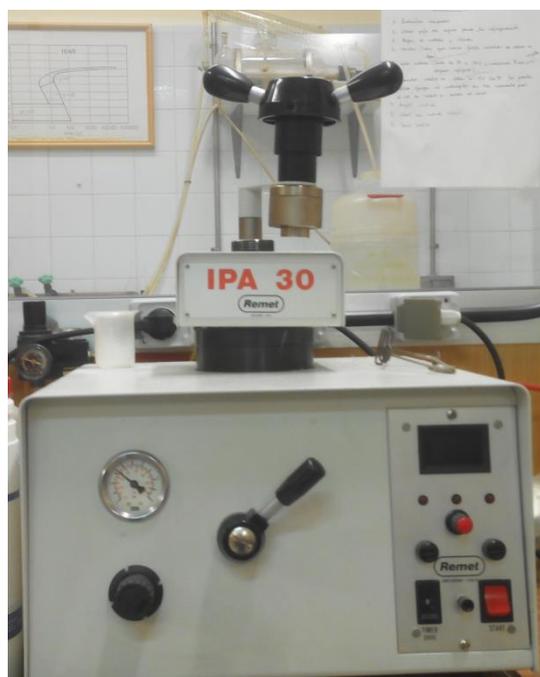


Imagen 4.4. Máquina de empastillado



Los pasos a seguir para el empastillado, son los siguientes:

1.- Conexión de la máquina de empastillado al compresor, el cual proporciona el aire comprimido necesario para subir y bajar la prensa de la máquina de empastillado. Abrir el grifo de agua que está conectado a la prensa, para que esta pueda refrigerar, ya que la misma alcanza temperaturas elevadas.

2.- Colocación de la pieza cortada en la prensa con la cara de estudio, en mi caso con el punto, hacia abajo, para que quede visible una vez se haya realizado la polimerización.

3.- Bajada de la prensa

4.- Vertido del metacrilato y colocación de la etiqueta identificativa de la probeta que corresponda, la cual, se tapa un poco para que no quede al descubierto una vez haya polimerizado el metacrilato.

5.- Se cierra la prensa y se sube el émbolo de la misma.

6.- Una vez la máquina alcance los 167°C de temperatura, la máquina se mantendrá unos 8 minutos a esta temperatura hasta que el metacrilato polimerice, y una vez pasado este tiempo, comenzará a refrigerar. Acabado el proceso de refrigeración, se apaga la máquina de empastillado, baja el émbolo, se abre la prensa y se sube de nuevo el émbolo, siempre con cuidado en el proceso debido a la elevada temperatura a la que ha estado sometida la prensa.

4.2.3.- ROSCADO

Para la realización del roscado, se utilizarán dos máquinas principalmente, las cuales son la lija y el taladro de mesa. Se realizará el proceso de roscado en 4 etapas, las cuales son:

1.- Se realiza una cara plana con la lijadora en la probeta y se redondean los bordes para evitar las aristas vivas de la probeta.

2.- A continuación se realiza un agujero de forma progresiva con la taladradora hasta que la broca ($\varnothing 2.25\text{mm}$) toque el metal. Se realiza de forma progresiva para que el metacrilato no polimerice debido a las altas temperaturas que se alcanzan durante el proceso. Se irá limpiando los restos de metacrilato durante el proceso para evitar lo anterior.



Imagen 4.5. Taladradora de mesa

3.- Se realiza una rosa utilizando 3 tipos de machos de roscar (M3) de manera consecutiva.



Imagen 4.6. Machos de roscar

4.- Por último, se comprobará la existencia de contacto eléctrico mediante una varilla y un polímetro, ya que es necesario para poder realizar los posteriores ataques corrosivos.

4.2.4.- DESBASTE Y PULIDO

Para conseguir una visión óptima, es necesario que la superficie del material refleje especularmente la luz, sin la presencia de discontinuidades como pueden ser diferentes planos en la pieza de estudio. Para ello se utilizará una serie de paños de lija con diferentes granos que se acoplan en una pulidora.



Imagen 4.7. Pulidora de discos intercambiables

Las primeras etapas de desbaste (4 en total) se realizarán con papel de lija de carburo de silicio e irán refrigerados con agua, ya que tienen el tamaño de grano más basto.

En las etapas de pulido se usa como abrasivo diamante de granulometría y refrigerante azul y rosa respectivamente.



Imagen 4.8. Spray de diamante

Una vez realicemos todos estos pasos y con este estado superficial se da por finalizada la preparación metalográfica (igual para todas las probetas). Se pasa por tanto a realizar el ensayo de corrosión.

4.3.- ENSAYO DE CIZALLADURA

El ensayo de cizalladura no es más que un ensayo de tracción, que es un tipo de ensayo mecánico a partir del cual se van a obtener las propiedades mecánicas del material objeto de estudio tales como la resistencia a tracción, el alargamiento de rotura y el límite de proporcionalidad.

Durante el ensayo se seguirá la norma referente a los ensayos de tracción (UNE-EN ISO 6892-120101) y mediremos únicamente la resistencia a tracción [MPa] que es la máxima tensión que la probeta resiste antes de que se produzca la rotura, dividido entre su sección.

Para la realización del ensayo, insertaremos la probeta en la máquina de tracción de tal forma que quede siempre perpendicular y bien fijada a las mordazas para poder empezar el ensayo de forma correcta.



Imagen 4.9. Máquina para ensayos de tracción

A continuación definiremos los puntos más críticos del ensayo:

- Comenzamos el ensayo aplicando una carga creciente de tracción de tal forma que la gráfica discurre en línea recta siempre dentro del límite de proporcionalidad del acero ,punto A
- Pasado el punto A y hasta llegar al punto B los alargamientos producidos crecen de una manera más rápida con la tensión pero se sigue comportando de manera elástica todavía. El punto B marca el límite de este comportamiento y por ello se le llama límite elástico
- Tras pasado el punto B el material pasa a comportarse de manera plástica, es decir, que no recupera su longitud inicial ,quedaron una deformación que permanecerá de forma remanente al cesar la carga
- Si se sigue aplicando la carga llegamos a un punto en la gráfica denominado como C ,donde a partir de aquí y hasta el punto D, las deformaciones crecen de una manera rápida mientras que la carga fluctúa entre dos valores llamados límite de fluencia, inferior y superior. Es característico de los aceros dúctiles, no apareciendo en los endurecidos.
- Más allá del punto D es necesario seguir aumentando la carga para conseguir un aumento pronunciado de su alargamiento. Entramos ya en la zona de grandes deformaciones plásticas hasta alcanzar el punto (E). En dicha zona alcanzaremos el valor máximo de resistencia.
- A partir del punto F se produce la estricción de la probeta y su consecuente rotura.

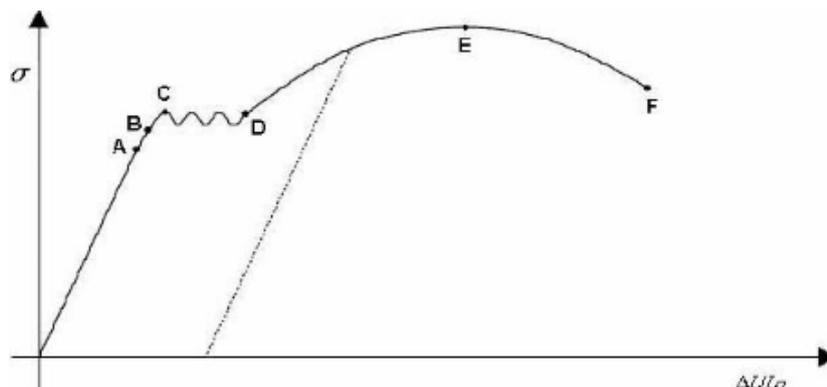


Gráfico 4.10. Gráfica Tensión - Deformación con Puntos Críticos

4.4.- ENSAYO DE CORROSIÓN POR PICADURAS

Se define como ensayo de corrosión la realización de experimentos de laboratorio que nos permiten simular ambientes corrosivos, con el fin de establecer estimación que permitan determinar la resistencia de los materiales bajo dichas condiciones.

El ensayo de corrosión por picaduras que se va a utilizar es el Ensayo de Polarización Anódica.

4.4.1.- COMPONENTES DEL ENSAYO DE CORROSIÓN POR PICADURAS

A continuación se describen cada uno de los componentes del montaje:

- Matraz de cinco bocas: Depósito de vidrio que contiene el electrolito y el resto de elementos que configuran la pila que se usa durante el ensayo de corrosión. Estos son el electrodo de referencia (electrodo de calomelanos), los electrodos de grafito y la entrada de nitrógeno.

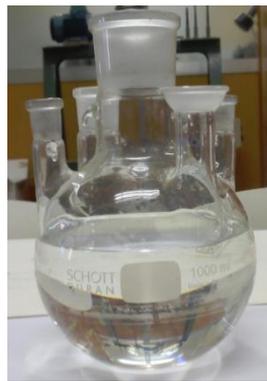


Imagen 4.11. Matraz de cinco bocas

- Electrodo de grafito: Se usan dos para que la distribución de iones en el electrolito sea más homogénea. Serán los cátodos de nuestra pila.



Imagen 4.12. Varillas de Grafito

- Probeta con varilla roscada: Actuará de ánodo en el montaje. Contiene el material a ensayar unido a una varilla roscada de latón que nos permite establecer contacto eléctrico con el cátodo. Como puede observarse en la figura adjunta, en el montaje se utiliza una junta de silicona para asegurar la estanqueidad de la unión.



Imagen 4.13. Varilla roscada para acoplar la probeta

- Potenciostato: Propociona el potencial necesario para realizar el ensayo de corrosión.



Imagen 4.14. Potenciostato

- Baño de agua destilada: Lugar donde sumergiremos el matraz de cinco bocas. Nos permitirá fijar una temperatura normalizada de 30°C durante el ensayo como establece la norma.



Imagen 4.15. Baño de Agua Destilada

- Termostato: Dispositivo cuya función será calentar el agua de la pila donde se sumerge el matraz.



Imagen 4.16. Termostato

- Agitador magnético: Tendrá la función de mantener en continuo movimiento el electrolito dentro del matraz. Dentro del matraz habrá un agitador.



Imagen 4.17. Magneto agitador

- Bombona de nitrógeno: Ayudara a la simulación de nuestro ensayo expulsando el oxígeno que hay en el electrolito (según norma ASTM G5-87).



Imagen 4.18. Bombona de Nitrógeno

- Electrodo de referencia: Relleno de KCl saturado con cristales, nos ayudará a leer la diferencia de potencial entre el ánodo y el cátodo de nuestra pila.



Imagen 4.19. Electrodo de Calomelanos

- Puente salino curvado: Relleno de una solución de KCl sobresaturada sin cristales. En su extremo colocamos lo que denominamos punta vikors.



