



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH  
Escola Politècnica Superior d'Edificació  
de Barcelona

## **GRADO EN ARQUITECTURA TÉCNICA Y EDIFICACIÓN TRABAJO DE FIN DE GRADO**

### **ESTUDIO DE LA TRANSFORMACIÓN MICROESTRUCTURAL DE METALES AL SIMULAR LAS CONDICIONES DE UN INCENDIO**

**Proyectista:** Laura Ávila López del Castillo

**Directoras:** Ana María Lacasta Palacio y Laia Haurie Ibarra

**Convocatoria:** Septiembre/Octubre 2021



# RESUMEN

Este estudio trata sobre la transformación microestructural que sufren los metales después de haber estado bajo las condiciones de un incendio y de cómo éste hecho afecta a sus propiedades mecánicas.

El objetivo del proyecto es relacionar las propiedades mecánicas con los cambios microestructurales que sufren los metales. Para alcanzar este objetivo, se han escogido tres metales que se utilizan habitualmente: aluminio, acero inoxidable y acero galvanizado. Se han diseñado unos experimentos con la intención de, primero, simular posibles situaciones de incendio y, después, realizar varios ensayos para comprobar si las propiedades mecánicas y la microestructura han cambiado.

Para simular las situaciones de incendio, se han utilizado rampas de temperatura con las que se ha podido imitar las temperaturas que podría alcanzar un incendio. También se han realizado dos tipos de enfriamiento, simulando las condiciones de extinción de un incendio, si las llamas se apagan solas o si actúan los bomberos. A continuación, se ha realizado un ensayo de tracción, con el que se ha querido evaluar la tracción máxima que aguanta la probeta expuesta, el alargamiento que adquiere y la tensión que soporta. Después, mediante un durómetro, se ha valorado el aumento o descenso de la dureza según la temperatura y el enfriamiento. Por último, se ha querido comprobar los resultados mediante la técnica de metalografía, y relacionar los cambios de fase observados en las imágenes metalográficas con el resto de resultados.

Se ha podido comprobar que no se puede relacionar una única propiedad mecánica con una temperatura, sino que se deben valorar los resultados de todos los ensayos en conjunto, que la variación en las propiedades mecánicas que sufren los metales a causa de la temperatura está directamente relacionada con los cambios de fase de la microestructura y que, después de un incendio un metal puede quedar seriamente dañado aunque no lo parezca, ya que al transformarse su microestructura, el metal ha adquirido unas nuevas propiedades que quizá no son adecuadas para el uso que se está haciendo de ese material.

4 Estudio de la transformación microestructural de metales al simular las condiciones de un incendio.

---

# ÍNDICE

1	Introducción .....	5
2	Estado del arte.....	6
2.1	Antecedentes .....	6
2.2	Introducción a la metalografía .....	9
3	Material y métodos.....	11
3.1	Diseño experimental .....	11
3.1.1	Adquisición y preparación de muestras .....	11
3.1.2	Determinación de las técnicas de ensayo .....	12
3.2	Técnicas de ensayo .....	12
3.2.1	Rampas de calentamiento.....	12
3.2.2	Tracción .....	14
3.2.3	Dureza .....	15
3.2.4	Metalografía .....	16
4	Resultados y discusión .....	18
4.1	Afectación por temperatura .....	18
4.2	Ensayo de Tracción .....	21
4.3	Dureza .....	63
4.4	Metalografía .....	66
4.5	Reflexiones finales.....	74
5	Conclusiones .....	75
6	Agradecimientos .....	77
7	Bibliografía.....	78

# 1 Introducción

Actualmente, existe en la edificación una problemática en relación con los incendios. Los materiales cada vez evolucionan más para poder retrasar lo máximo posible los efectos de las llamas, pero aún es casi imposible evitar que estos efectos lleguen a producirse. Esto hace que sea primordial la investigación en la prevención, pero puesto que aun se siguen produciendo incendios, debemos reflexionar sobre qué pasa después con los materiales afectados. Estos requieren un análisis exhaustivo para comprobar su integridad, aunque aparentemente no hayan quedado expuestos, como es el caso de los metales, que podría parecer que no han sufrido daños, pero internamente han podido quedar seriamente afectados.

Este proyecto quiere dar respuesta a la necesidad de saber si los análisis realizados en la investigación posterior a un incendio, pueden servir para determinar el estado de los metales y sus propiedades actuales después de sufrir un aumento intenso de la temperatura.

Es por este motivo por el que, en este estudio, se ha realizado un análisis en 3 tipos de metales que podríamos encontrar en cualquier edificación: acero galvanizado, acero inoxidable y aluminio. El objetivo es relacionar las propiedades mecánicas con los cambios microestructurales que sufren los metales y analizar el comportamiento de estos materiales en caso de incendio para diseñar y construir los edificios de forma que estas situaciones sean menos peligrosas.

Estas son las razones por las cuales es necesario determinar en qué medida pueden afectar las altas temperaturas a las diferentes propiedades físicas y mecánicas y al comportamiento de estos materiales, así como el tipo de enfriamiento que puede sufrir el metal, simulando o no la actuación de bomberos.

Basándose en otros proyectos ya realizados que se explicarán más adelante, en este proyecto en concreto se han observado los cambios microestructurales de la transformación que ha sufrido el metal después de realizarle un tratamiento térmico, mediante rampas de calentamiento aplicando dos enfriamientos distintos, lento y rápido. A través del ensayo de tracción se ha determinado la tensión máxima y el alargamiento que se ha producido y, se ha observado también, si cambia la dureza dependiendo de la temperatura. Además, se ha utilizado la metalografía para comprobar los cambios microestructurales y confirmar así los resultados obtenidos en los demás ensayos.

## 2 Estado del arte

### 2.1 Antecedentes

Dado que el mejor incendio es el que no llega a producirse, debemos esforzarnos en estudiar cómo, cuándo y dónde tienen lugar estos incidentes con el fin de poder prevenirlos y encontrar la manera de que no se produzcan. Conlleva multitud de ámbitos en los que recoger datos para procesar, como, por ejemplo: datos estadísticos de tipos de incendios, cantidad de víctimas, zonas más habituales en los que se producen, qué materiales son menos inflamables, calidad de los materiales utilizados, el comportamiento de estos, formación sobre cómo actuar ante un incendio, el rescate, etc. Hay infinidad de campos en los que trabajar la prevención.

Como se puede observar en estos ejemplos, la mayoría de investigaciones relacionadas con la prevención se producen con posterioridad al incidente, cuando ya no se puede poner remedio. Por ello, es importante averiguar qué ha ocurrido para que no vuelva a suceder. Es decir, la investigación que se realiza después de un incendio es crucial para conocer el origen del mismo y actuar sobre las causas.

Una de las técnicas más utilizadas en las investigaciones es el método científico, que se basa en la observación y experimentación. Pero, para ello, se requiere la recogida de evidencias cuantitativas, que nos ayuden en la investigación mediante análisis matemático y estadístico para poder desarrollar un sistema de predicción de fenómenos a través de los datos numéricos. Para el desarrollo de este método, la tecnología ha jugado un papel fundamental, mucho más que otras técnicas de prevención, ya que con su evolución cada vez se puede profundizar más en el origen y las causas que provocan los incendios.

Constantemente, surgen más ensayos y técnicas para analizar y evaluar las propiedades y características de los materiales que se utilizan en la edificación, concretamente en las viviendas, principales escenarios de los incendios. Estos materiales han sido estudiados a lo largo de la historia según si se han utilizado en mayor o menor medida, de modo que es habitual poder encontrar en la literatura mucha más información sobre madera y hormigón que de metales no estructurales. Esto se debe a su reciente incorporación, sobre todo, en fachadas, principal elemento de propagación de incendios en edificios<sup>1</sup>.

Estos materiales, en concreto, los metales no estructurales, pueden aportar ventajas e inconvenientes en cualquier momento del desarrollo de un incendio, pero, solo si conocemos bien su comportamiento y características en dichas situaciones, podemos revertir los inconvenientes.

Actualmente hay estudios que tratan sobre el efecto del fuego sobre los metales que no forman parte de la estructura de una edificación, concretamente sobre cables eléctricos<sup>2,3</sup>, ya que los incendios por cortocircuito son bastante habituales. Estos estudios están centrados principalmente en el cobre, material habitual en cables eléctricos, concluyendo que el método de enfriamiento, ya sea por aire o por agua, afecta a su estructura interna. Aunque los cortocircuitos tienen muchas posibilidades de producirse, la propagación del fuego está más influenciada por el entorno en el que se encuentra. Por tanto, estos estudios están más orientados a que no se produzcan los cortocircuitos y no tanto a la propagación.

También se pueden encontrar estudios que hablan de metales que se utilizan en elementos de la construcción pero que no son estructurales. Estudian el acero a nivel microestructural, de manera que se puede saber qué cambios ha sufrido el material en su interior por culpa de la temperatura a la que han sido sometidos, y si estos cambios afectan a su comportamiento<sup>4,5</sup>. En estos estudios se puede ver que la metalografía confirma los diferentes estados estructurales según la temperatura a la que han sido sometidos. Estos análisis de la estructura interna del metal son muy utilizados ya que tienen la gran ventaja de no ser destructivos, solo hace falta una pequeña muestra y no es necesario que sea destruida.

Aun así, estos estudios tienden a investigar únicamente el acero en bruto, sin contar que, en el momento en que son colocados en un edificio, pueden llevar algún tipo de tratamiento. De igual forma, solo se centran en el acero, cuando hay otro material metálico muy habitual, como el aluminio, que se coloca en fachadas de muros cortina además de en ventanas. Cabe puntualizar que hay una importante tendencia reciente hacia la construcción de muros cortina, principalmente por su estética y su fácil montaje, por lo que el estudio de este metal cobra relevancia.

Estas causas han sido decisivas a la hora de investigar sobre la transformación de la microestructura de los metales, ya que es importante y necesario entender porqué estos cambios pueden afectar a las propiedades de los metales.



## 2.2 Introducción a la metalografía

Para poder explicar correctamente los resultados de los ensayos, primero es importante conocer qué le sucede a la microestructura del acero al estar sometido a diferentes temperaturas.

Los metales están formados por pequeñas partículas denominadas “granos”, los cuales forman la estructura del material y son los responsables de darle unas determinadas propiedades a los metales. Estos granos, al recibir cierta temperatura, van cambiando de tamaño e incluso pueden llegar a cambiar su composición. Cada una de las zonas de un metal con una microestructura homogénea se denomina fase.

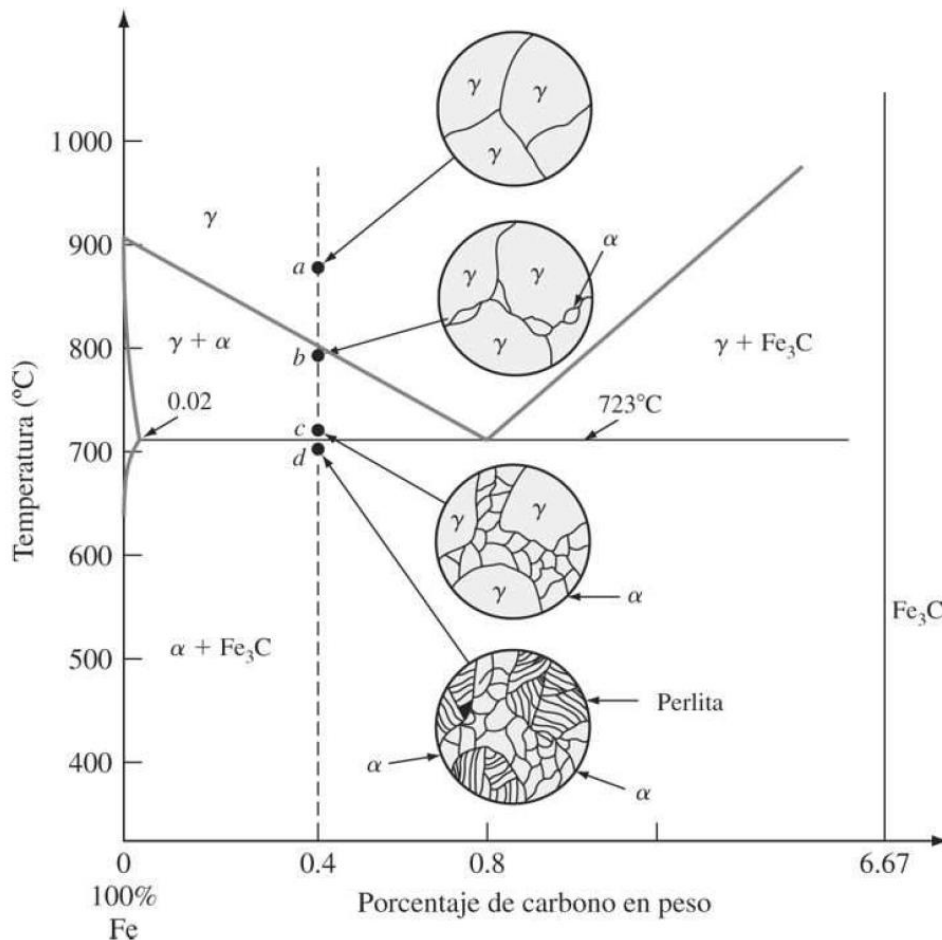


Figura 2.1. Diagrama de fases hierro-carbono del hierro con ilustraciones de las fases. Imagen extraída del libro “Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales” (Smith et al., 2006).

La figura 2.1 representa una parte del diagrama de fases hierro-carbono del hierro, concretamente la zona que pertenece a un acero con un 0,4% de carbono <sup>7</sup>. Contiene pequeños esquemas de lo que sería una imagen metalográfica en distintos puntos del diagrama. Aunque el acero de este proyecto contiene solamente un 0,05% de carbono, las imágenes obtenidas tendrán un patrón similar al de la figura 2.1, pero en menor medida.

Cuando se calienta un acero hasta la temperatura **a** de la figura 2.1 se obtiene una estructura austenítica homogénea (fase  $\gamma$ ). Posteriormente, si ese acero se enfría lentamente, se alcanza la temperatura **b** y la ferrita ( $\alpha$ ) que contenía el acero inicialmente deja de ser soluble y comienza a crecer principalmente en los límites de los granos de austenita, creando una nueva fase ( $\alpha + \gamma$ ). Aun así, la cantidad de  $\alpha$  no es muy grande, ya que aún sigue cerca del límite. Por eso, si se sigue enfriando hasta la temperatura **c**, se puede ver como la  $\alpha$  ha ido aumentando. Se trata de la misma fase, pero en proporciones distintas dependiendo de la temperatura a la que se encuentra.

Una vez se enfría por debajo de los 723°C, si continúa la condición de enfriamiento lento hasta la temperatura **d**, la austenita restante ( $\gamma$ ) se transforma en perlita ( $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ ). Cabe aclarar, que la  $\alpha$  (ferrita eutectoide) que se ha formado, es distinta a la  $\alpha$  (ferrita proeutectoide) que se había formado en primer lugar por encima de los 723°C <sup>7</sup>. Por otra parte, en el caso de que el enfriamiento fuese lo suficientemente rápido, la austenita ( $\gamma$ ), se transformaría en martensita (Figura 2.2).

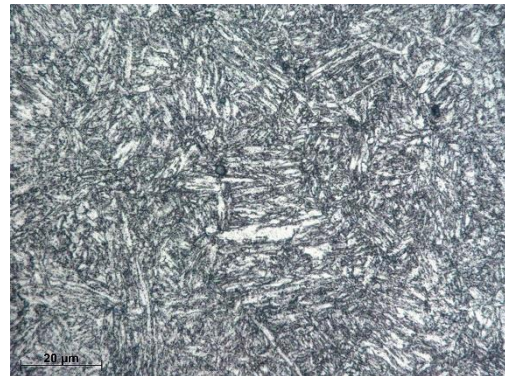


Figura 2.2. Imagen metalográfica de martensita. Extraída de "Proyecto de Innovación Atlas Metalográfico" de la Universidad Complutense de Madrid <sup>8</sup>.

Después de explicar, de forma resumida, los cambios de fases que sufre el acero, ya se pueden interpretar, de manera más clara, los resultados obtenidos en los ensayos que se exponen en este proyecto.

## 3 Materiales y métodos

En este estudio han sido necesarias muestras de los tres metales que son objeto de análisis. El acero galvanizado, por su alta resistencia a los daños mecánicos y porque su recubrimiento de zinc lo protege de la oxidación. El acero inoxidable, por su uso habitual debido a la estética y su resistencia a la corrosión y a las altas temperaturas. Y el aluminio, por su uso habitual en cerramientos. Aunque no tenga la misma resistencia que los anteriores, es interesante estudiarlo porque es un material más barato que el acero y de menos peso, por tanto, tiene un uso más frecuente.

### 3.1 Diseño experimental

#### 3.1.1 Adquisición y preparación de muestras

Las muestras provienen de material sobrante de un taller de ventanas. Se trata de chapas de tres metales distintos:

- Acero galvanizado DX51 + Z140 zincado en caliente de 2 mm de espesor
- Acero inoxidable AISI 304 de 1 mm de espesor
- Aluminio serie 1050 H-24 de 1,5 mm de espesor

Se determinó las dimensiones de las muestras en función de las pruebas a las que iban a ser sometidas, ya que las máquinas tienen una limitación de espacio. Por este motivo se utilizaron dos tamaños: placas de 200 x 30 mm para el horno y el ensayo de tracción, y placas más pequeñas de 50 x 15 mm para el ensayo de dureza y la metalografía.

Para obtener unos datos representativos, se decidió ensayar 3 muestras para cada una de las temperaturas asignadas a cada metal y para dos tipos de enfriamiento, rápido y lento, de manera que se ensayan un total de 75 muestras de 200 x 30 mm destinadas para el horno y el estudio de tracción. Por otro lado, se añadió una muestra de 50 x 15 mm para cada temperatura y enfriamiento para los ensayos de dureza y metalografía, alcanzando un total de 25 muestras pequeñas.

### **3.1.2 Determinación de las técnicas de ensayo**

La elección de las pruebas que se llevaron a cabo en el experimento se tomó en base a su idoneidad para simular situaciones reales. En un incendio se pueden dar muchas situaciones diferentes, como por ejemplo que los bomberos lleguen muy deprisa y apaguen las llamas enseguida. En ese caso, el incendio no alcanza demasiada temperatura. También puede suceder que el fuego se propague muy rápido, esté mucho tiempo ardiendo y se tarde mucho en extinguir las llamas, alcanzando en el proceso temperaturas más elevadas. O, por otra parte, el incendio puede extinguirse por sí solo si se acaba uno de los tres elementos del triángulo del fuego que al extinguirse rápido sufra una bajada brusca de la temperatura.

Con el objetivo de simular el máximo número de condiciones posibles de un incendio, fue necesario someter las muestras a diferentes temperaturas. Por ello, en primer lugar, a las probetas se les aplicó un tratamiento de calor mediante un horno para recrear el calor que sufren los metales en contacto con el fuego y observar los cambios estructurales que se producen en ellos.

Con el objetivo de saber si las propiedades mecánicas de las muestras podían haber sufrido cambios, se realizaron los ensayos de tracción, para determinar la carga máxima y la deformación que resiste cada probeta; y de dureza, para comprobar la resistencia a ser penetrado.

Por último, para averiguar si a nivel microestructural la probeta ha sufrido alguna transformación que pueda afectar a las propiedades mecánicas, se realizó una metalografía.

## **3.2 Técnicas de ensayo**

### **3.2.1 Rampas de calentamiento**

Una vez determinado el tamaño de las muestras, se decide el proceso que se aplica a las probetas. Teniendo en cuenta las situaciones anteriores y la temperatura de fusión de los tres metales que se pretenden ensayar, se deciden las temperaturas siguientes:

- Para el aluminio, cuya temperatura de fusión es de 660°C aproximadamente, se aplicaron las temperaturas de 200°C, 400°C y 600°C.

- Para los aceros (galvanizado e inoxidable), cuyas temperaturas de fusión están entre los 1400 y 1500°C aproximadamente, se aplicaron las temperaturas de 400°C, 600°C, 800°C y 1000°C.
- Para ambos casos, se prepararon muestras a temperatura ambiente, como temperatura de partida, con las que poder comparar el resto de temperaturas. Aunque éstas no pasarán por el horno, sí serán sometidas al resto de ensayos.

Además, las muestras de cada temperatura se sometieron a dos enfriamientos diferentes, uno lento y otro rápido, para comprobar si la velocidad del descenso de la temperatura afecta a la microestructura y a las propiedades mecánicas.

Se utilizó un Horno Isuni modelo ISP-50A, 50 Litros 1300°C 3,3Kw, con un programador TC500. Las muestras fueron introducidas en el horno por tandas de temperatura. Es decir, aunque las probetas sean de diferente material, se introdujeron a la vez según la temperatura aplicada, pero en recipientes separados para evitar la contaminación cruzada. Los recipientes utilizados fueron crisoles refractarios, indicados especialmente para soportar altas temperaturas.

Con la finalidad de asegurarnos de que las probetas hayan advertido algún cambio en su estructura interna, se decidió mantener las muestras a la temperatura acordada durante al menos una hora.

Primero se llevó el horno a la temperatura deseada mediante el programador. Una vez alcanzada la temperatura, se introdujeron 6 muestras de 200 x 30 mm y 2 de 50 x 15 mm de cada material por tanda de temperatura. Al realizar este paso y abrir la puerta (Figura 1), la temperatura del horno se vio afectada y disminuyó, por este motivo se esperó a que el horno recuperara la temperatura deseada para contabilizar una hora desde ese momento.



Figura 3.1. Proceso de introducción de las probetas en el horno.

Este paso llevó aproximadamente una hora y cuarto en total en todas las tandas realizadas. Una vez extraídas del horno, tres muestras de cada material se destinaron a enfriamiento

lento, consistente en dejar enfriar las probetas al aire en el mismo recipiente en el que se encontraban durante unas 24h; y otras tres muestras se destinaron a enfriamiento rápido, que consistió en sumergir las probetas en un cubo con agua a temperatura ambiente (unos 25°C), dejarlas enfriar en agua unos 15 minutos, retirar el exceso de agua con una bayeta, y dejarlas secar aproximadamente 24 horas.

### 3.2.2 Tracción

El ensayo consistió en aplicar un esfuerzo de tracción en los extremos de cada muestra hasta producir la deformación y la posterior rotura de la probeta. Se realizó mediante una prensa automática Mecacisa multiensayo de 300 KN (Figura 2), que tiene dos mordazas por las que sujeta la probeta para aplicar el esfuerzo de tracción.

La prensa necesita unas condiciones iniciales de trabajo, por ello se aplicaron los siguientes parámetros de configuración:

- Célula de referencia: 300 KN
- Modo de trabajo: Tracción
- Tipo control: Por fuerza
- Precarga: 0,3
- Velocidad: 20 KN/min
- Caída carga: 80
- Detección: 0,3
- Cadencia (ms): 200



Figura 3.2. Prensa automática Mecacisa multiensayo.

Una vez configurada la prensa, se introdujeron las probetas una a una, pinzando la muestra con la mordaza superior y ajustándola después en la mordaza inferior mediante las palancas que poseen. Después, se activó la máquina y se supervisó el proceso del esfuerzo axial de tracción hasta la rotura de la pieza mediante las gráficas suministradas.

Por problemas de stock, en la primera tanda del horno, correspondiente a la temperatura de 600°C, no se pudieron introducir las muestras de dureza y metalografía. Se sustituyó una muestra de las destinadas a la prueba de tracción para realizar el resto de ensayos. Y, por este motivo, para ensayar la tracción de las muestras sometidas a 600°C solo pudimos disponer de dos muestras de cada metal. De manera que nos deja un total de 69 muestras ensayadas a tracción, en lugar de las 75 previstas.

### 3.2.3 Dureza

Para el ensayo de dureza Rockwell se utilizaron las muestras de 50 x 15 mm, una por cada temperatura y enfriamiento, es decir, un total de 25 probetas. Este ensayo consistió en la descarga, con una fuerza normalizada, de un penetrador esférico de acero endurecido sobre la superficie lisa de la probeta, de manera que permite conocer qué resistencia opone el material a la penetración. Para realizar el ensayo se utilizó un durómetro Centaur RB2/200 RN Autocero (Figura 3.3). Con el objetivo de asignar los parámetros adecuados, se determinó la configuración siguiente:

- Acero galvanizado y acero inoxidable: se utilizó la escala HRB, una bola de 1/16" como penetrador y 100 Kg de carga
- Aluminio: se utilizó la escala HRF, bola de 1/16" como penetrador y 60 Kg de carga.

En primer lugar, se lija la superficie de las muestras en las que se ha formado una capa de óxido debido al calor, ya que eso podría sesgar los resultados. Posteriormente, se prepara el durómetro con los parámetros adecuados para el tipo de material, teniendo en cuenta la escala a la que se medirá la muestra. Después se coloca la probeta en la plataforma metálica que está situada debajo del penetrador. A continuación, se realiza la precarga del durómetro, aplicando una pequeña fuerza sobre la probeta con el objetivo de eliminar las tensiones internas. Seguidamente, se descarga el indentador contra la probeta, dejando una huella en la superficie e indicando el valor de la dureza según la escala escogida. Se realizaron 3 descargas por cada probeta para asegurar un resultado fiable.



Figura 3.2. Durómetro Centaur RB2/200 RN Autocero

### 3.2.4 Metalografía

Después de comprobar los resultados de los ensayos anteriores y valorar la viabilidad de cada metal para obtener resultados según la naturaleza del material y el espesor, se decidió aplicar la metalografía únicamente al acero galvanizado. En la metalografía se utilizaron las muestras de 50 x 15 mm, una por cada temperatura y enfriamiento, excluyendo las probetas de 400°C de enfriamiento rápido y lento. Esto se debe a que el proceso para obtener imágenes de la microestructura es un proceso bastante laborioso y, según el diagrama de fases de hierro-carbono sobre la transformación del acero <sup>6</sup>, las diferencias con las probetas de 400 y 600°C no serían apreciables, ya que se encontrarían dentro de la misma fase. Por estos motivos, las excluimos del proceso de la metalografía.

Este ensayo tiene el objetivo de observar la microestructura de los metales para determinar el tamaño de los granos que componen el material y examinar las fases por las que ha pasado, las impurezas que pueda contener y los defectos de fabricación, para relacionarlo con las propiedades físicas y mecánicas.

Para observar las probetas en el microscopio óptico, antes se deben preparar para poder manipularlas de manera adecuada. Primero, se cortaron las muestras por la mitad, para poder tener acceso a la estructura interior de la probeta y para que tuvieran un tamaño más adecuado ya que no se necesita un área muy grande para observar. A continuación, se preparó una superficie de vidrio completamente lisa que hizo de base, aplicándole una vaselina neutra sólida como lubricante (Figura 3.4A). Después, se colocaron encima una serie de anillos metálicos previamente lubricados por el interior, para colocar dentro las mitades de las probetas.



Figura 3.3. Proceso de embudo de las muestras para la metalografía. A) Materiales utilizados. B) Probetas embutidas en resina.

Seguidamente, se preparó resina epoxídica, que se volcó dentro de los anillos con el objetivo de crear una superficie mayor a la existente y lo más plana posible para facilitar el posterior



desbastado (Figura 3.4B). Este preparado se dejó endurecer unas 48 horas para asegurar que el catalizador que contiene la resina reaccionara adecuadamente.

Una vez endurecida la resina y agrandada la superficie de agarre de las probetas para su manipulación, se inició el desbastado de la superficie cortada de las 7 probetas. Se hizo el desbaste de las muestras siguientes:

- Enfriamiento lento: temperaturas de 600°C, 800°C y 1000°C.
- Enfriamiento rápido: temperaturas de 600°C, 800°C y 1000°C.
- Una muestra de temperatura ambiente.

Mediante la máquina de esmerilado Struers Dap-6 y con disco de papel de lija SiC resistente al agua de grano 240, se comienza a desbastar las muestras en una dirección hasta que aparecen líneas en esa dirección y se limpia con agua. Después, se cambia el disco por uno de grano 500 y se desbastan las probetas en una dirección perpendicular a la anterior hasta que estas líneas hacen desaparecer las líneas anteriores y se vuelve a limpiar con agua para eliminar posibles partículas. Se repite el mismo proceso con un papel de grano 1200. Seguidamente, se cambia a otra esmeriladora Struers en la que únicamente se utiliza un plato al que se le añade pasta de diamante de 6µm y aceite para pulir como refrigerante. Este proceso dura hasta que se consigue hacer desaparecer todas las líneas y se empieza a descubrir un acabado espejo. En este caso, además de agua, se limpia la superficie de la muestra con etanol, para facilitar la eliminación de las partículas de polvo de diamante. Se cambia a otra esmeriladora-pulidora Buehler Metaserv a la que se le añade pasta de diamante de 1µm y aceite para pulir y se desbasta hasta que se consigue un acabado totalmente espejo. Se limpia con agua y etanol y se comprueba en el microscopio que no queden líneas ni residuos, sino una superficie totalmente brillante.