Imagen 4.20. Puente salino

4.4.2.- MONTAJE DEL ENSAYO DE CORROSIÓN POR PICADURAS

Los pasos a seguir serán:

1. Encenderemos el calentador para que el baño vaya alcanzando una temperatura de 30°C.
2. A continuación deberemos asegurarnos de tener la probeta correctamente pulida, lo que implica haber pasado por completo todos los paños de diferentes rugosidades de tal forma que eliminemos todo tipo de suciedad y consigamos una superficie limpia.
3. Una vez pulida la probeta, la roscaremos en la probeta con varilla roscada de tal forma que la goma que está en contacto con la varilla y la probeta no permita el paso de líquido alguno, es decir, que haya estanqueidad. Será muy importante hacer una comprobación con el polímetro para comprobar que hay tránsito de intensidad entre la probeta y la varilla.
4. Colocaremos cada componente en el matraz de cuatro bocas tal y como se indica:



Imagen 4.21. Matraz de cuatro bocas (planta)

Boquilla 1: En esta abertura ira colocada la varilla roscada con la respectiva probeta que vamos a someter a estudio. Deberá estar inmersa totalmente en el electrolito y la cara de estudio orientada hacia el electrodo de referencia. Actuará como ánodo de nuestra pila.

Boquilla 2 y 3: En estos orificios irán insertados los electrodos de grafito. Colocaremos dos para mejorar la homogeneidad de la corriente en la pila. Actuaran como cátodos de nuestra pila

Boquilla 4: En esta abertura estará situada la toma de nitrógeno. Deberá suministrar una cantidad constante y no excesiva.

Boquilla 5: Aquí estará situado el montaje formado entre el puente salino y el electrodo de calomelanos. Este electrodo se utilizara para leer la diferencia de potencial entre las barras de grafito y nuestra probeta. Fijamos el puente salino mediante una pinza

5. Por último conectaremos el potencióstato a cada componente de la siguiente manera.



Imagen 4.22. Conectores potencióstato

RE1- Referencia 1

CE: Contraelectrodo

RE2- Referencia 2

WE: Electrodo de trabajo

Las varillas de grafito irán unidas entre sí.

RE2 y WE se conectarán a la probeta con la varilla roscada.

CE se conectará a una de las dos varillas de grafito.

RE1 estará conectado al electrodo de calomelanos.

6. Encenderemos el potencióstato y asignaremos en nuestro pc el set up correspondiente a nuestro ensayo que contiene las condiciones en las que se va a realizar el acondicionamiento previo de la muestra y el barrido posterior.

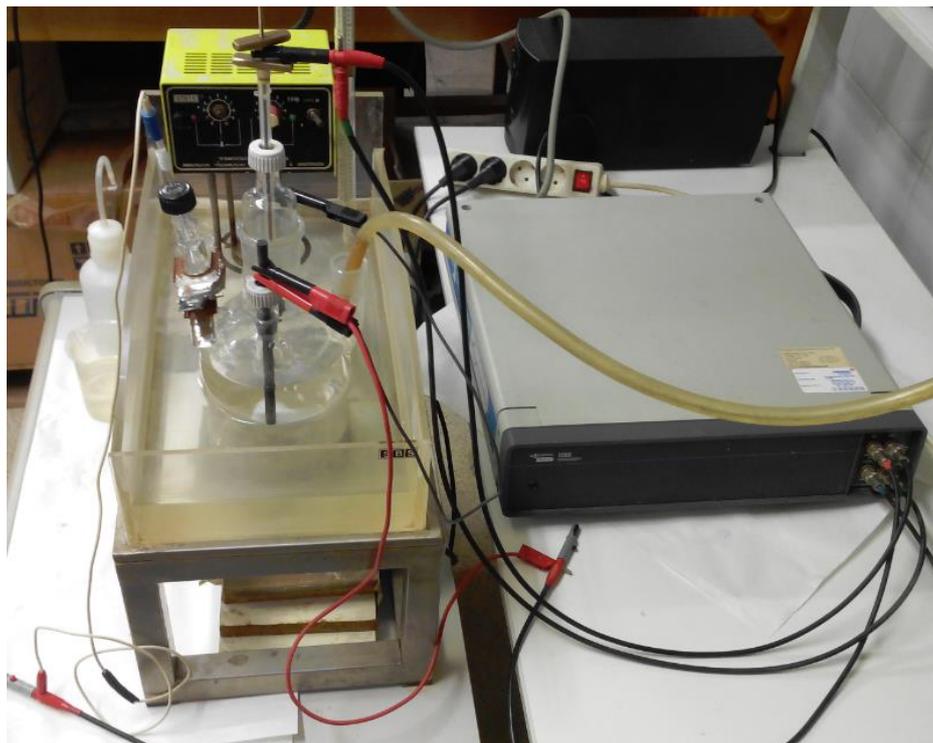


Imagen 4.23. Montaje para ensayos de corrosión

Una vez realizado todo el montaje, estamos en posición de realizar el ensayo.



4.4.3.- EJECUCIÓN DEL ENSAYO

El ensayo se realiza en el ordenador y mediante el software CorrWare.

Antes de realizar el ensayo hay que hacer un acondicionamiento previo mediante las siguientes etapas:

- Etapa 1: Tiene una duración de 5 minutos con objeto de conseguir un valor estable del potencial de corrosión, para ello esta etapa se realiza a potencial de circuito abierto.
- Etapa 2: Acondicionamiento electroquímico, mediante un electropulido a $E=-0,22$ durante 120 segundos para hacer un barrido de limpieza.
- Etapa 3: Con una duración de 2 minutos a potencial de circuito abierto, con objeto de conseguir la estabilización del potencial de corrosión.
- Etapa 4: Acondicionamiento electroquímico, mediante un electropulido a $E=-0,60$ durante 120 segundos para hacer un barrido de limpieza.
- Etapa 5: Con una duración de 5 minutos a potencial de circuito abierto, con objeto de conseguir la estabilización del potencial de corrosión.
- Etapa 6: Barrido final, que comienza a $-0,05$ voltios por debajo del potencial de circuito abierto. Esta etapa dura algo más de 30 minutos.

Durante el ensayo se registra el potencial frente al logaritmo de I (densidad de corriente).

Tras la finalización del ensayo se guarda el archivo correspondiente.

Utilizaremos para su visualización el software CorrView y antes de coger valores, pasamos un filtro sin distorsionar la curva, para así eliminar picos de corriente que se puedan haber producido durante el ensayo. Además introducimos el área del acero correspondiente a la probeta que estamos ensayando.

Además para comparar los resultados obtenidos se realizan fotos sobre las probetas en el microscopio para verificar las conclusiones deducidas del ensayo.

Si queremos comparar fotos, hay que tener en cuenta que estén al mismo número de aumentos. Con pocos aumentos veremos mucha zona de material y nos podremos hacer una idea global. En cambio, a más aumentos veremos si las picaduras van asociadas a algún otro aspecto de la microestructura.

4.4.4.- ENSAYO DE POLARIZACIÓN ANÓDICA

Nuestro objetivo es determinar el comportamiento del material frente a la corrosión por picaduras y para ello utilizaremos en ensayo de polarización anódica con el que obtendremos una curva que nos dará información acerca de este comportamiento¹⁹.

En nuestro ensayo, usaremos como electrolito una disolución que contendrá (según norma ASTM G5-87):

- 146 g de NaCl
- 133.15 ml de H₂SO₄
- Agua destilada

Los datos que recogemos en el ensayo para el análisis aparecen en la figura 4.24 y son los siguientes:

- 1.- Intensidad máxima
- 2.- Potencial de pasivación
- 3.- Potencial de picadura

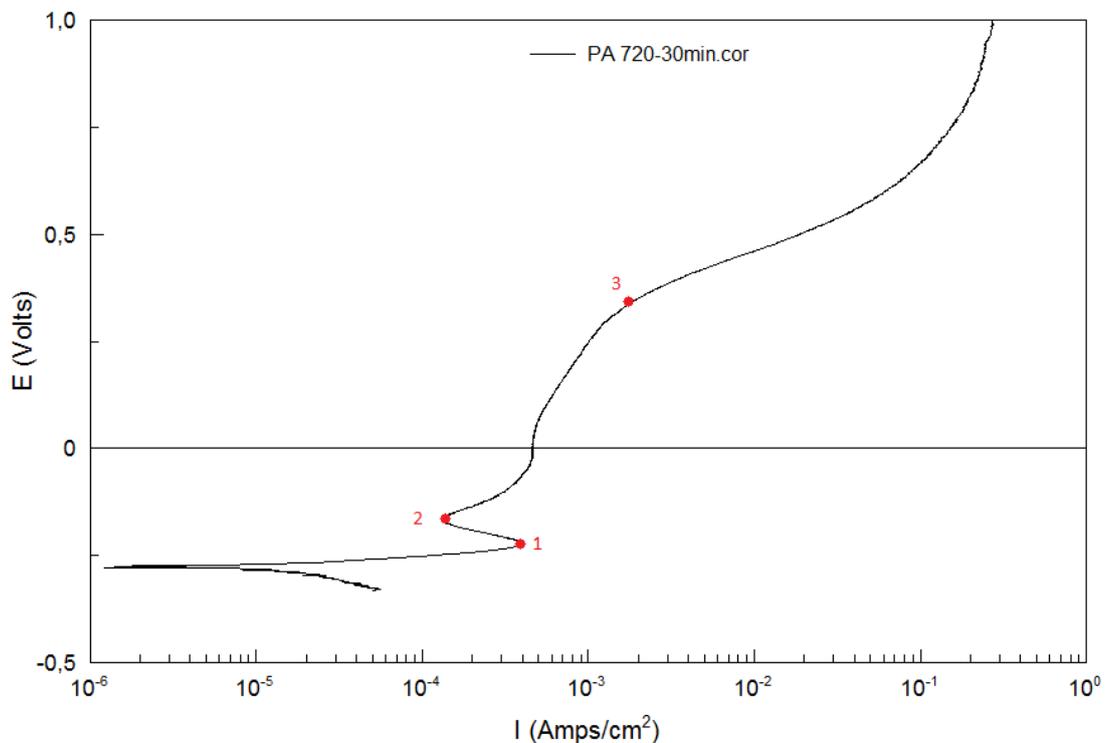


Imagen 4.24. Puntos de interés en un ensayo de polarización anódica



En este tipo de ensayo, la corrosión comienza a partir de un determinado potencial, el cual llamaremos potencial de picadura, potencial en el cual la densidad de corriente se incrementa después de una zona pasiva. Por encima de este potencial, las picaduras nuclean y se propagan.

La diferencia entre el potencial de picadura y el potencial de pasivación determinará la facilidad con la que el material en medio acuoso tenderá a formar picaduras.



5.-RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Una vez explicado el desarrollo experimental procederé a disponer los resultados de los ensayos de manera esquemática para poder evaluarlos y sacar conclusiones.

5.1.- RESULTADOS DEL ENSAYO DE CIZALLADURA

Los ensayos de cizalladura se realizan a una velocidad de avance de la máquina de ensayos de 2mm/min. La probeta está normalizada, y se obtiene al soldar por resistencia chapa de 1 mm de espesor.

Todas las probetas rompen por la ZAT (zona afectada térmicamente) y de manera frágil como podemos observar en las figuras adjuntas. El tratamiento de endurecimiento por deformación, por tanto, no influye por tanto en el tipo de rotura que se produce como se muestra en la imagen 5.1.