Cuando se alcanza este resultado, es el momento de atacar la superficie de la muestra con ácido nítrico durante 3 segundos. Después, se limpia con agua y etanol rápidamente y se seca con aire para eliminar todas las partículas de agua que puedan haber quedado. Se comprueba mediante el microscopio si la microestructura se ha revelado y si se pueden ver los granos que forman el metal. Si no es así, se repite el proceso hasta que se pueden observar los granos de la estructura.

En caso de exceso de ácido nítrico o manchas por no haber eliminado correctamente el agua, debe repetirse parte del proceso pasando de nuevo por la pulidora con polvo de diamante de 1µm y volviendo a ser atacada con el ácido nítrico.

## 4 Resultados y discusión

### 4.1 Afectación por temperatura

Con el objetivo de estudiar las consecuencias de las altas temperaturas se realizó un tratamiento de calor a las muestras. Los resultados revelaron cambios en el aspecto físico según la temperatura aplicada. El aluminio no mostró ningún cambio visual, como se puede apreciar en la figura siguiente (Figura 4.1).

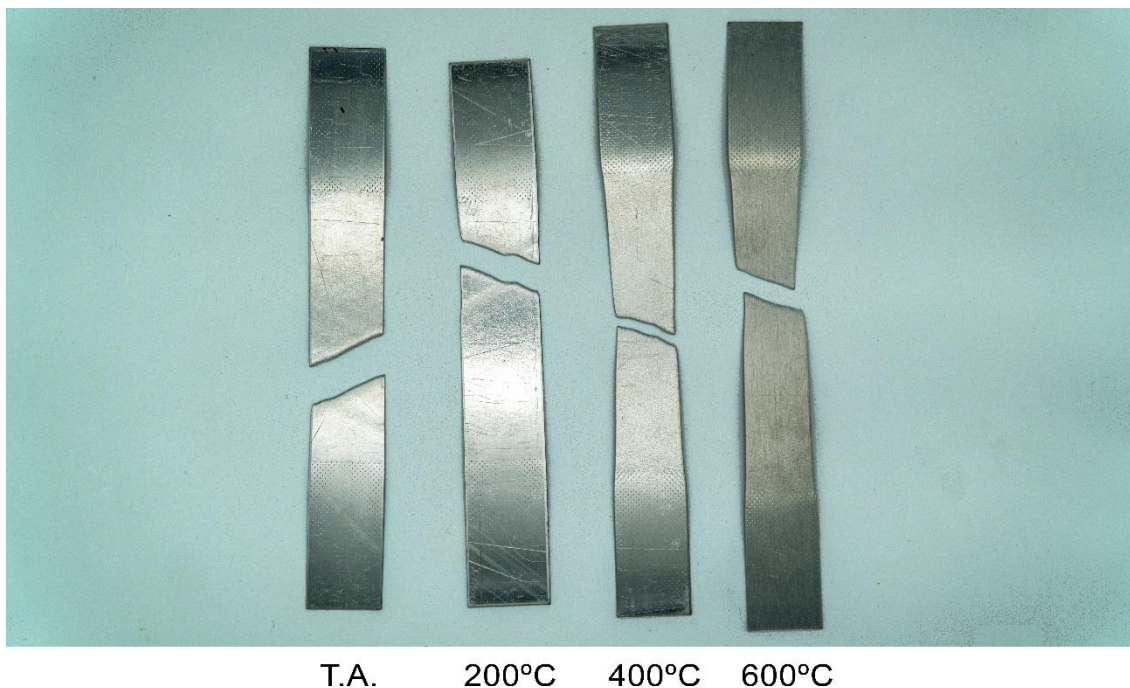


Figura 4.1. Probetas de aluminio tratadas a diferentes temperaturas, después de realizar el ensayo de tracción. No se aprecian cambios de color entre ellas.

En cambio, sí se pudo notar un mayor reblandecimiento a medida que iba aumentando la temperatura. Se notó el cambio en mayor medida en las probetas de 600°C, ya que podían doblarse casi sin esfuerzo.

El hecho de que su superficie no cambiara visualmente podría deberse a que su capa de óxido no varía de color, aunque aumente la temperatura. Por otro lado, que haya habido un reblandecimiento en las probetas de 600°C, podría ser porque han alcanzado una temperatura relativamente cercana a su punto de fusión que se encuentra sobre los 660°C. Si el aluminio es endurecido, puede darse el caso de que con el aumento de temperatura se destruya ese endurecimiento. Además, a temperaturas más bajas pero sometidas a ellas más tiempo, es posible que los precipitados que contiene que hacen que sea duro no se comporten

correctamente, provocando defectos que hacen que se reblandezca y destruya sus propiedades mecánicas.

El acero inoxidable mostró cambios en cada una de las temperaturas. En la figura 4.2 se puede ver como a medida que aumenta la temperatura el color va variando, adoptando una tonalidad diferente con el calor. Primeramente, adopta un color dorado, que se va oscureciendo y volviéndose irisado con tonos azules y lilas. Después, se oscurece aún más volviéndose marrón grisáceo, hasta que finalmente, con una temperatura de 1000°C se torna de un color verde oscuro. Además, también se puede observar, que las probetas han ido perdiendo su rigidez a medida que ha aumentado la temperatura.

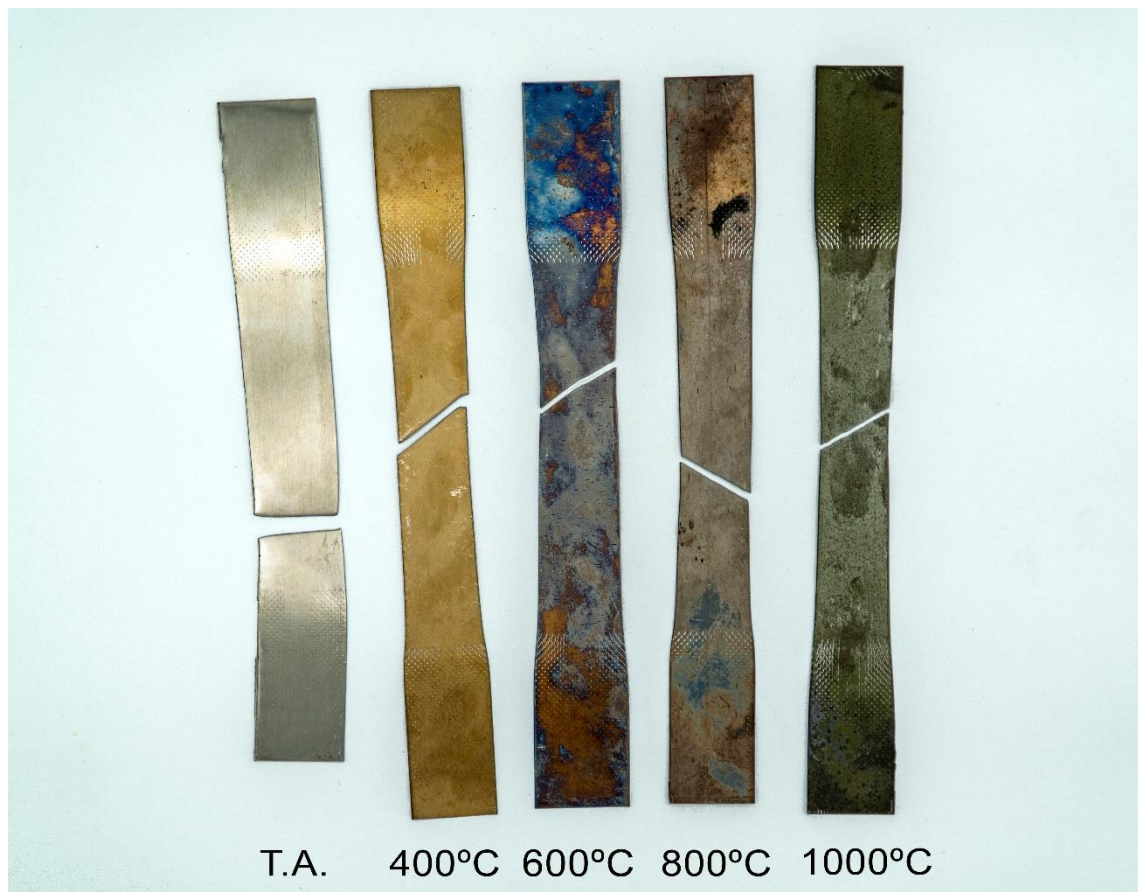


Figura 4.2. Probetas de acero inoxidable tratadas a diferentes temperaturas, después de realizar el ensayo de tracción. Se puede apreciar cambios de color a medida que aumenta la temperatura.

Ese cambio de forma podría deberse a que con las altas temperaturas va perdiendo rigidez y está más predispuesto a doblarse o torcerse.

El cambio de color podría ser resultado de la creación de una pátina de óxido que se va generando poco a poco a medida que va aumentando la temperatura. Esta pátina estaría

causada por el cromo que contiene el material creando, finalmente, un óxido de cromo de color verdoso que actuaría como capa protectora del acero.

En el acero galvanizado (Figura 4.3) también podemos observar importantes cambios de color, aunque, al contrario que con el acero inoxidable, el galvanizado no ha perdido su rigidez. Este material no ha sufrido apenas cambios en su muestra a 400°C con respecto a la que está a temperatura ambiente. Sin embargo, al llegar a 600°C observamos un color más oscuro y totalmente mate. En su variante a 800°C se aprecia un importante cambio con respecto a las anteriores, ha adoptado un color amarillo y ha comenzado a desprenderse una fina capa de material. Finalmente, en las muestras a 1000°C, podemos ver como esa capa ha aumentado de espesor, ha cambiado de color y ha comenzado a desprenderse por láminas.

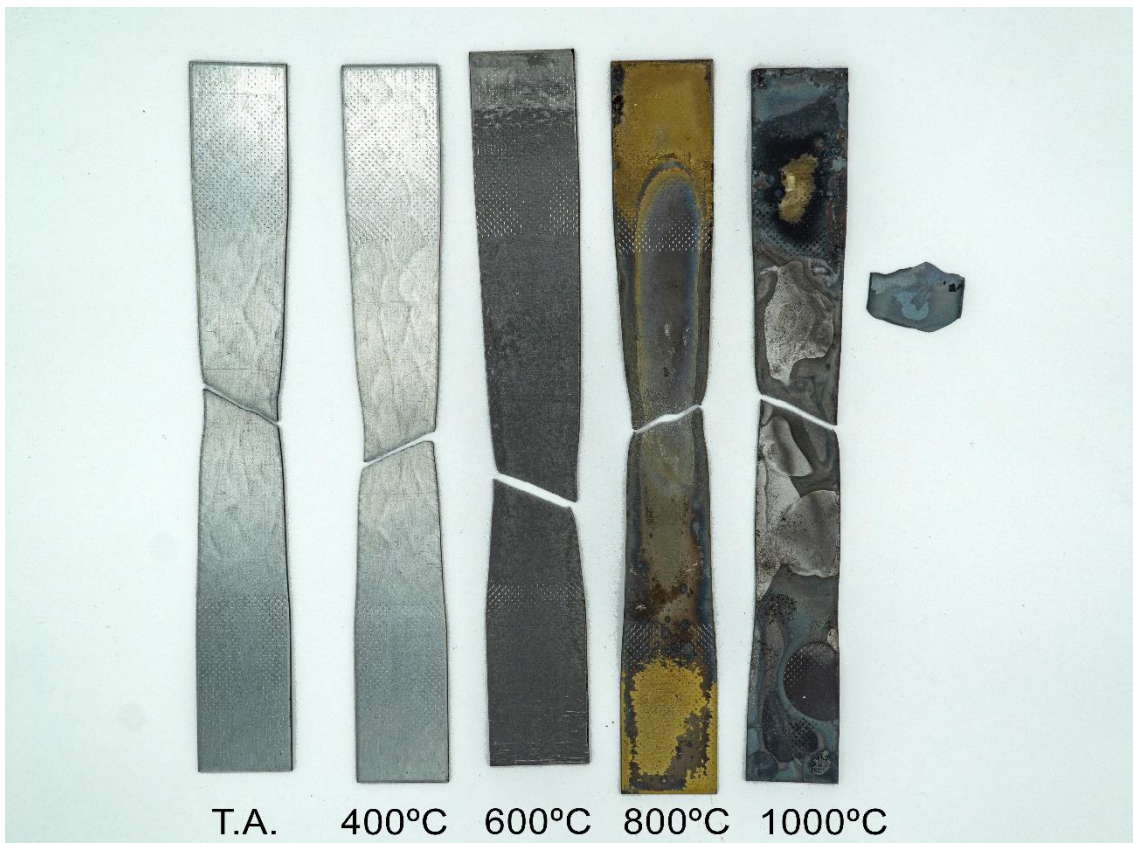


Figura 4.3. Probetas de acero galvanizado tratadas a diferentes temperaturas, después de realizar el ensayo de tracción. Se puede apreciar que el zinc se desprende a medida que aumenta la temperatura.

Esta capa que se ha ido creando y finalmente se ha desprendido podría ser causada por el tratamiento de zinc que tiene el acero galvanizado. Al aumentar de temperatura, el zinc, que empieza a fundir a unos 400°C, se ha comenzado a hacer líquido, hasta que finalmente, ha adoptado un estado completamente líquido y al enfriarse, ha comenzado a desprenderse del acero por láminas.

## 4.2 Ensayo de Tracción

Para tratar de exponer los resultados del ensayo de tracción, primero, hay que explicar un fenómeno llamado *Acomodación de mordaza*. De forma resumida, este fenómeno consiste en la interacción del material a ensayar con la mordaza que sujeta la probeta. En el momento en que se inicia el ensayo, la mordaza comienza a tirar de la probeta. En ese instante, los dos elementos interactúan, provocando que la gráfica resultante comience como una parábola, en lugar de empezar con una recta como sería en un caso ideal. Debido a que cada probeta tarda un tiempo diferente en este proceso, se ha eliminado este periodo de las gráficas para que resulten más comparables y puedan verse realmente los cambios en la tensión y el alargamiento. Por este motivo, cada conjunto de probetas de un mismo material comenzará a compararse desde el mismo punto de tensión, justo en el momento en que desaparece este efecto.

Las siguientes gráficas Tensión-Deformación(%) son los resultados del ensayo de tracción de las probetas de aluminio, una vez los datos se han convertido a las unidades adecuadas para su representación.

Se aplica la siguiente nomenclatura para definir el nombre de cada probeta:

- AMB: temperatura ambiente
  - 200, 400, 600: temperaturas de tratamiento de calor
  - L: enfriamiento lento
  - R: enfriamiento rápido
- 
- Aluminio - Enfriamiento lento:

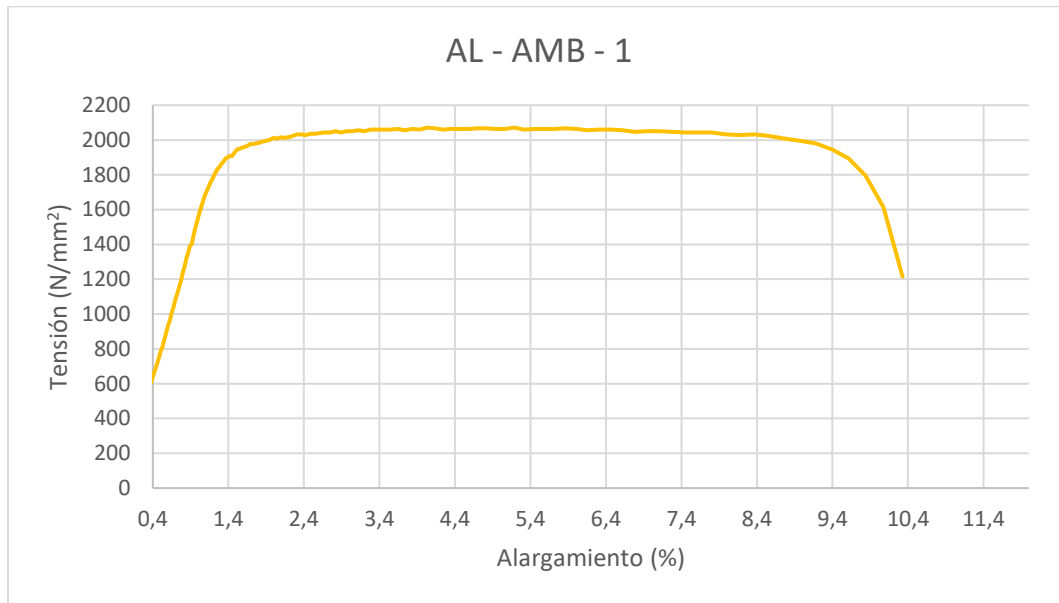


Figura 4.4. Gráfica Tensión-Deformación correspondiente a la probeta 1 de aluminio ensayada a temperatura ambiente.

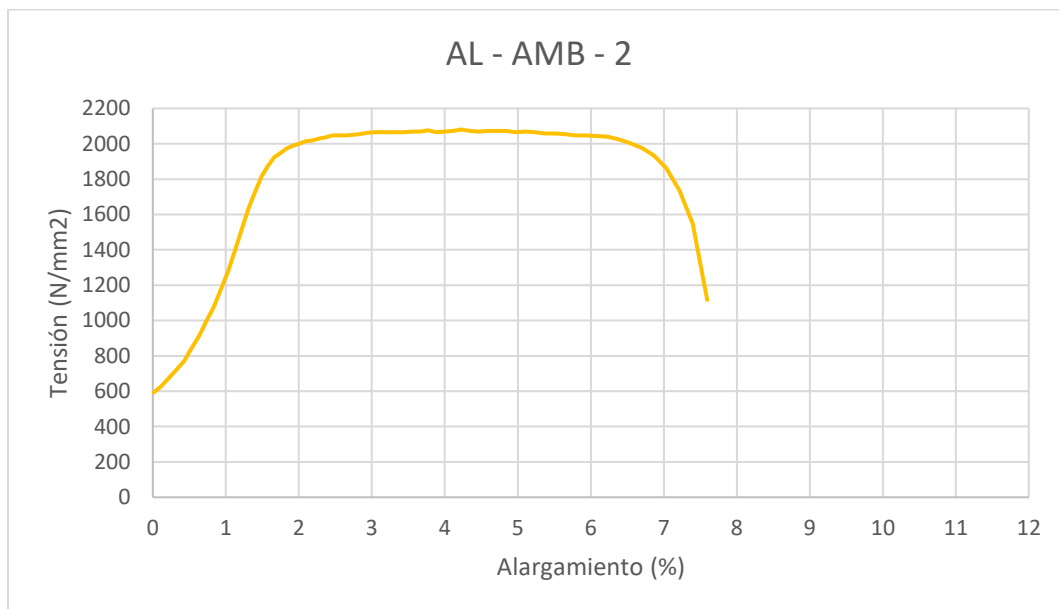


Figura 4.5. Gráfica Tensión-Deformación correspondiente a la probeta 2 de aluminio ensayada a temperatura ambiente.

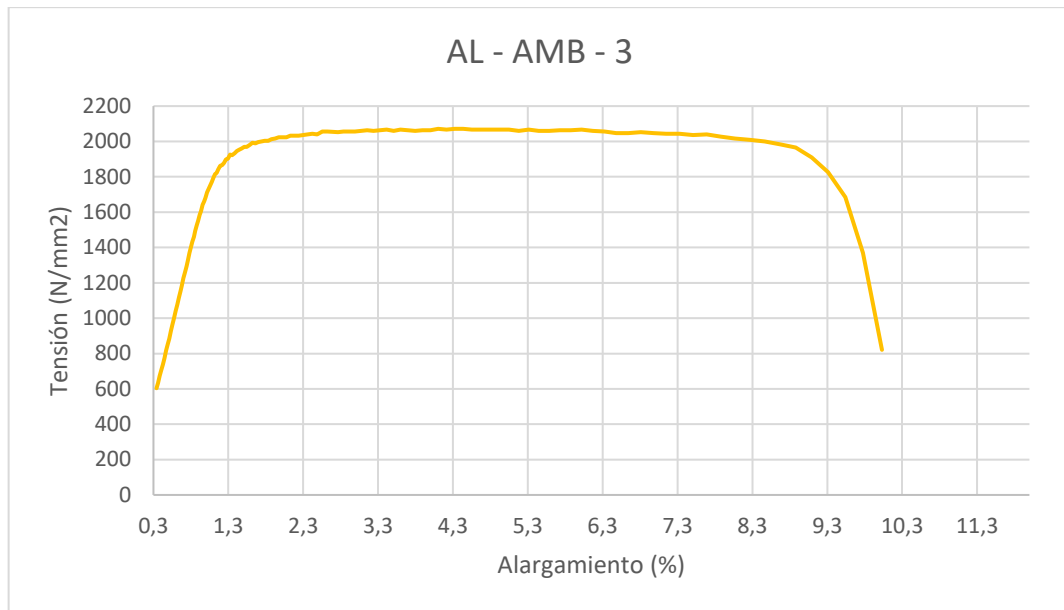


Figura 4.6. Gráfica Tensión-Deformación correspondiente a la probeta 3 de aluminio ensayada a temperatura ambiente.

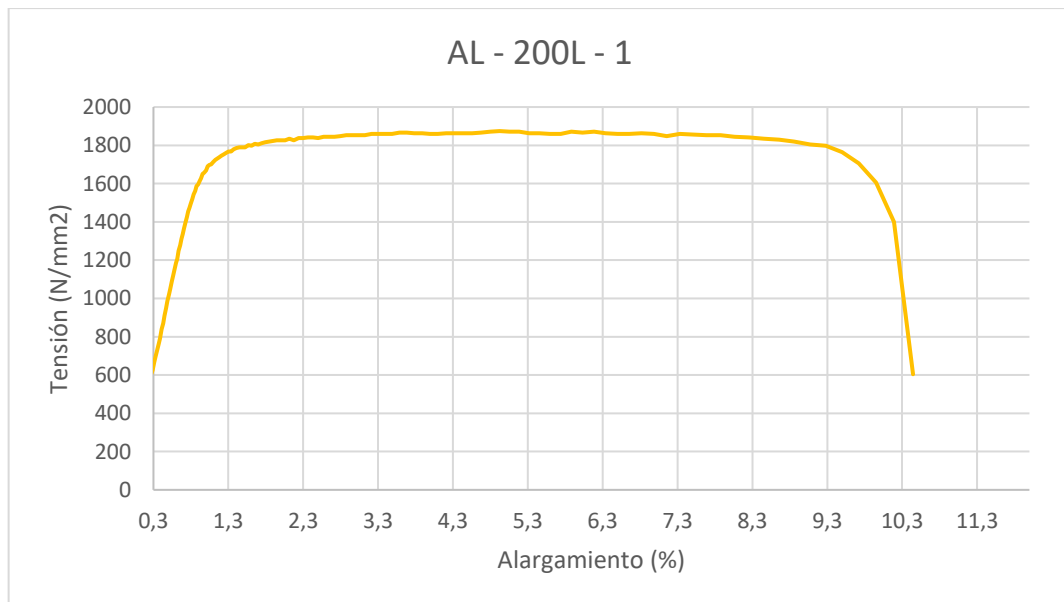


Figura 4.7. Gráfica Tensión-Deformación correspondiente a la probeta 1 de aluminio ensayada a 200°C enfriada lentamente.

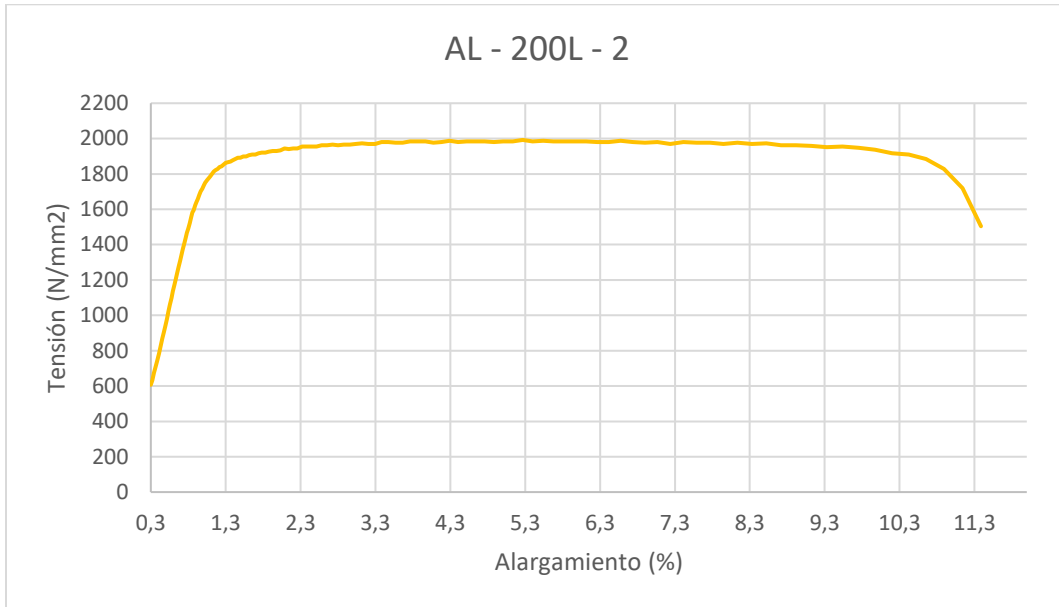


Figura 4.8. Gráfica Tensión-Deformación correspondiente a la probeta 2 de aluminio ensayada a 200°C enfrida lentamente.

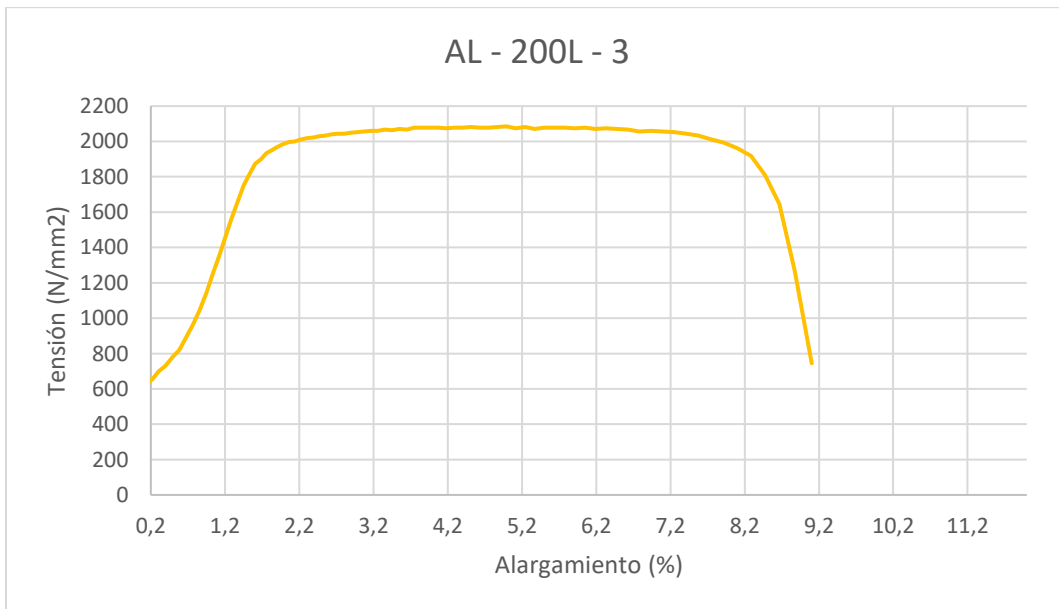


Figura 4.9. Gráfica Tensión-Deformación correspondiente a la probeta 3 de aluminio ensayada a 200°C enfrida lentamente.