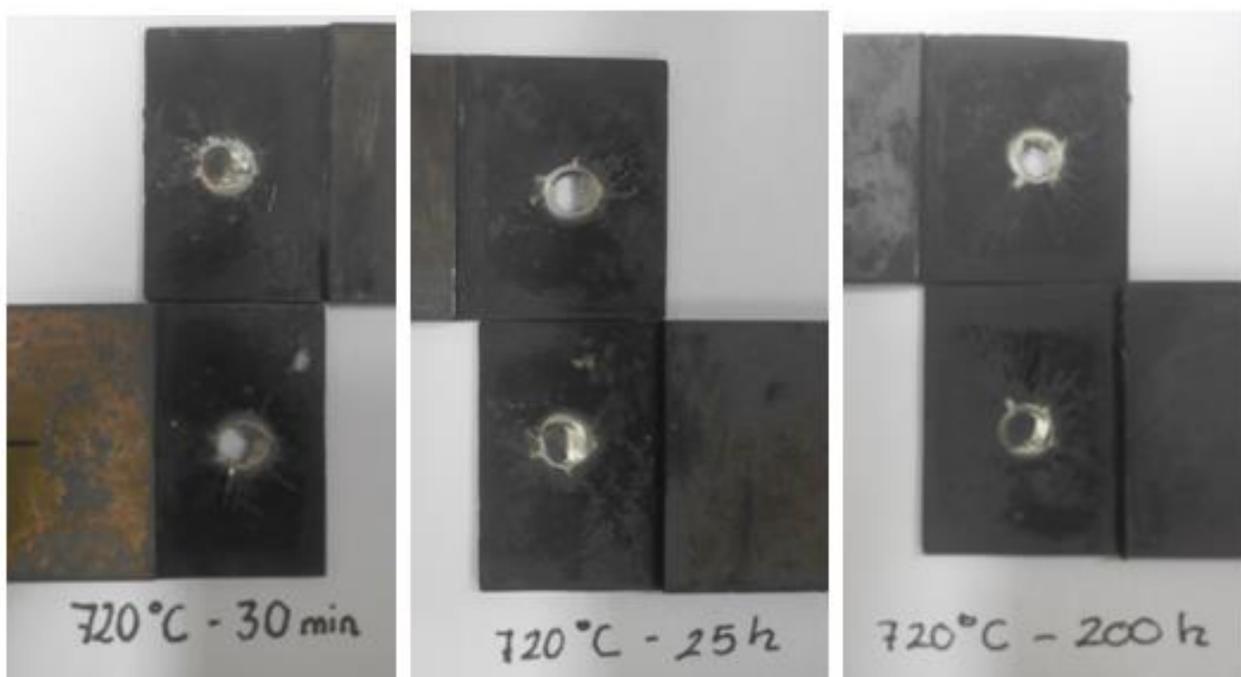


Imagen 5.1. Aspecto de las probetas tras el ensayo de cizalladura

En la siguiente tabla se incluye la carga máxima soportada por cada una de las probetas con el fin de elaborar con la misma un gráfico que nos permita observar de forma rápida en tratamiento óptimo desde el punto de vista resistente.

Tiempo	Carga máxima [KN]
30m	10,55
10h	10,16
25h	10,6
50h	10,035
100h	11,24
200h	9,76

Tabla 5.2. Resultados de los ensayos de tracción a 720°C

Por tanto elaborando el gráfico con los datos de carga máxima, obtenemos lo siguiente:

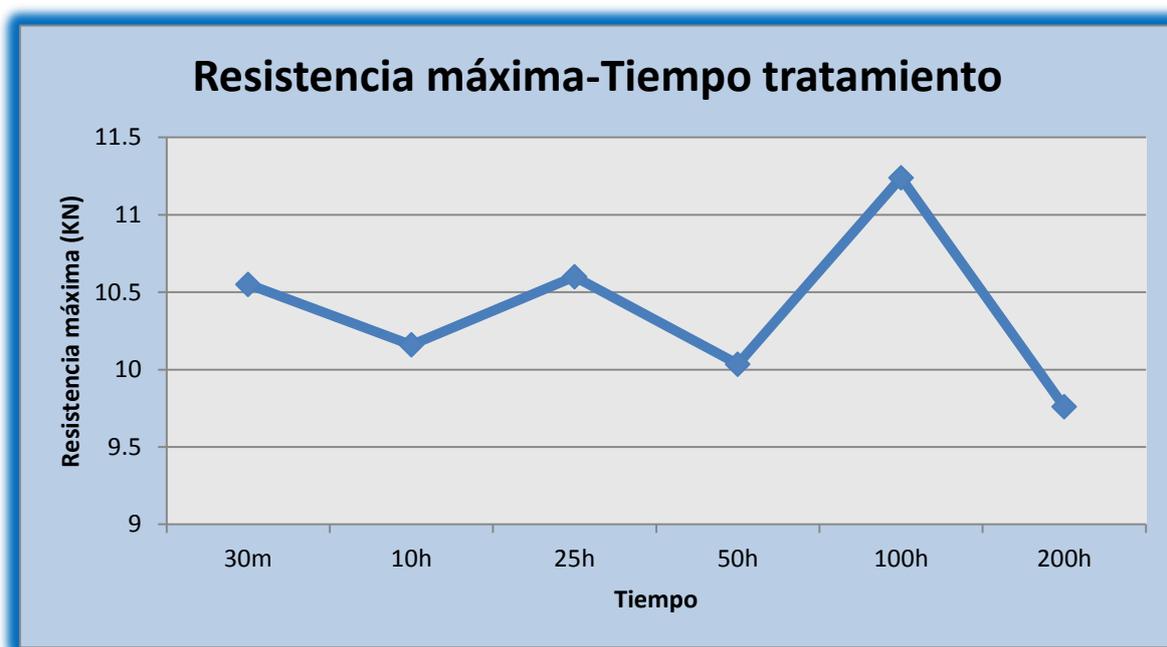


Imagen 5.3. Gráfica carga máxima soportada para cada probeta

Como conclusión de este ensayo podemos decir que desde el punto de vista resistente, el tratamiento de 100h es el que mejor resultado nos ofrece. En tratamientos de mayor duración el tamaño de los precipitados aumenta aún más y la resistencia empieza a disminuir puesto que la aleación empieza a estar sobrevenjecida. La fase γ' habrá precipitado en la fase η , se degradarán las propiedades de la aleación, anclando peor el movimiento de las dislocaciones. El tratamiento de endurecimiento no influye en el tipo de rotura que se produce.

En la imagen 5.4 podemos observar con algo más de detalle uno de los casos. Como hemos explicado antes, observamos una zona de proporcionalidad carga-deformación bastante amplia, seguido de una muy pequeña zona casi inapreciable de fluencia en la que la carga fluctúa entre los límites de fluencia superior e inferior y por último una carga máxima a partir de la cual se produce la estricción y finalmente la rotura.

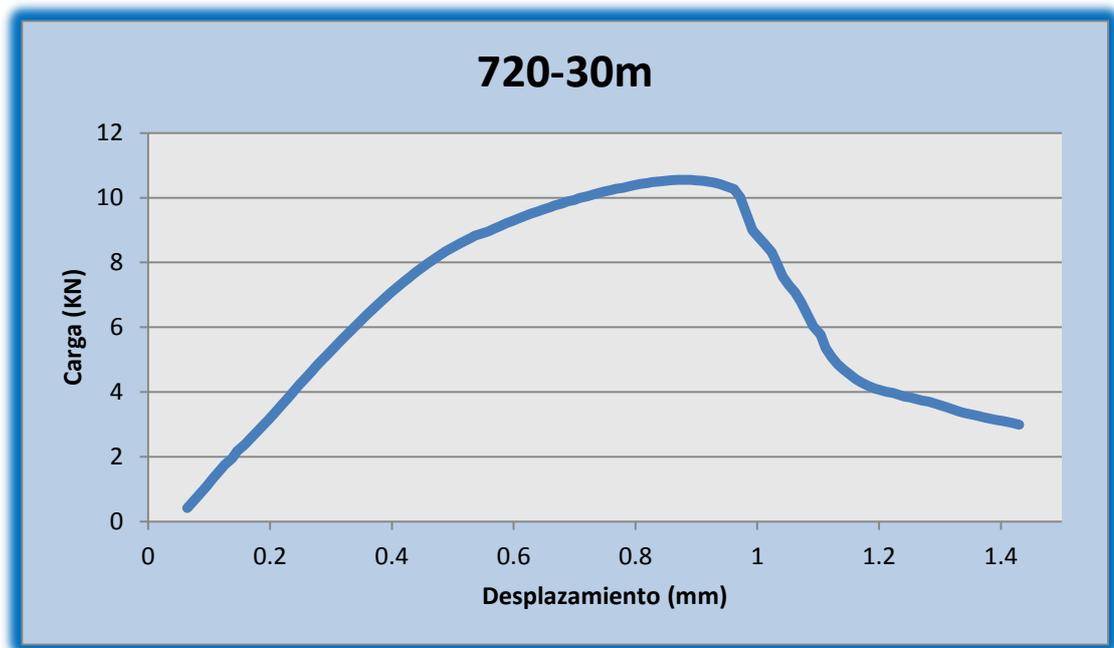


Imagen 5.4. Curva de tracción 720°C 30 min

Podemos observar el resto de curvas de tracción en el Anexo 1.

5.2.- RESULTADOS DEL ENSAYO DE POLARIZACIÓN ANÓDICA

Durante el ensayo de polarización anódica se produce una reactivación desde el punto correspondiente a un pico de intensidad máxima. Posteriormente a este punto la densidad de corriente disminuirá hasta alcanzar el punto correspondiente al potencial de pasivado. La zona de pasivado será de vital importancia para el estudio puesto que determinará la zona de máxima protección de nuestro material frente a la corrosión.

Si seguimos aumentando el potencial tras la zona de pasivado, llegará un punto denominado potencial de picadura, a partir del cual se origina la picadura debido a la rotura de la capa pasiva.

Cada punto tiene asociado una densidad de corriente y un potencial y ambos, dependiendo de cada caso, nos indicarán el comportamiento frente a la corrosión.

El primer punto que se va a valorar es el correspondiente al punto de intensidad máxima. Nos interesa conocer por tanto la densidad de corriente (i) [A/cm^2] que circula por la probeta. El valor de esa densidad de corriente determinará el momento en el que se empieza a formar una capa de óxido sobre el acero (capa pasiva) que producirá una disminución de la densidad de corriente que circula por el mismo. Por tanto valores altos de la intensidad máxima serán signo de un peor comportamiento pues la capa pasiva empezará a formarse más tarde (las curvas se verán desplazadas más a la derecha.)

En la imagen 5.5 se muestra la tabla de valores correspondientes a la densidad máxima de corriente y en la 5.6 se representa con respecto al tiempo.

720°C	i.máxima
30 min	0,00038971
10h	0,0025702
25h	0,011738
50h	0,029665
100h	0,00019651
200h	0,00028502

Imagen 5.5. Valores de densidad de corriente máxima asociado a cada tratamiento



Imagen 5.6. Densidad de corriente máxima asociado a cada tratamiento

A primera vista podemos observar que tanto el tratamiento de 25h como el de 50h presentan peor comportamiento frente a la corrosión que el resto de tratamientos. Analizando las curvas de polarización anódica correspondientes a estos dos tratamientos y comparándolas con por ejemplo la correspondiente al tratamiento de 30min, comprobamos como estas están desplazadas hacia la derecha. La comparación se muestra en la imagen 5.7 y el resto de curvas se encuentran en el anexo I.

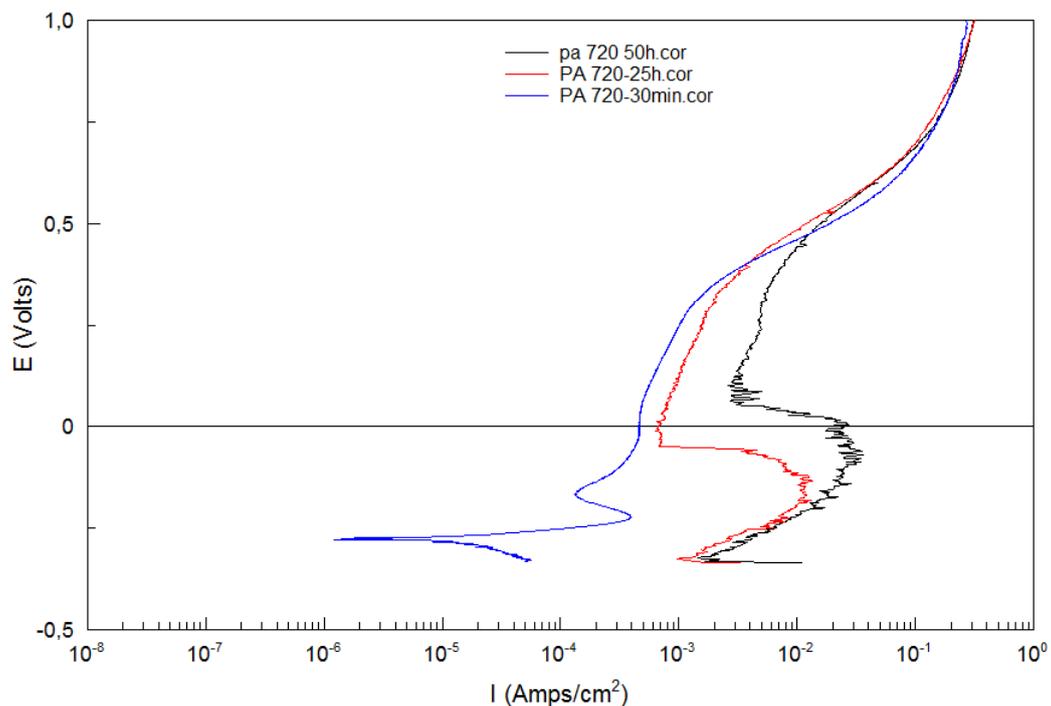


Imagen 5.7 Desplazamiento curvas PA en función de la densidad de corriente

Se pasa a valorar el segundo punto de interés de nuestro ensayo, el punto correspondiente al potencial de pasivado. Cuanto menor sea su valor, mayor protección presentará el material ante la corrosión. En la imagen 5.8 se muestran los valores del potencial de pasivado y en la imagen 5.9 se representan con respecto al tiempo de duración del tratamiento de envejecimiento.

720°C	E.pasivado
30 min	-0,16722
10h	-0,11477
25h	0,047395
50h	0,062879
100h	-0,18632
200h	-0,19103

Imagen 5.8. Valores de potencial de pasivado asociado a cada tratamiento



Imagen 5.9. Potencial de pasivado asociado a cada tratamiento

Como podemos observar, de nuevo, los tratamientos de 25h y 50h son los que peor comportamiento frente a la corrosión presentan. Por otro lado, se observa que los tratamientos de 30 min, 100h y 200h, son los que se protegerán a menores potenciales.

Por último, con respecto al potencial de picadura, cuanto mayor sea su valor mejor comportamiento frente a la corrosión, puesto que se requiere de un mayor potencial para que esta empiece a producirse. En la imagen 5.10 se representa el potencial de picadura respecto al tiempo

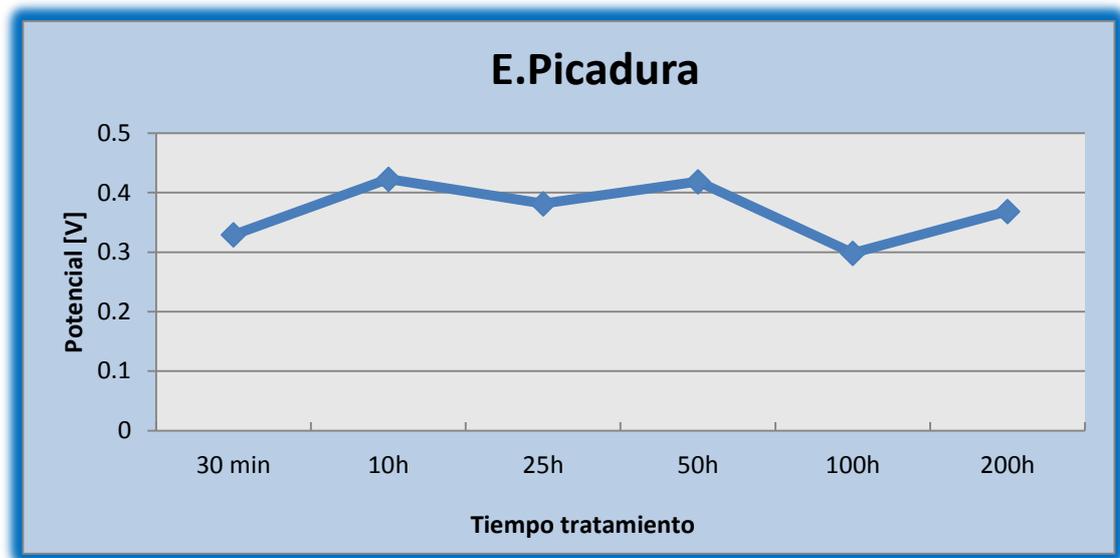


Imagen 5.10. Potencial de picadura asociado a cada tratamiento

A primera vista no se aprecian grandes diferencias. El tratamiento de 30 min, 100h y 200h, presentan de nuevo menor potencial de picadura, un signo más de que son mejores tratamientos que los otros 3.

Analizando todo lo anterior, se pretende estimar numéricamente la zona de potenciales en la que el material permanecerá pasivado, es decir, protegido, determinando la facilidad con la que el material en medio acuoso tenderá a formar picadura. Para ello, se realiza la diferencia entre el potencial de picadura y el potencial de pasivación. Por tanto cuanto mayor sea la diferencia, mayor protección. En la imagen 5.11 se muestran los valores numéricos y en la imagen 5.12 se representa esta diferencia.

720°C	E.picadura-E.pasivado
30 min	0,4964
10h	0,53766
25h	0,334185
50h	0,355641
100h	0,48473
200h	0,55976

Imagen 5.11. Valores de la zona de pasivación

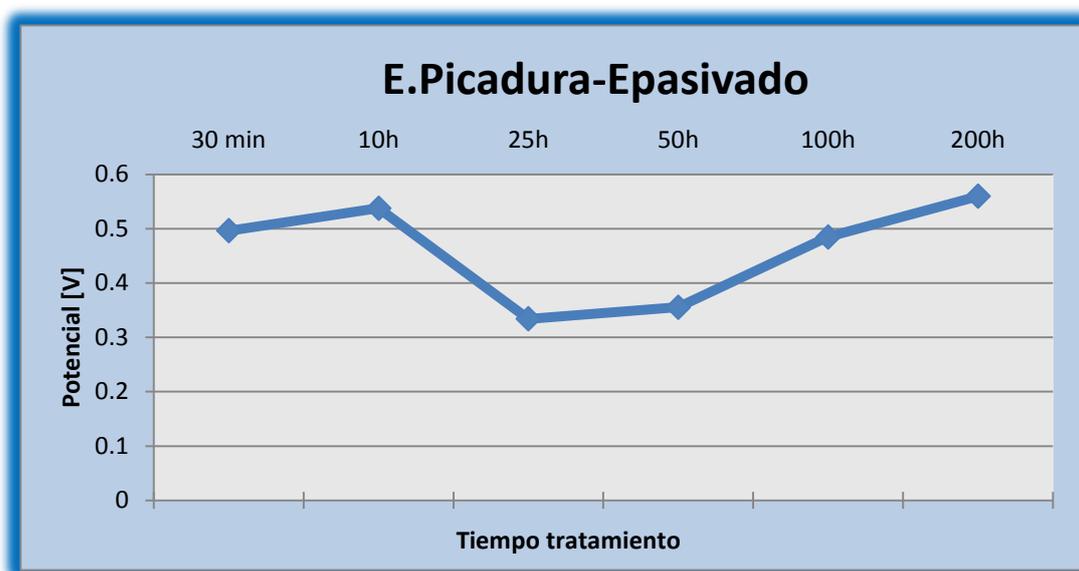


Imagen 5.12. Diferencia entre el potencial de picadura y el potencial de pasivado

Con objeto de conocer más de cerca la microestructura del material y de verificar los resultados obtenidos con el ensayo de polarización anódica, se han realizado diferentes capturas de la probeta a diferentes aumentos.

Las capturas realizadas a menores aumentos permiten observar de manera global las partes de la muestra que han sido susceptibles a la corrosión. Para aquellas partes que nos interesen más a fondo utilizaremos mayores aumentos.

Como sabemos, una unión soldada, está formada por tres zonas microestructuralmente diferentes. Una zona de metal fundido que corresponderá al punto de soldadura, una zona de afectación térmica (ZAT), la cual ha sufrido cambios microestructurales durante la soldadura pero no ha fundido, y una zona denominada metal base (MB) la cual no ha sufrido cambios.

En la imagen 5.13 se puede observar la microestructura del punto de soldadura. Observamos una estructura dendrítica cuya dirección de las dendritas corresponde a la dirección de evacuación del calor.

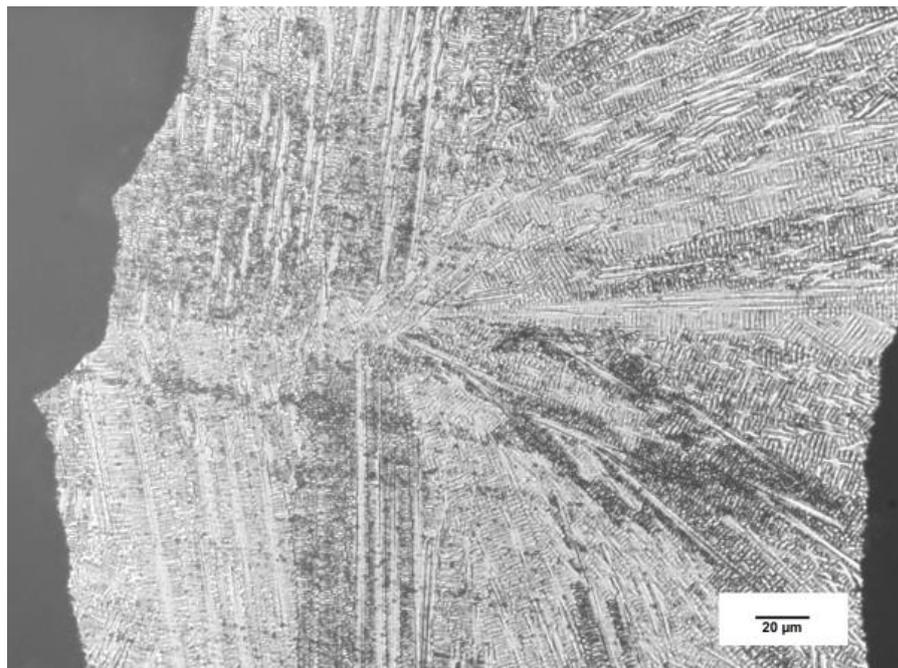


Imagen 5.13. Estructura dendrítica 720° 30min (200X)

Si observamos con detenimiento la imagen 5.14 y 5.15, se observa el cambio microestructural que se produce desde la zona de metal fundido, pasando por la ZAT y llegando a la zona de metal base.