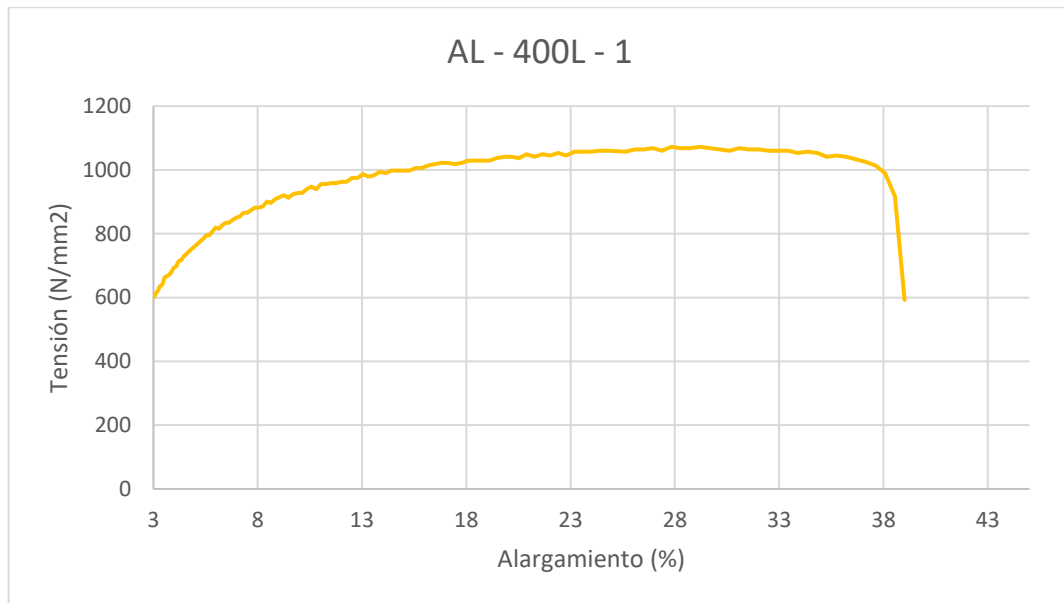


Figura 4.10. Gráfica Tensión-Deformación correspondiente a la probeta 1 de aluminio ensayada a 400°C enfrizada lentamente.

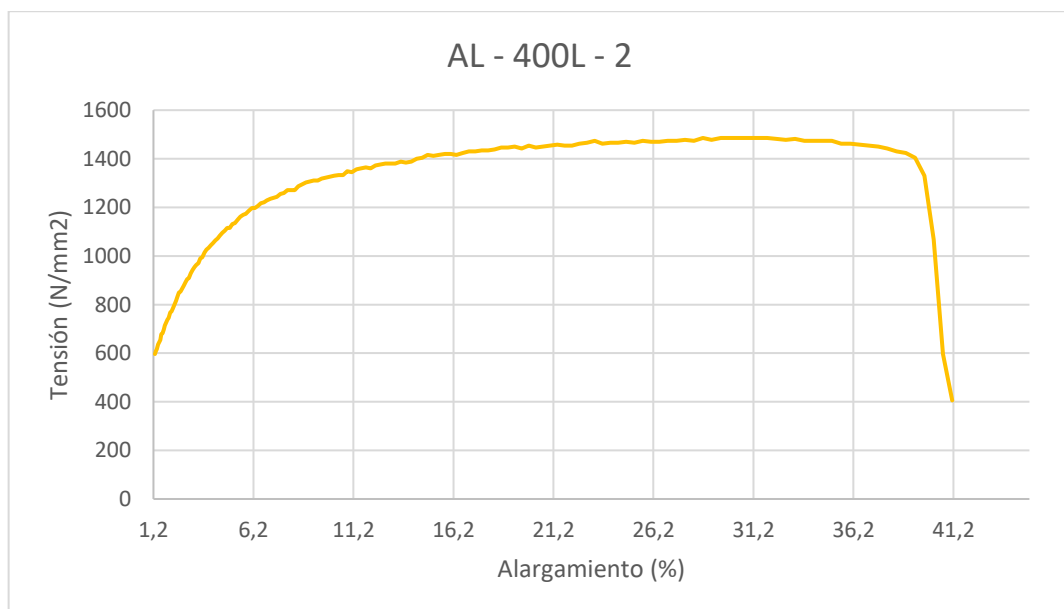


Figura 4.11. Gráfica Tensión-Deformación correspondiente a la probeta 2 de aluminio ensayada a 400°C enfrizada lentamente.

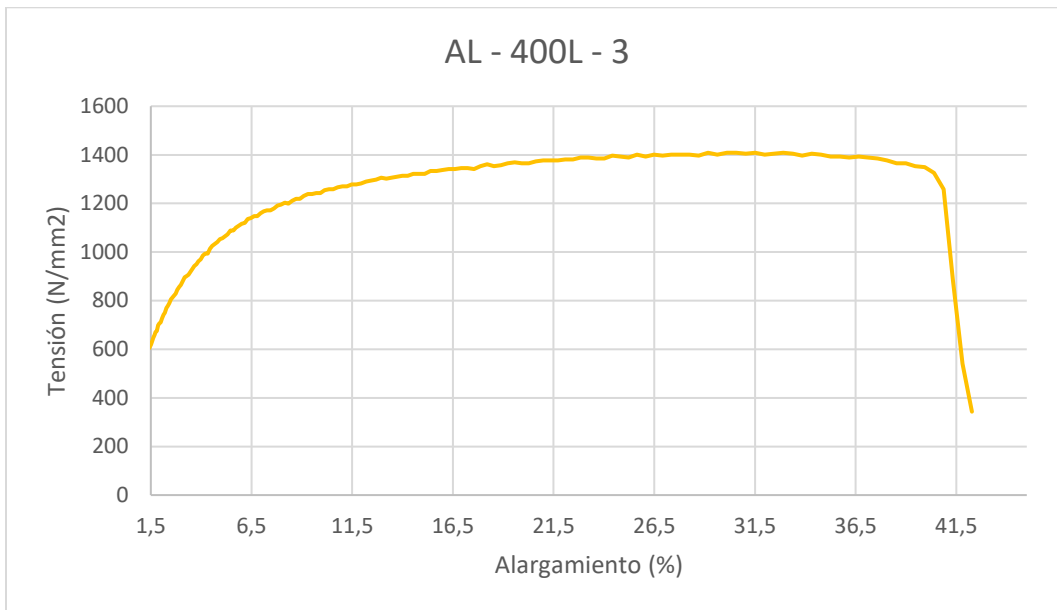


Figura 4.12. Gráfica Tensión-Deformación correspondiente a la probeta 3 de aluminio ensayada a 400°C enfriada lentamente.

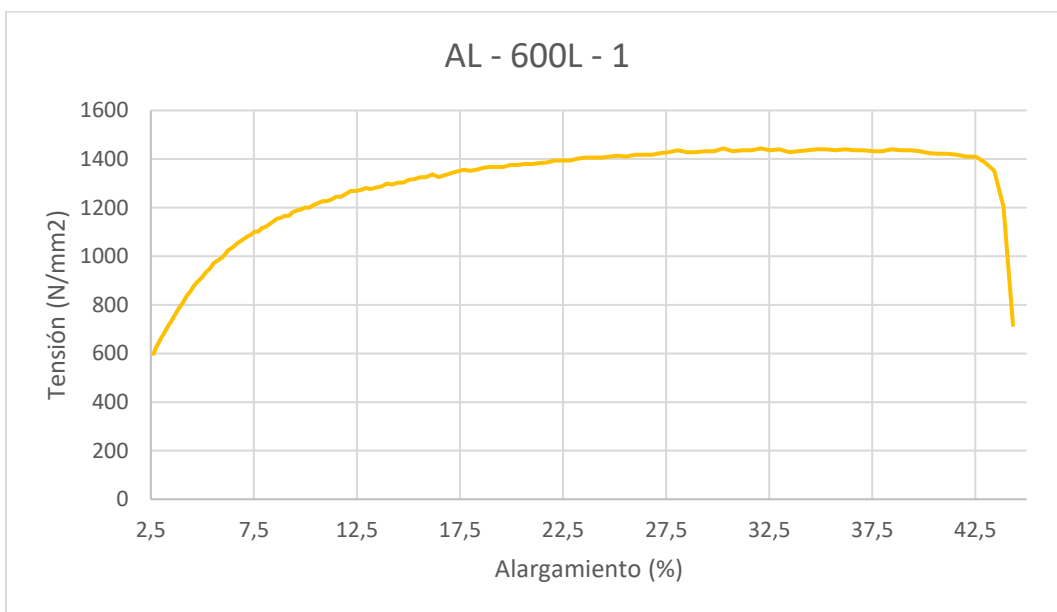


Figura 4.13. Gráfica Tensión-Deformación correspondiente a la probeta 1 de aluminio ensayada a 600°C enfriada lentamente.

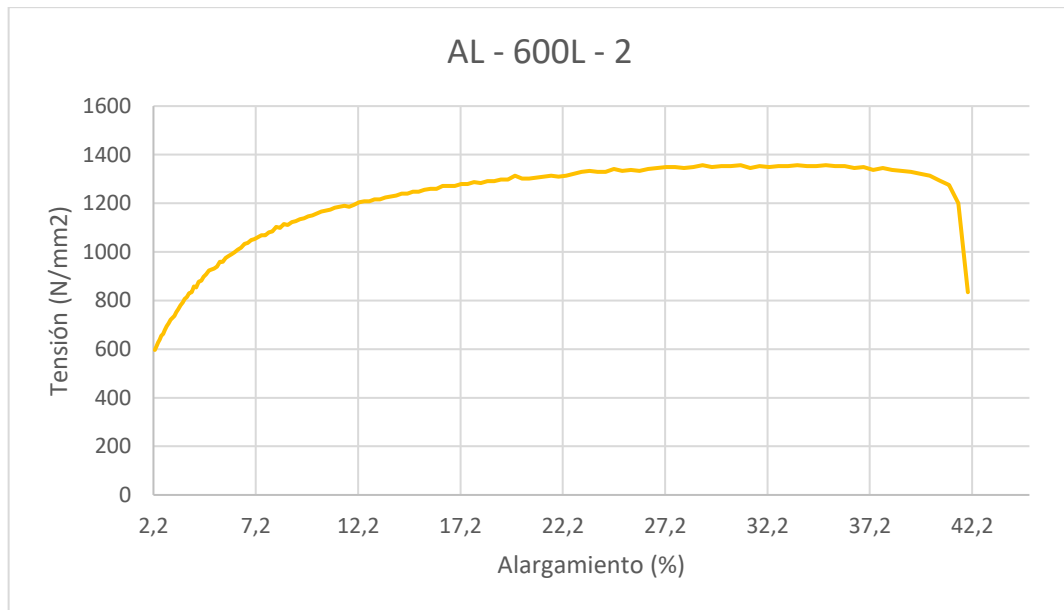


Figura 4.14. Gráfica Tensión-Deformación correspondiente a la probeta 2 de aluminio ensayada a 600°C enfriada lentamente.

- Aluminio – Enfriamiento rápido:

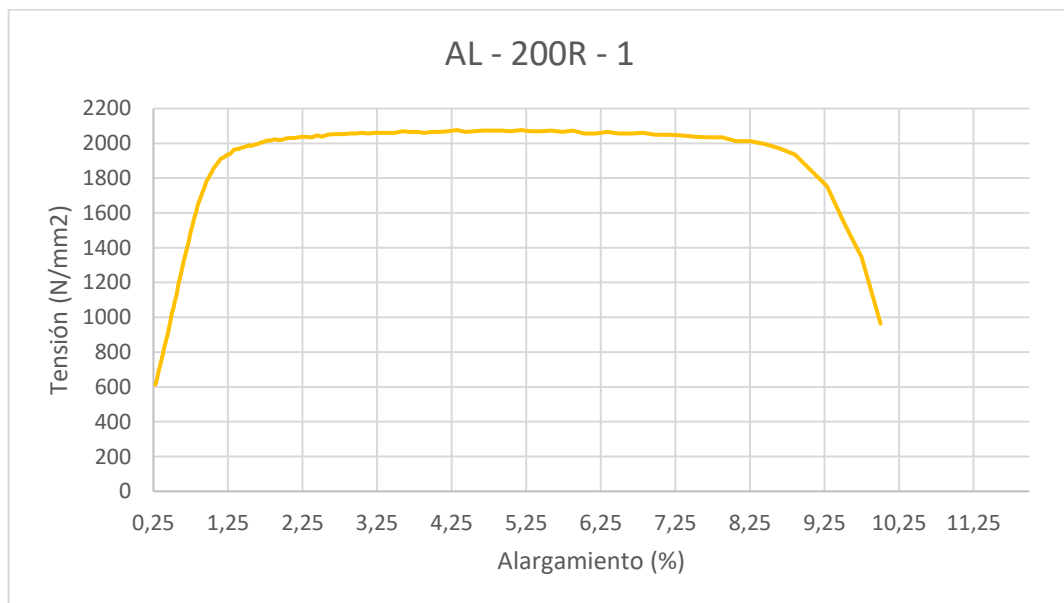


Figura 4.15. Gráfica Tensión-Deformación correspondiente a la probeta 1 de aluminio ensayada a 200°C enfriada rápidamente.

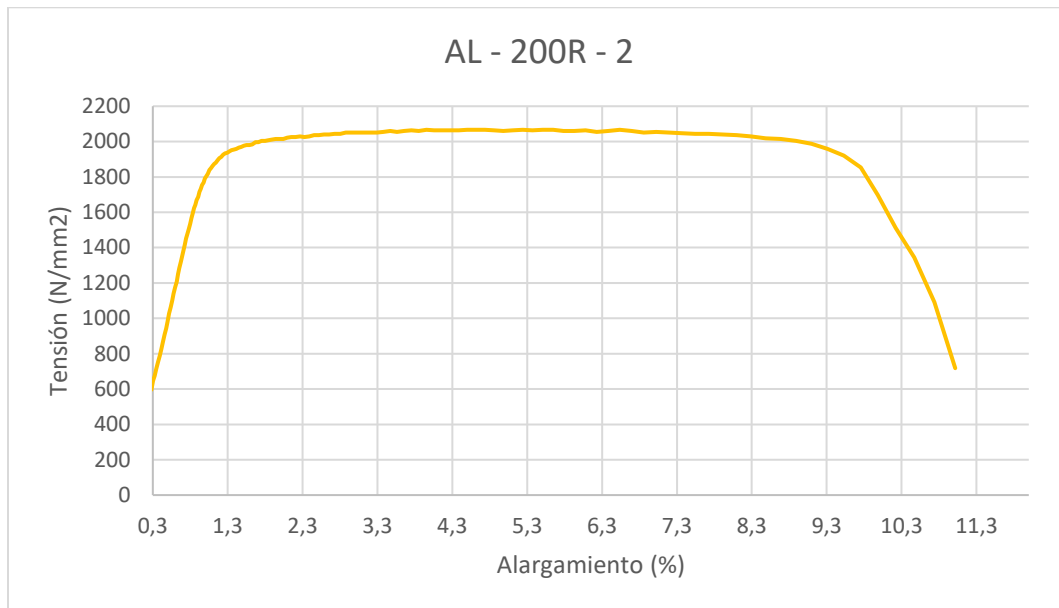


Figura 4.16. Gráfica Tensión-Deformación correspondiente a la probeta 2 de aluminio ensayada a 200°C enfriada rápidamente.

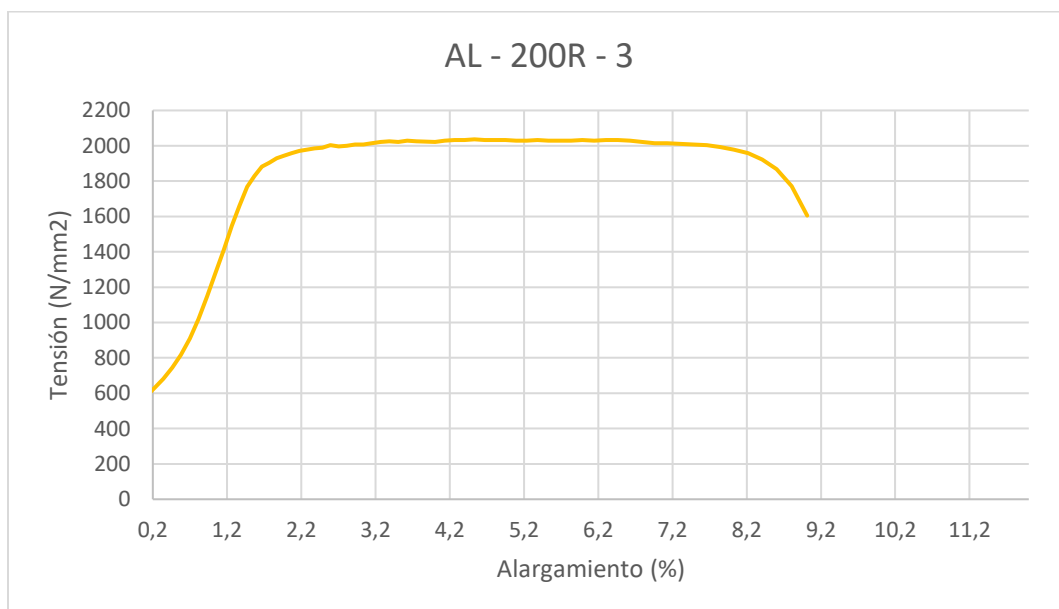


Figura 4.17. Gráfica Tensión-Deformación correspondiente a la probeta 3 de aluminio ensayada a 200°C enfriada rápidamente.

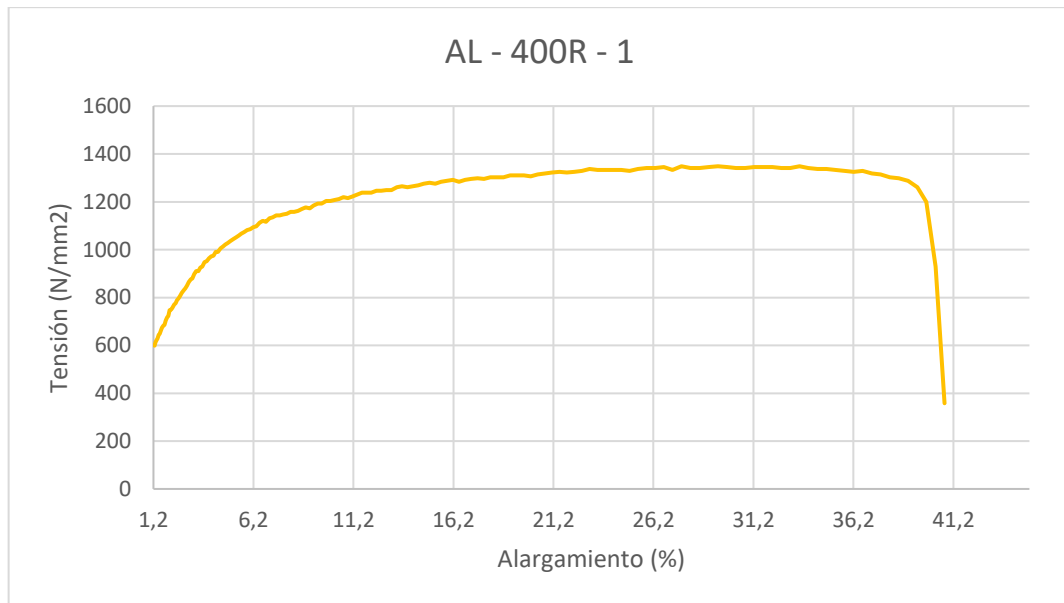


Figura 4.18. Gráfica Tensión-Deformación correspondiente a la probeta 1 de aluminio ensayada a 400°C enfriada rápidamente.

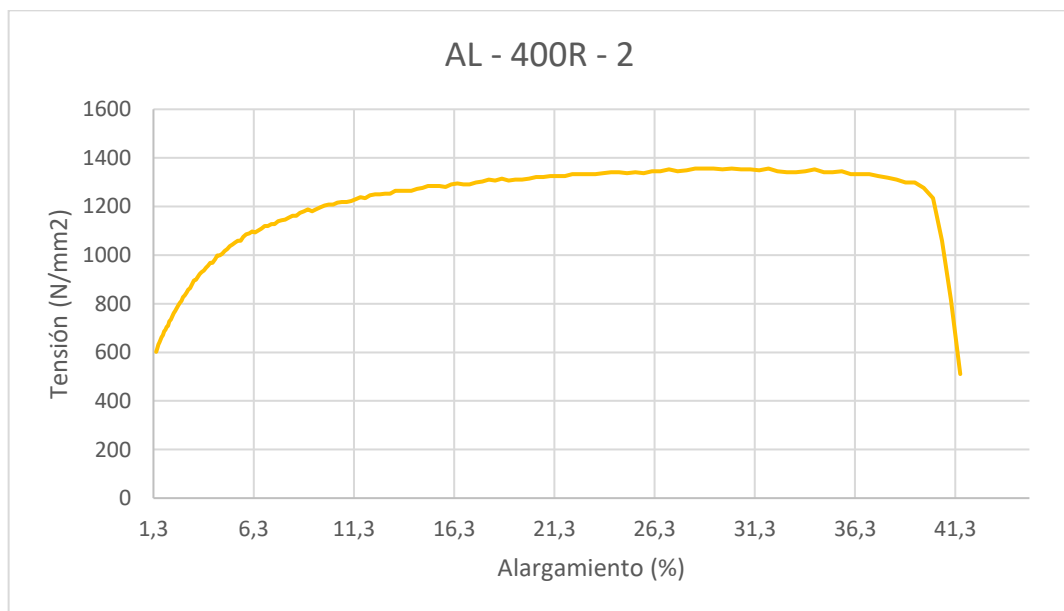


Figura 4.19. Gráfica Tensión-Deformación correspondiente a la probeta 2 de aluminio ensayada a 400°C enfriada rápidamente.

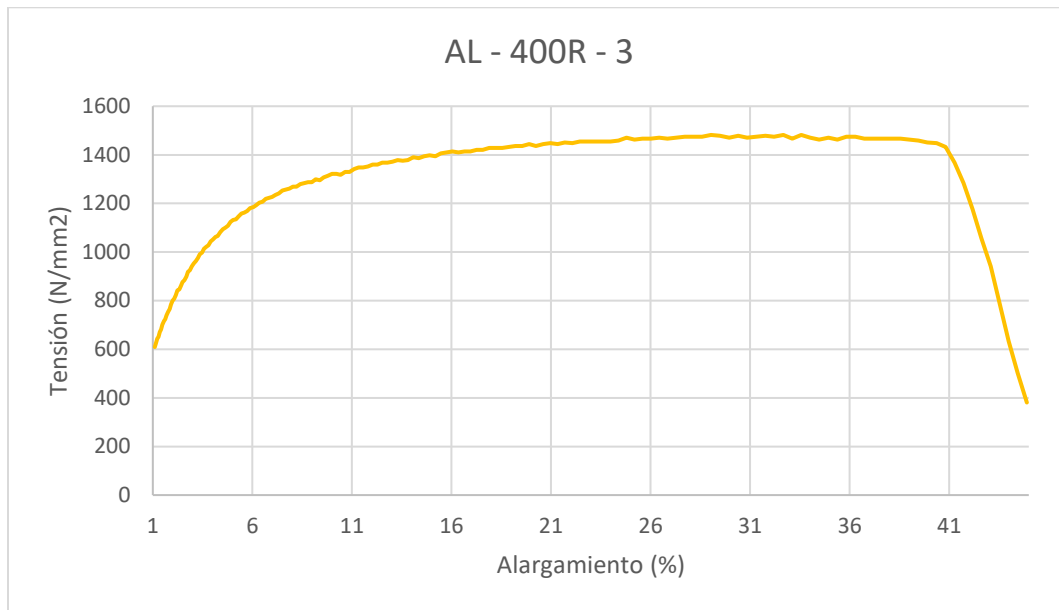


Figura 4.20. Gráfica Tensión-Deformación correspondiente a la probeta 3 de aluminio ensayada a 400°C enfrizada rápidamente.

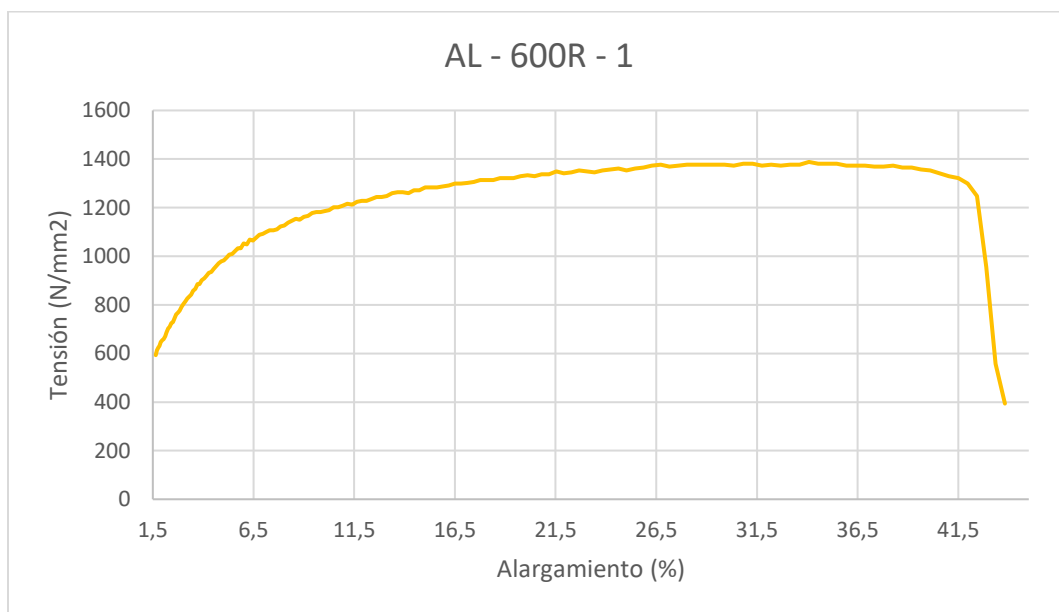


Figura 4.21. Gráfica Tensión-Deformación correspondiente a la probeta 1 de aluminio ensayada a 600°C enfrizada rápidamente.

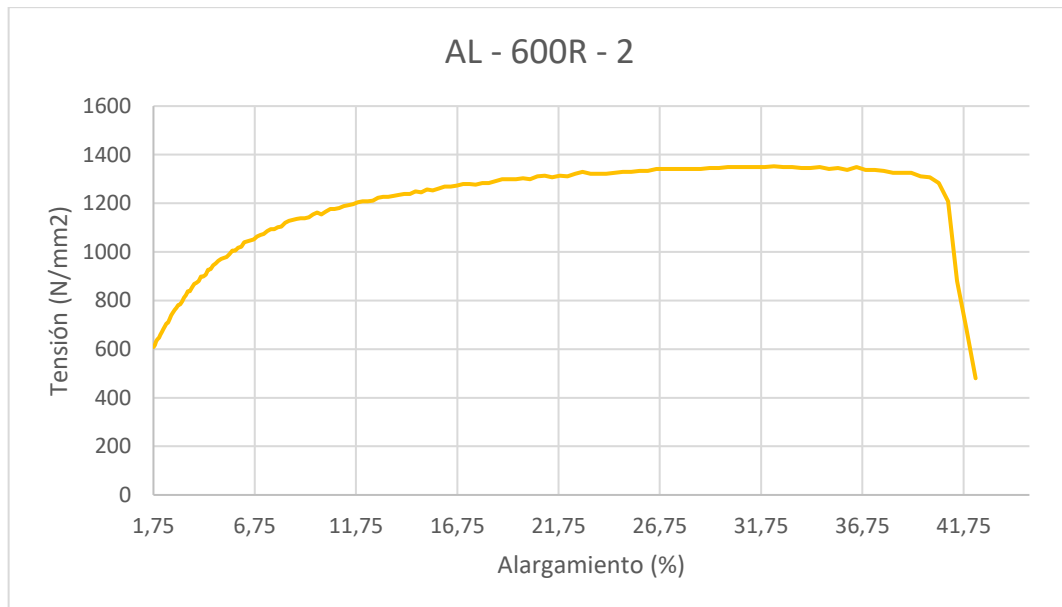


Figura 4.22. Gráfica Tensión-Deformación correspondiente a la probeta 2 de aluminio ensayada a 600°C enfriada rápidamente.

En las gráficas generadas en el ensayo de tracción de las probetas de aluminio (Figura 4.4 a figura 4.22), se puede observar una progresión de descenso de la tensión a medida que aumenta la temperatura. A su vez, el alargamiento se ve incrementado considerablemente con el aumento de la temperatura. Este hecho sucede tanto en las probetas enfriadas lentamente, como en las enfriadas rápidamente.

El efecto se puede apreciar mejor en las siguientes gráficas (Figura 4.23 y figura 4.24), en las que se aprecia claramente un aumento considerable del alargamiento que sufren las probetas a medida que disminuye la tensión y aumenta la temperatura.