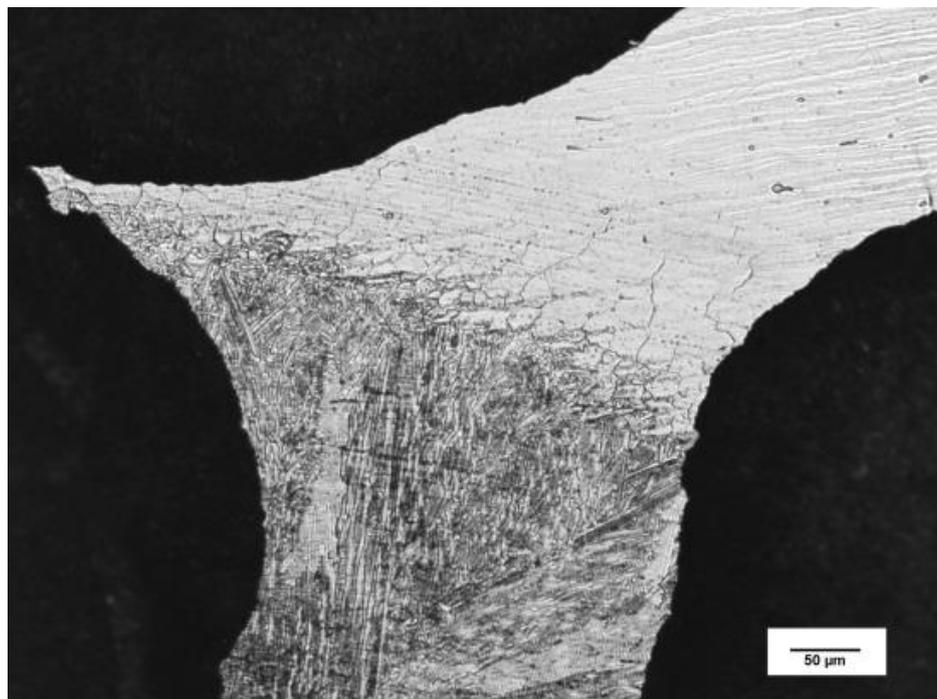


Imagen 5.14. Cambio microestructural 720° 30min (100X)

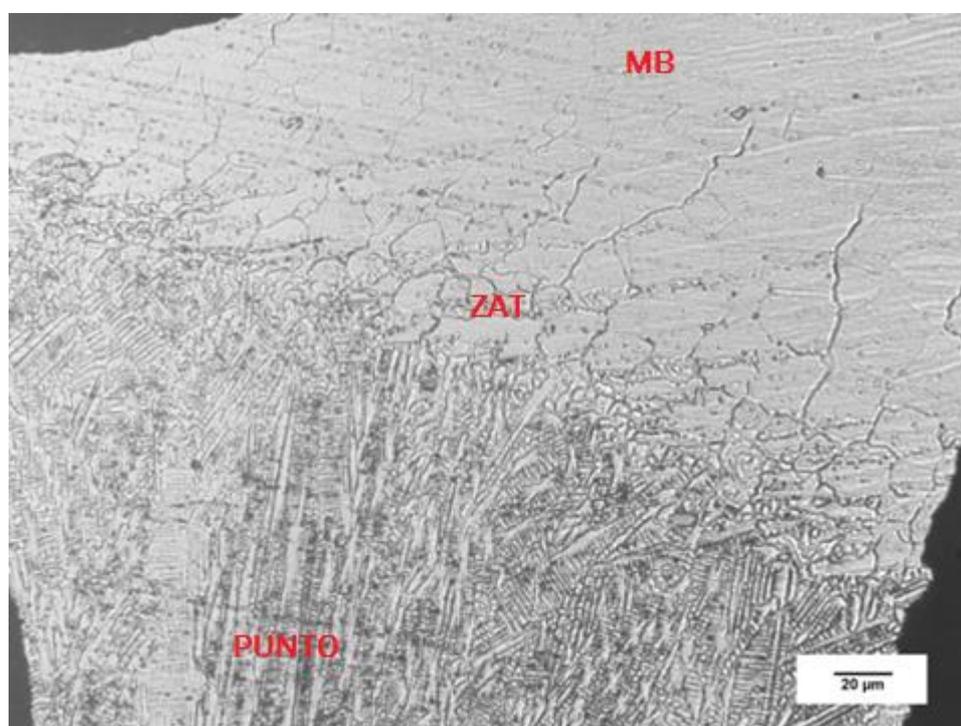


Imagen 5.15. Cambio microestructural 720° 30min (200X)

Hablando de una manera global, podemos comparar las diferentes probetas tras la realización del ensayo. En las imágenes 5.16, 5.17, 5.18, 5.20 y 5.21, se muestran el resultado final de las probetas tras el ensayo.



Imagen 5.16. 720° 30min

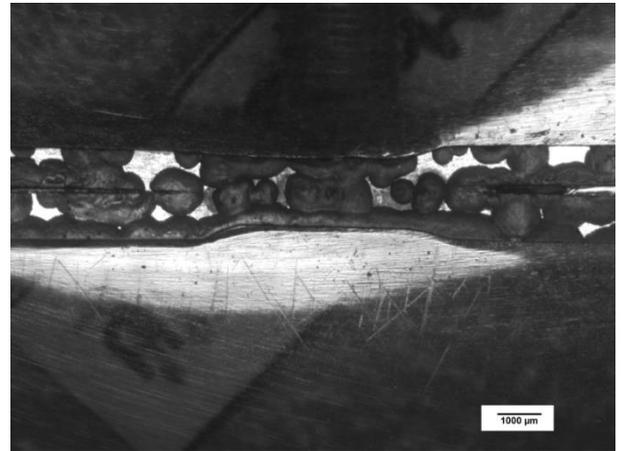


Imagen 5.17. 720° 10h

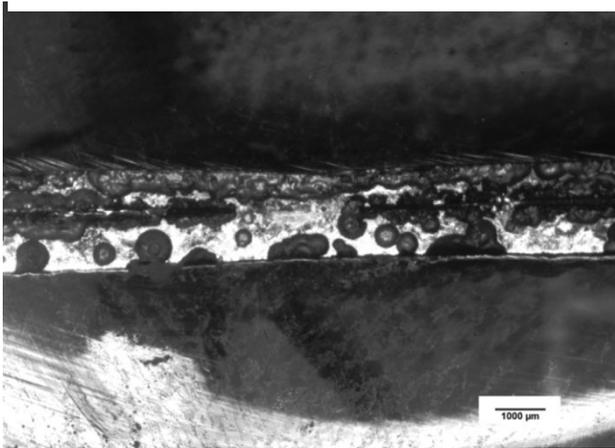


Imagen 5.18. 720° 25h

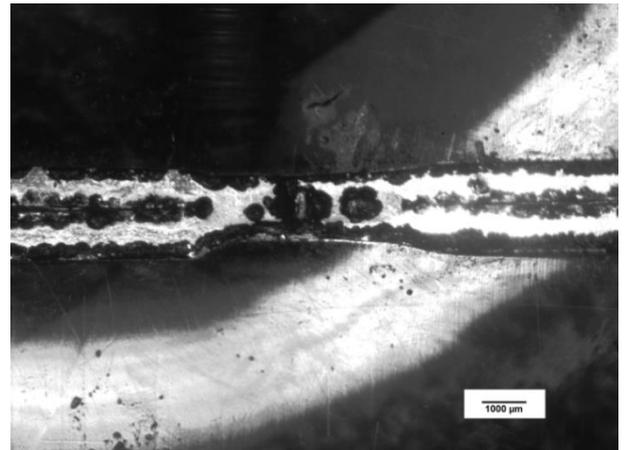


Imagen 5.19. 720° 50h

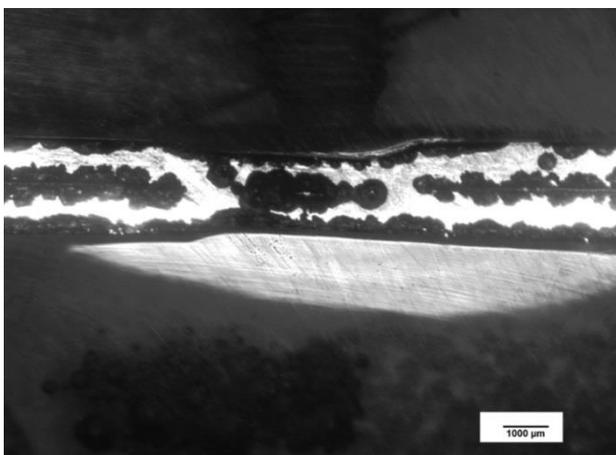


Imagen 5.20. 720° 100h

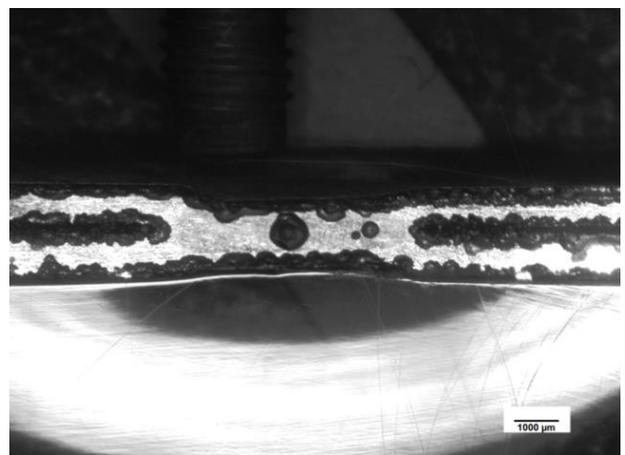


Imagen 5.21. 720° 200h

Como se puede observar con tiempos de tratamiento cortos, obtenemos una superficie corroída prácticamente en su totalidad, pero con unas picaduras poco profundas. A menudo que incrementamos el tiempo de tratamiento, aumenta el tamaño de los precipitados y por tanto se producen picaduras más profundas y más localizadas en los bordes de grano.

El tratamiento de 25h es el que podemos denominar crítico para nuestro acero, ya que se producen una gran cantidad de picaduras a lo largo de toda la superficie del mismo. Comparando este tratamiento con el tratamiento de 100h, el cuál es uno de los tratamientos óptimos, se puede observar lo ya comentado.

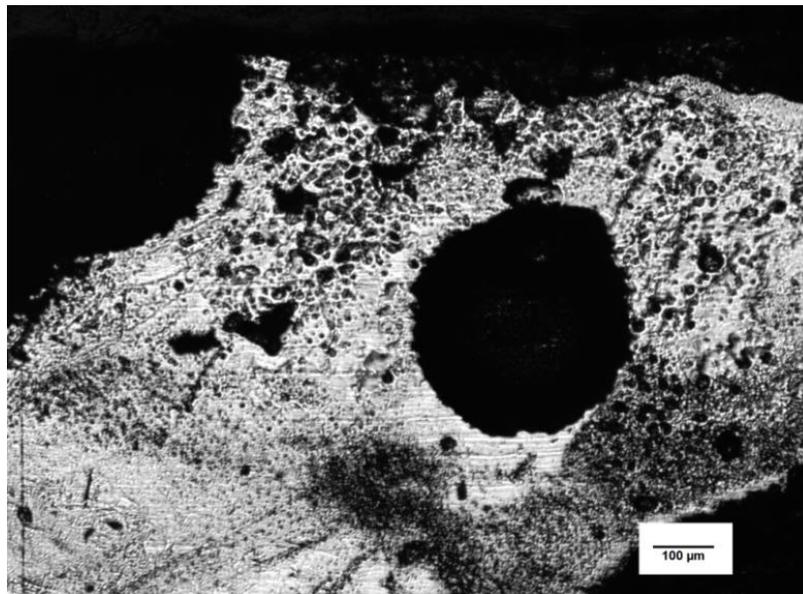


Imagen 5.22. 720° 25h(50X)

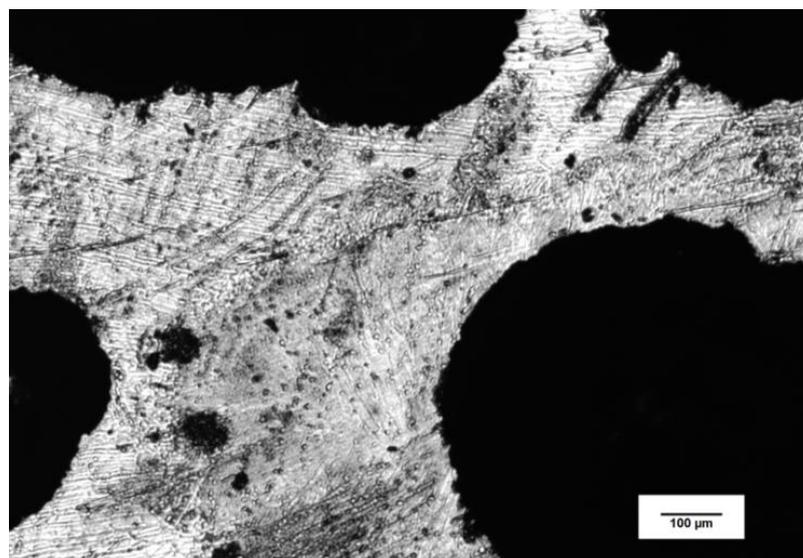


Imagen 5.23. 720° 100h(50X)

Se pueden observar en el primer caso una gran cantidad de picaduras, muchas de ellas poco profundas. En el segundo caso en cambio, hay un menor número de picaduras y estas son más profundas.

Si nos fijamos con detenimiento las imágenes 5.19, 5.20 y 5.21, observamos la existencia de una picadura en el punto de soldadura la cuál según aumenta el tiempo de tratamiento se va concentrando más en el punto. Se puede observar esta picadura (la cual será muy profunda) en la imagen 5.24.

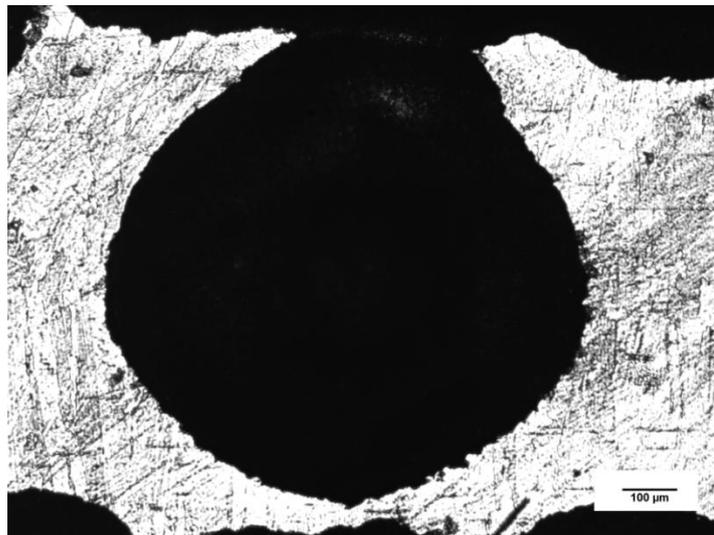


Imagen 5.24. 720° 200h punto(50X)

Por tanto, podemos concluir que los tratamientos de 25h y 50h, son los que peor comportamiento frente a la corrosión ofrecen debido a que pasivan a potenciales muy altos y por tanto tienen una zona de protección o de pasivación menor. El tratamiento de 25h es especialmente problemático ya que se producen una gran cantidad de picaduras a lo largo de toda la muestra.

Por otro lado, los mejores tratamientos siguiendo este mismo criterio son los de 100h y 200h. El tratamiento de 200h presenta una zona pasiva bastante amplia y algo mayor a la de 100h. Cabe también destacar que los tratamientos de 30 min y 10h también presentan un comportamiento frente a la corrosión bastante bueno ya que presentan unos valores cercanos de potencial de picadura a los tratamientos de 100h y 200h.



Escogeremos el tratamiento de 100h como el óptimo ya que es el tratamiento que mayor potencial de picadura tiene, además de tener una intensidad máxima muy pequeña, y una gran zona pasiva.



6- BIBLIOGRAFÍA

6.1- BIBLIOGRAFÍA

- [1] <http://www.infoacero.cl/acero/historia.htm>
- [2] <https://es.wikipedia.org/wiki/Acero#Historia>
- [3] G. Fernández, J. I. Verdeja y J. A. Perosanz, **Corrosión por picaduras de una tubería de acero al carbono.**
- [4] G. DiCaprio, **Los aceros inoxidable: martensíticos, ferríticos, austeníticos.**
- [5] M. Seifollahi, S.H. Razavi, Sh. Kheirandish and S.M. Abbasi, **The Mechanism of η Phase Precipitation in A286 Superalloy During Heat Treatment.**
- [6] <http://biltra.es/asesor/influencia-de-los-aleantes-en-los-aceros/>
- [7] <http://www.metallactual.com/revista/5/materiales.pdf>
- [8] http://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/mecanica/5_anio/metalografia/5- Estructuras_del_acero_v2.pdf
- [9] K. Kobayashi, M. Hayakawa and M. Kimura, **High-Cycle Fatigue Properties of Ni-Based Alloy 718 and Iron-Based A286 Superalloys at Elevated-Temperature**
- [10] <http://spanish.alibaba.com/product-gs/a-286-1-4980-superalloy-steel-491827491.html>
- [11] <http://www.evek.es/alloy-a286.html>
- [12] <http://www.supplieronline.com/propertypages/A-286.asp>
- [13] http://www.cordes.com.ar/index.php?modulo=mater&accion=sitio_ver&idmater=8&page_ ANTE=1
- [14] O. Martín, P. De Tiedra y M. San-juan, **Study of influence of gamma prime and eta phases on corrosion behavior of A286 superalloy by using electrochemical potentiokinetic techniques**
- [15] J. Apraiz Barreiro, **Tratamientos térmicos de los aceros**
- [16] <http://uca.edu.sv/facultad/clases/ing/m210031/Tema%2012.pdf>
- [17] http://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm06/pfcm6_2_4.html
- [18] <http://www.utp.edu.co/~publio17/endurecimiento.htm>
- [19] C. Arganis, **Corrosión por Picaduras y por Hendiduras.**



6.2.- NORMATIVA

- UNE-EN ISO 6892-1:2010 - Relativa a la realización de Ensayos de Tracción
- ASTM G5-87 - Método de referencia estándar para la realización de ensayo de medidas de polarización anódica potencioestáticas y potenciodinámicas.
- UNE-EN 10088-1:2015 - Aceros inoxidables.
- UNE-EN ISO 14273- Medidas de las probetas y procedimiento del ensayo de cizallamiento para soldaduras por resistencia por puntos, por costura y por protuberancias.