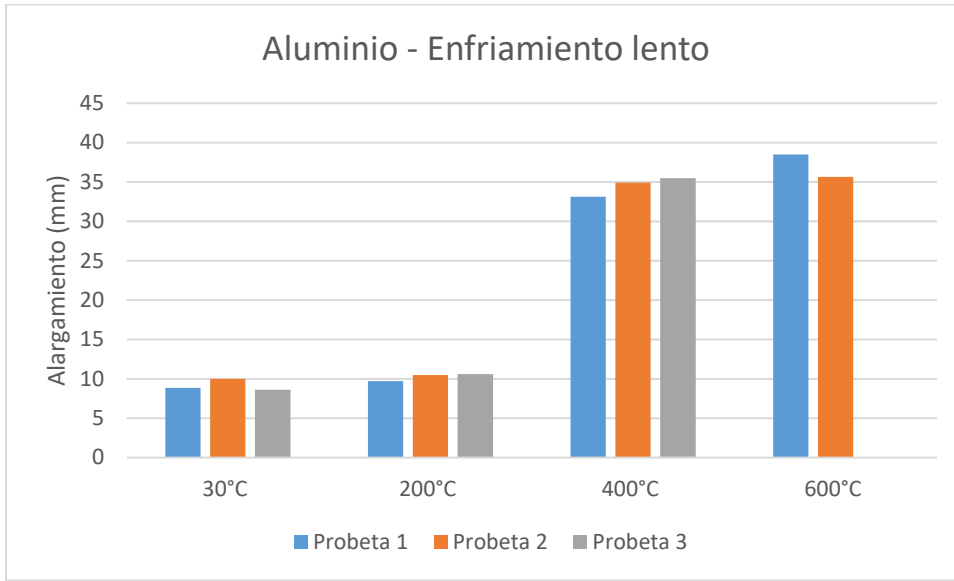


Figura 4.23. Gráfica Alargamiento-Temperatura generada a partir de los alargamientos máximos de cada probeta de aluminio enfriada lentamente en función de la temperatura.

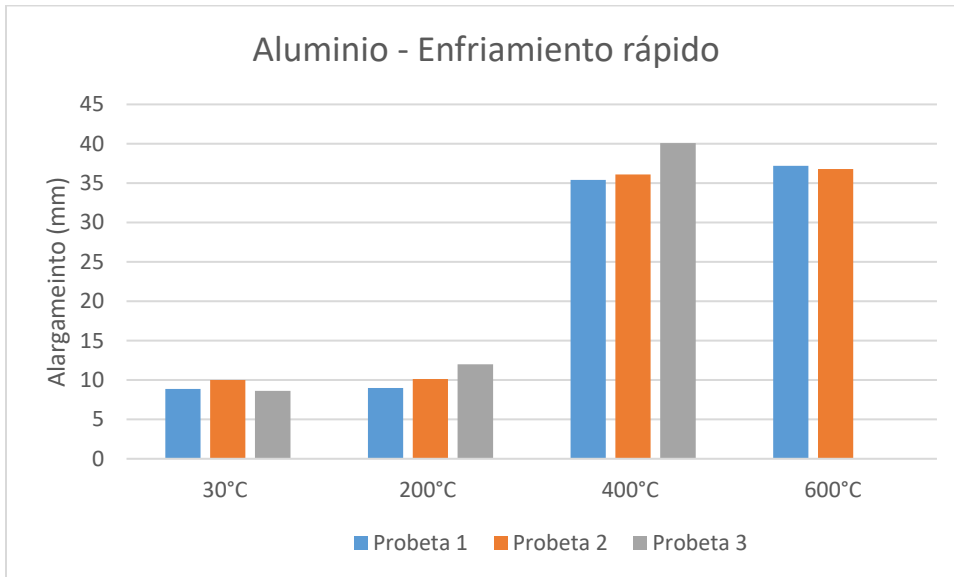


Figura 4.24. Gráfica Alargamiento-Temperatura generada a partir de los alargamientos máximos de cada probeta de aluminio enfriada rápidamente en función de la temperatura.



Este fenómeno se debe a que la microestructura de los metales está compuesta por granos que son susceptibles al calor, como se ha explicado anteriormente. Así pues, los granos de los metales se agrandan con el aumento de temperatura, se produce un efecto de “relajación” de los granos y disminuye la tensión.

Por otro lado, el alargamiento se ve afectado de manera que a menos tensión más alargamiento, ya que es una magnitud que está correlacionada negativamente con la tensión, cuando una aumenta la otra disminuye y viceversa. Al estar los granos distendidos, resulta más fácil el alargamiento del material y por ese motivo aumenta considerablemente.

El enfriamiento no influye en este proceso ya que este efecto está relacionado solo con el calentamiento, por ese motivo, ambas muestras tienen resultados similares y no muestran grandes diferencias entre sí.

Las siguientes gráficas Tensión-Deformación(%) son los resultados del ensayo de tracción de las probetas de acero inoxidable, una vez los datos se han convertido a las unidades adecuadas para su representación.

Se aplica la siguiente nomenclatura para definir el nombre de cada probeta:

- AMB: temperatura ambiente
- 400, 600, 800, 1000: temperaturas de tratamiento de calor
- L: enfriamiento lento
- R: enfriamiento rápido

- Acero inoxidable - Enfriamiento lento:

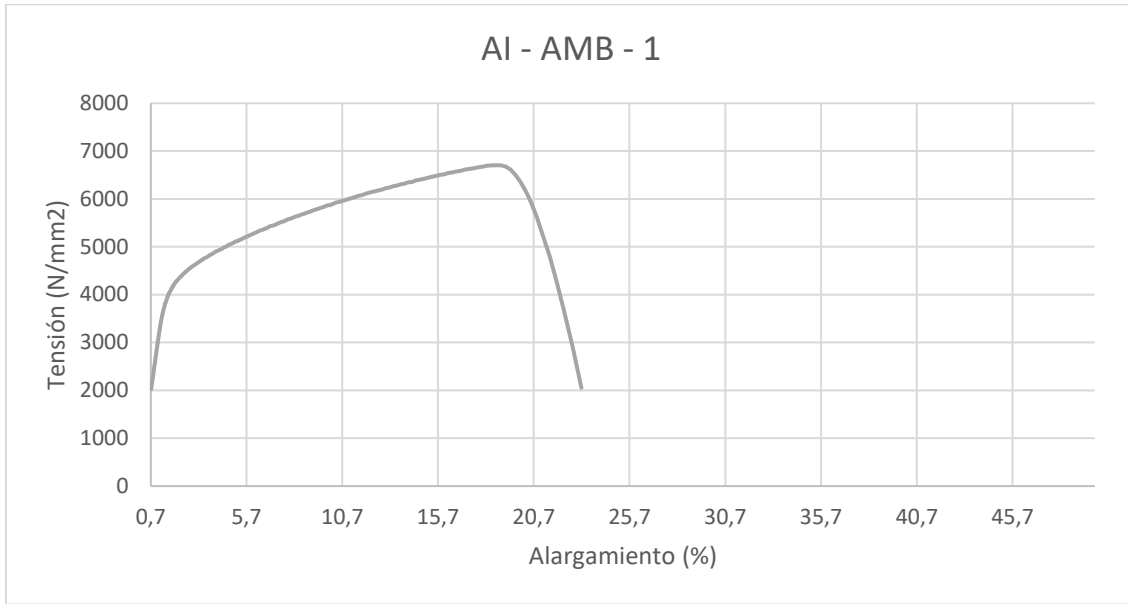


Figura 4.25. Gráfica Tensión-Deformación correspondiente a la probeta 1 de acero inoxidable ensayada a temperatura ambiente.

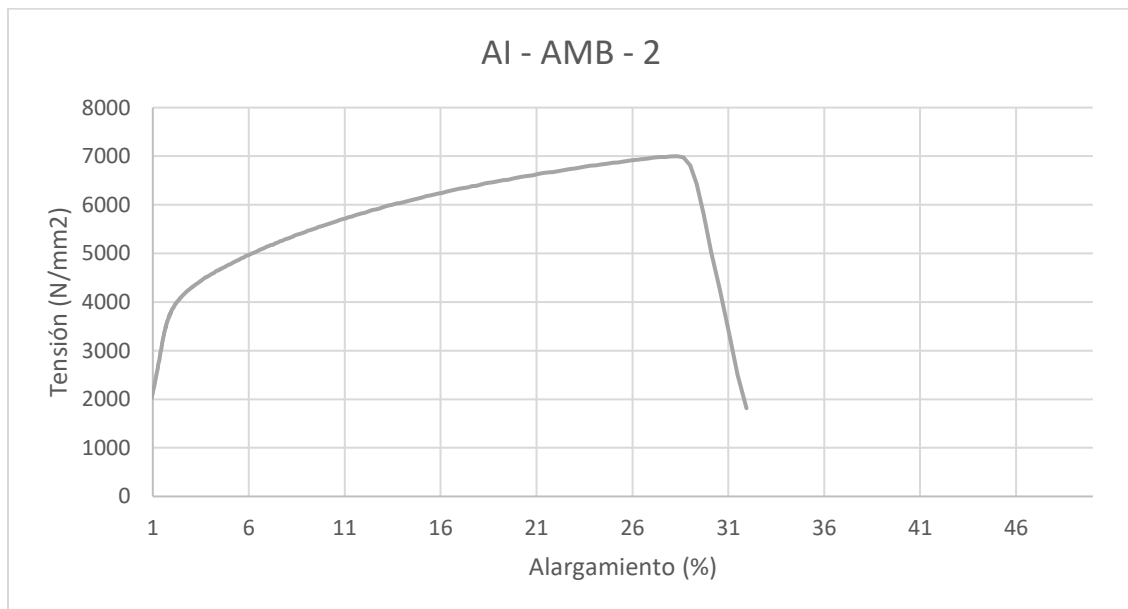


Figura 4.26. Gráfica Tensión-Deformación correspondiente a la probeta 2 de acero inoxidable ensayada a temperatura ambiente.

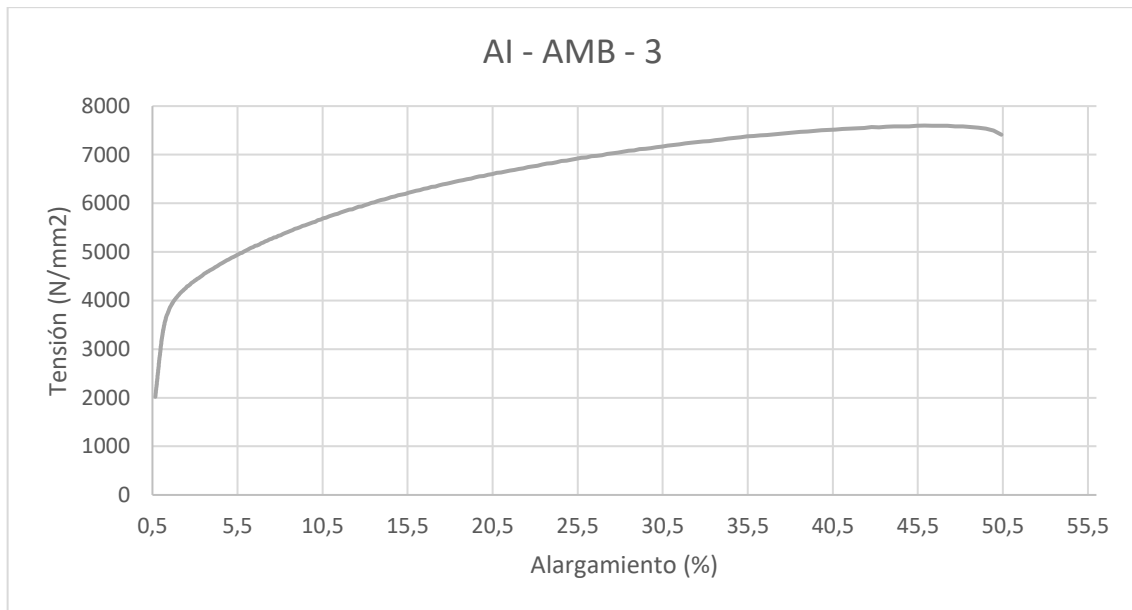


Figura 4.27. Gráfica Tensión-Deformación correspondiente a la probeta 3 de acero inoxidable ensayada a temperatura ambiente.

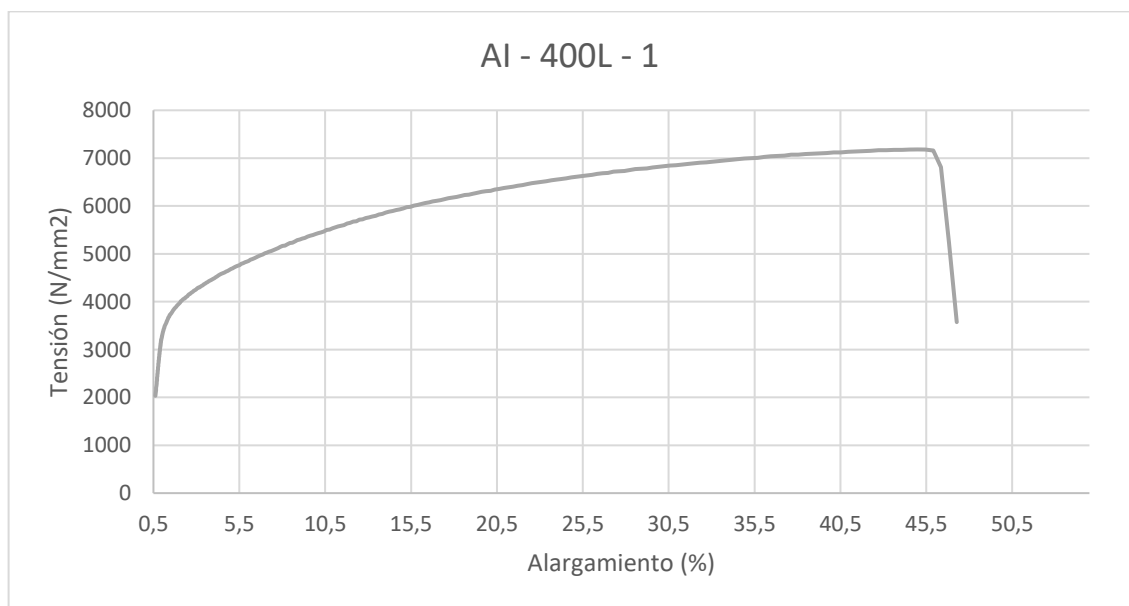


Figura 4.28. Gráfica Tensión-Deformación correspondiente a la probeta 1 de acero inoxidable ensayada a 400°C enfriada lentamente.