7.- ANEXO 1

7.1.- IMÁGENES ENSAYOS CIZALLADURA

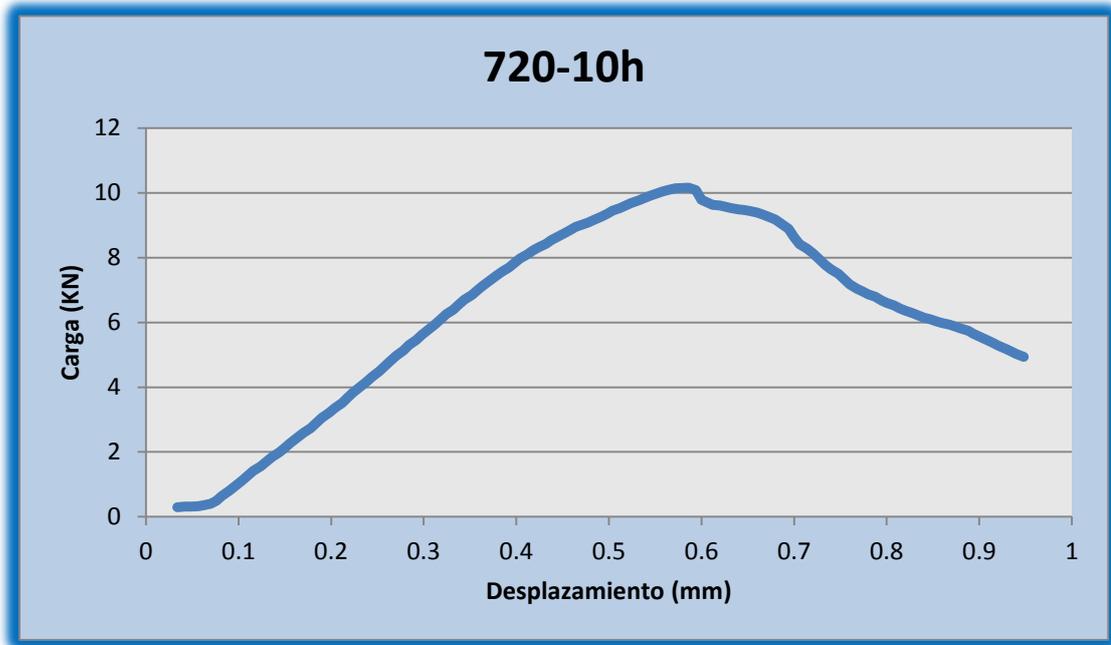


Imagen 7.1. Curva de tracción 720°C 10h

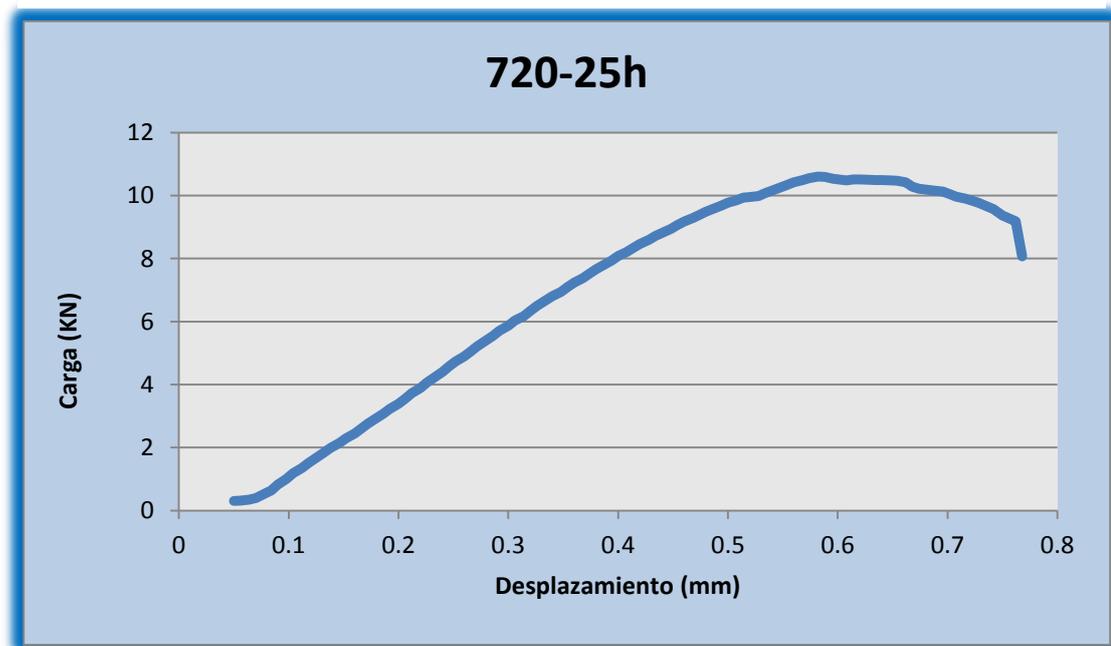


Imagen 7.2. Curva de tracción 720°C 25h

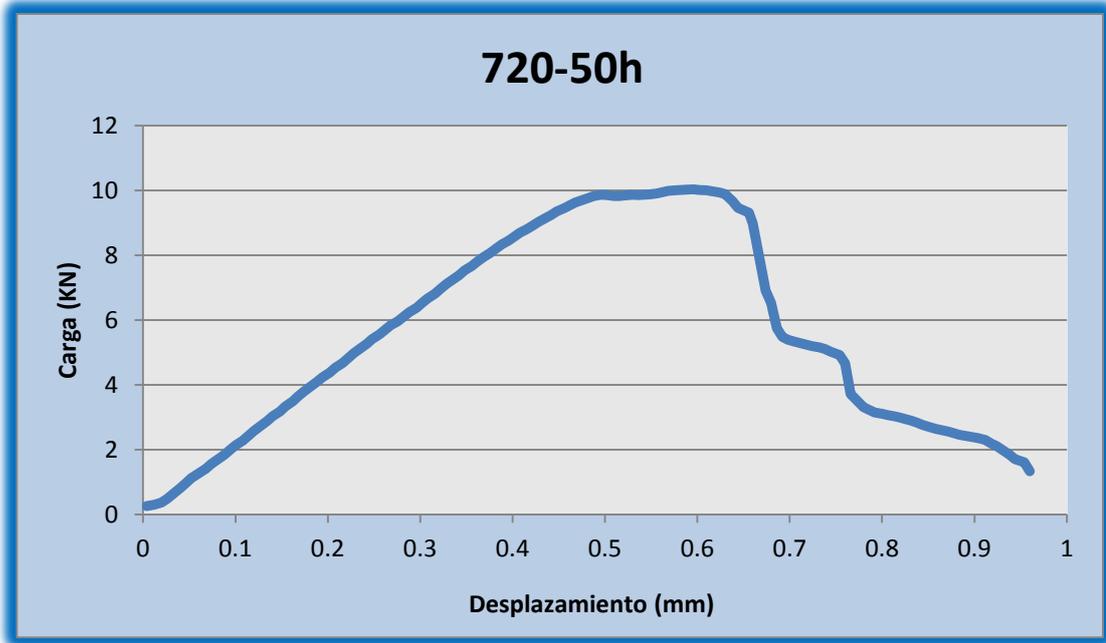


Imagen 7.3. Curva de tracción 720°C 50h

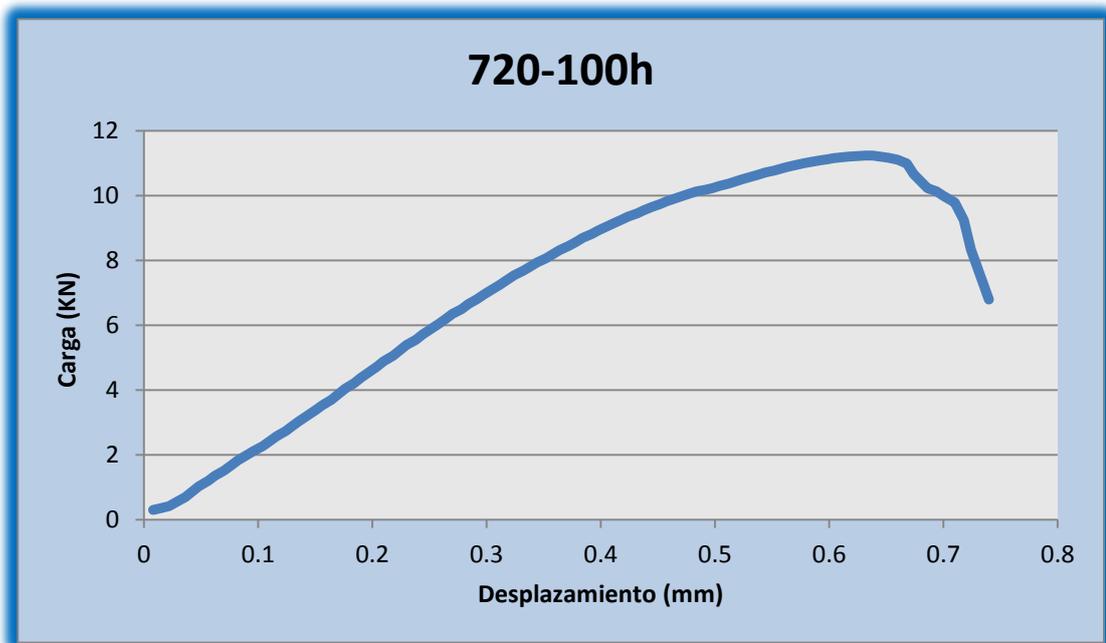


Imagen 7.4. Curva de tracción 720°C 100h

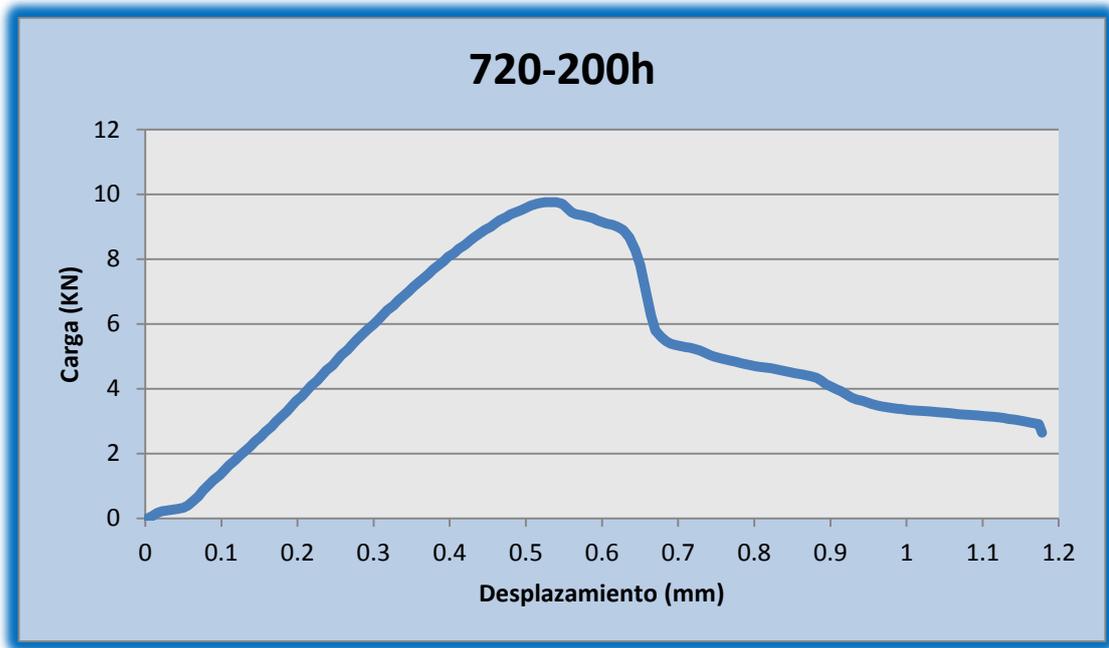


Imagen 7.5. Curva de tracción 720°C 200h

7.2.- IMÁGENES ENSAYOS DE POLARIZACIÓN ANÓDICA

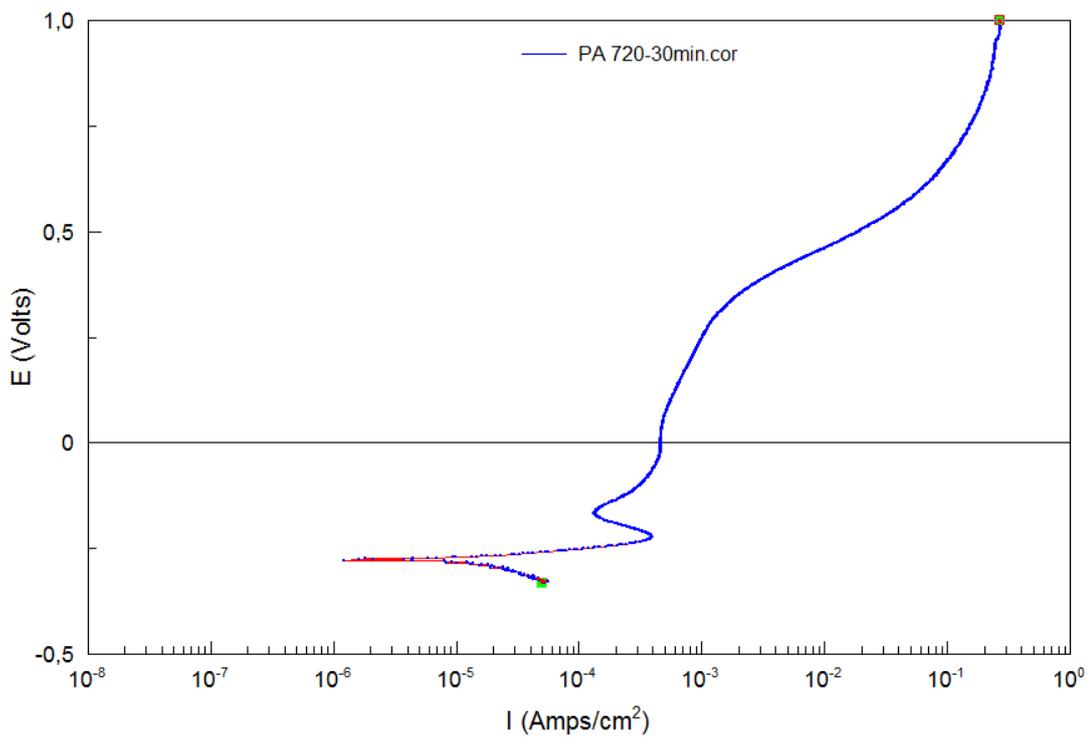


Imagen 7.6. Curva polarización anódica 720°C 30 min

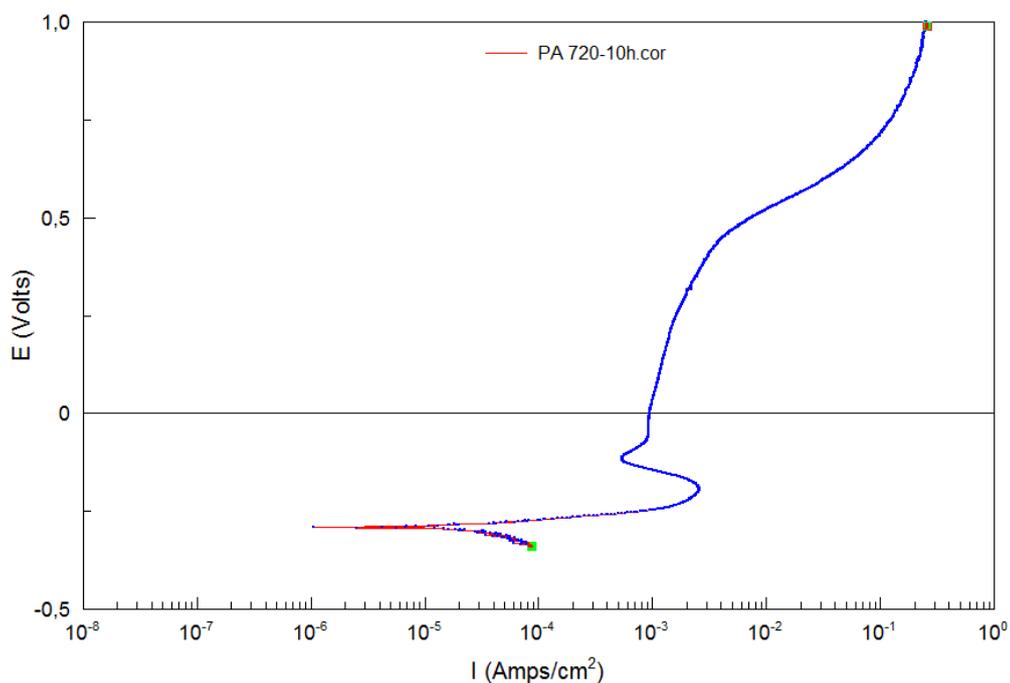


Imagen 7.7. Curva polarización anódica 720°C 10 h

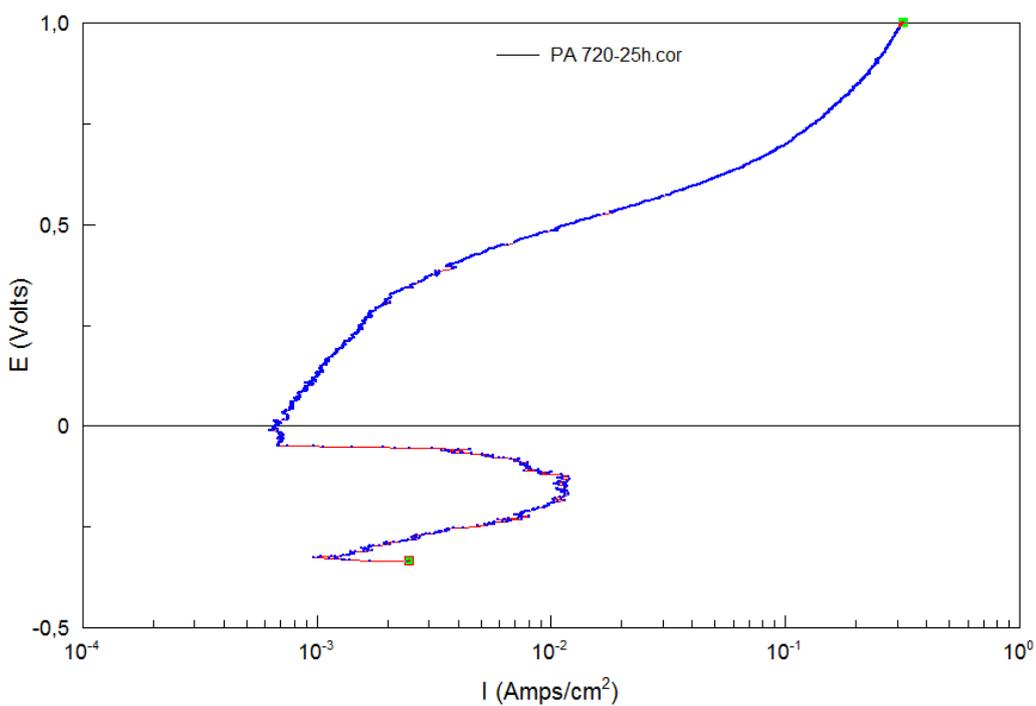


Imagen 7.8. Curva polarización anódica 720°C 25 h

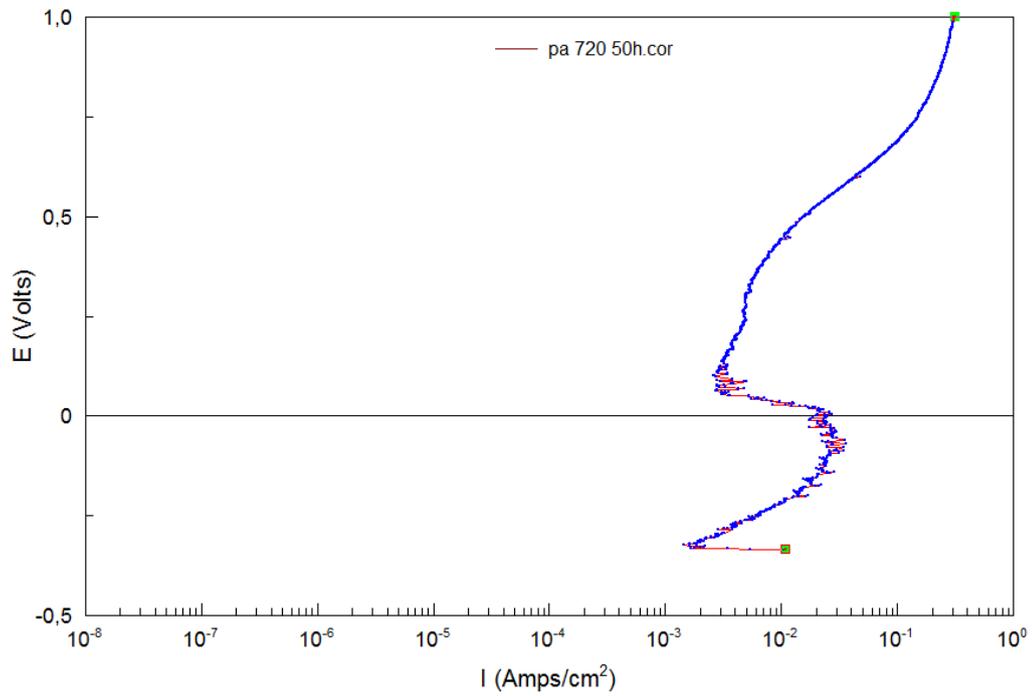


Imagen 7.9. Curva polarización anódica 720°C 50 h

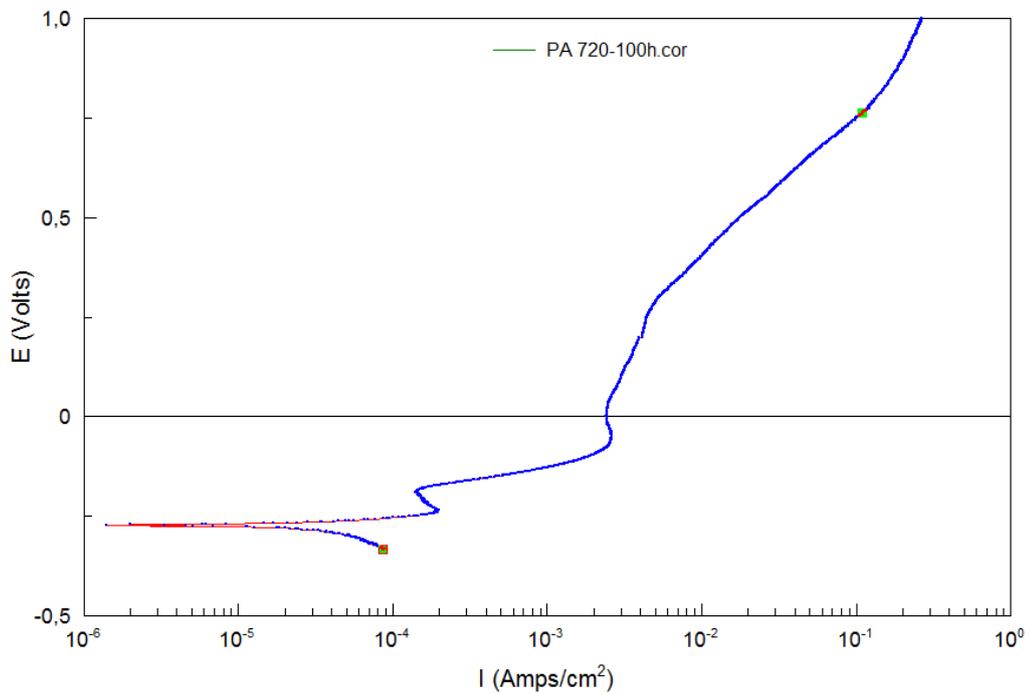


Imagen 7.10. Curva polarización anódica 720°C 100 h

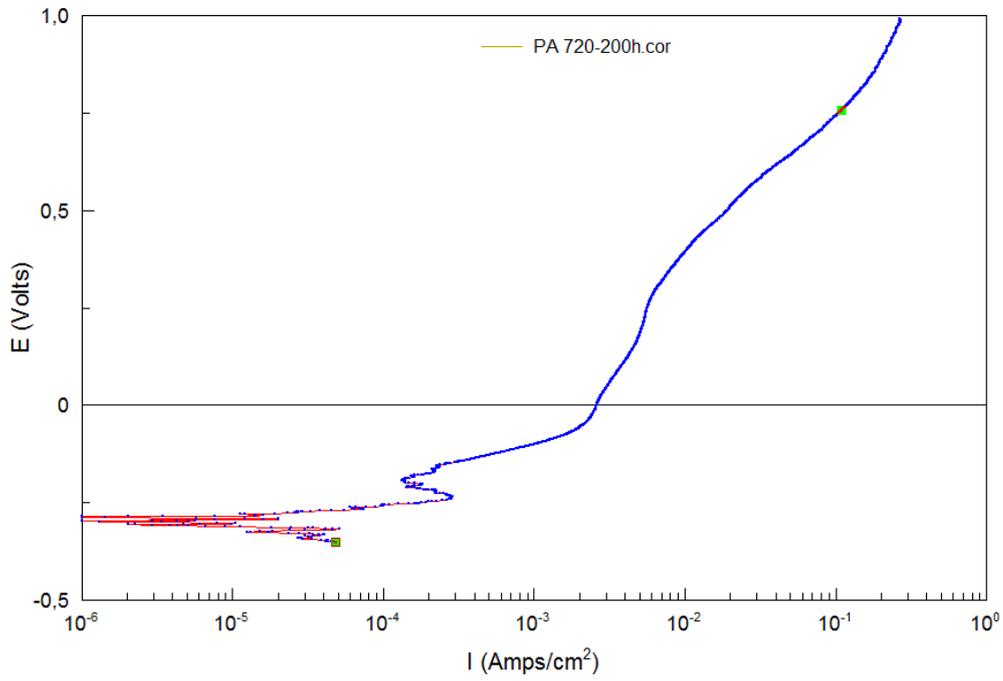


Imagen 7.11. Curva polarización anódica 720°C 200 h