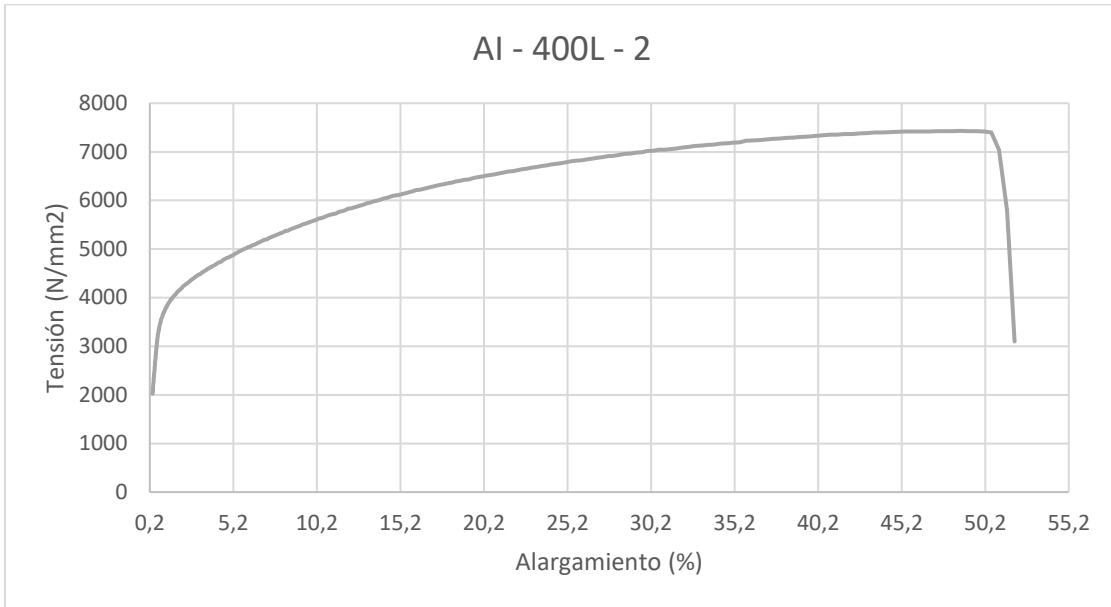


Figura 4.29. Gráfica Tensión-Deformación correspondiente a la probeta 2 de acero inoxidable ensayada a 400°C enfriada lentamente.

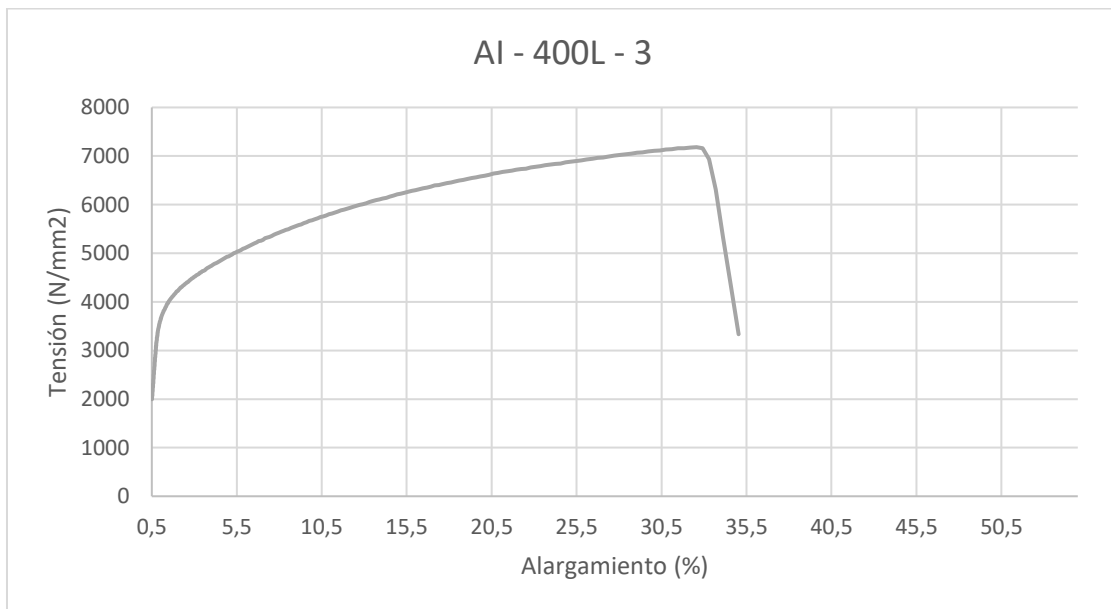


Figura 4.30. Gráfica Tensión-Deformación correspondiente a la probeta 3 de acero inoxidable ensayada a 400°C enfriada lentamente.

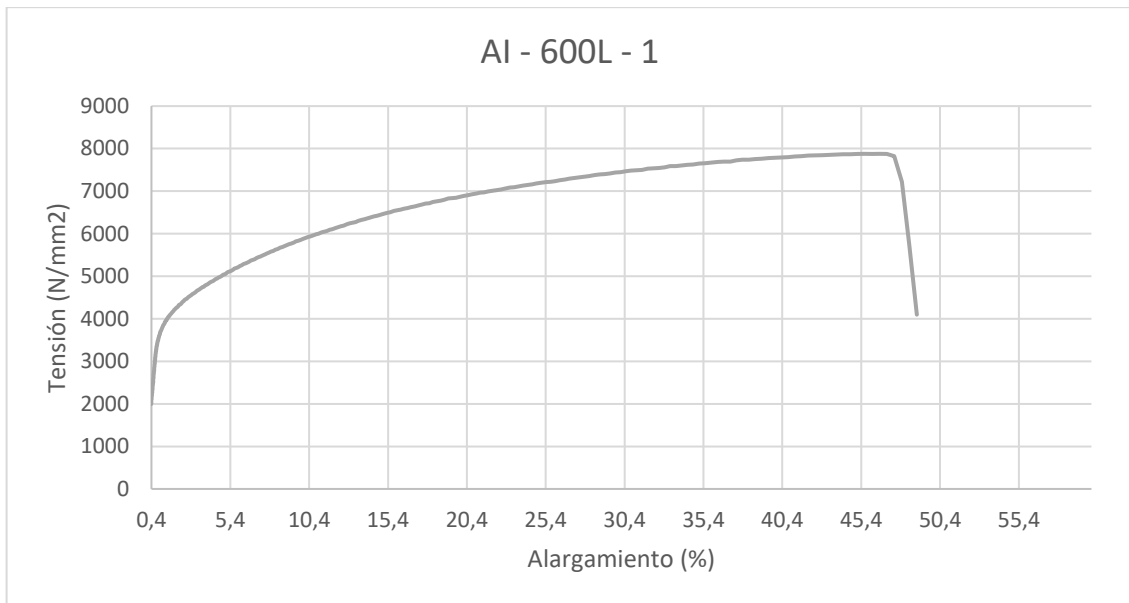


Figura 4.31. Gráfica Tensión-Deformación correspondiente a la probeta 1 de acero inoxidable ensayada a 600°C enfriada lentamente.

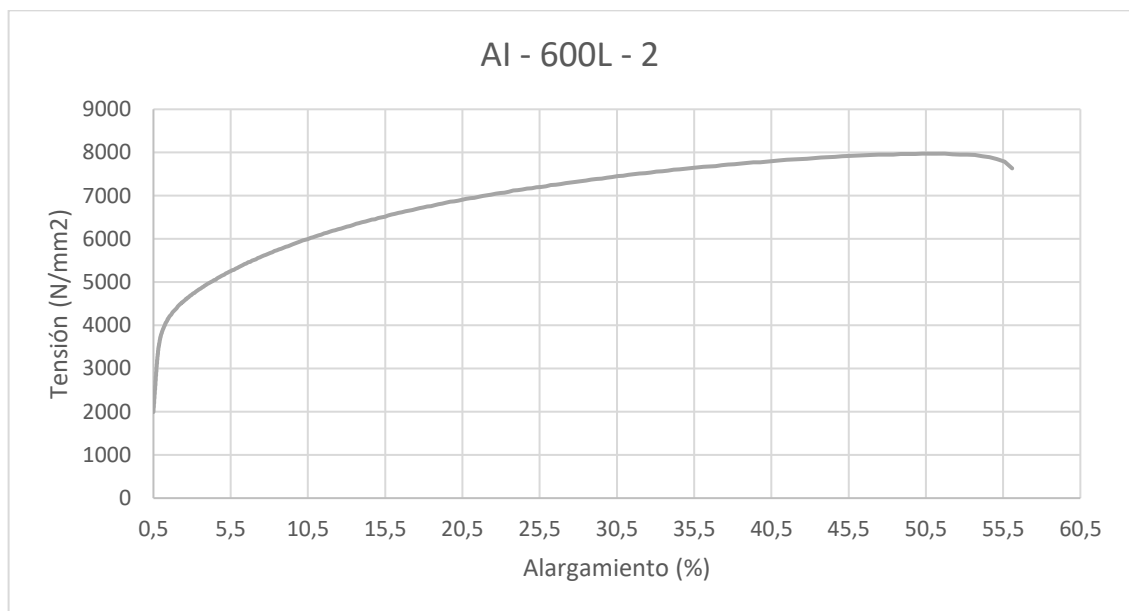


Figura 4.32. Gráfica Tensión-Deformación correspondiente a la probeta 2 de acero inoxidable ensayada a 600°C enfriada lentamente.

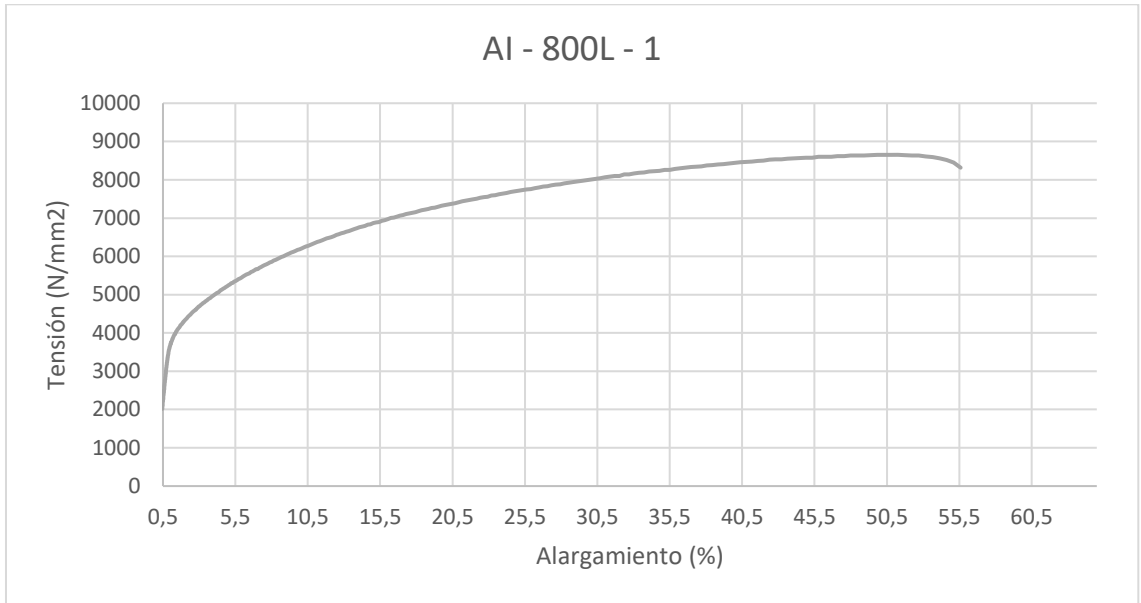


Figura 4.33. Gráfica Tensión-Deformación correspondiente a la probeta 1 de acero inoxidable ensayada a 800°C enfriada lentamente.

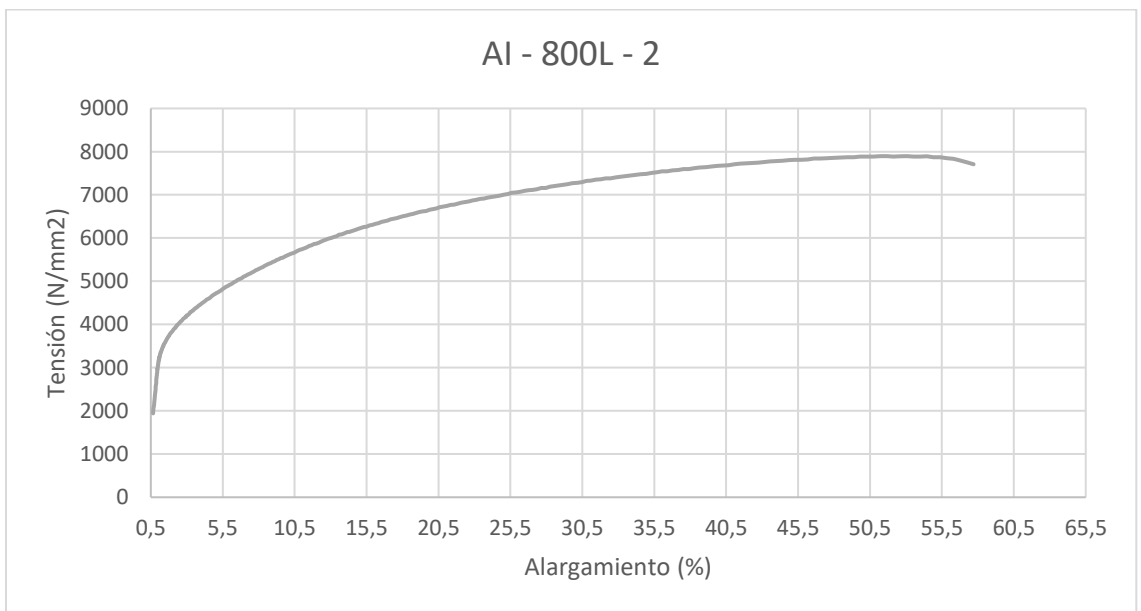


Figura 4.34. Gráfica Tensión-Deformación correspondiente a la probeta 2 de acero inoxidable ensayada a 800°C enfriada lentamente.

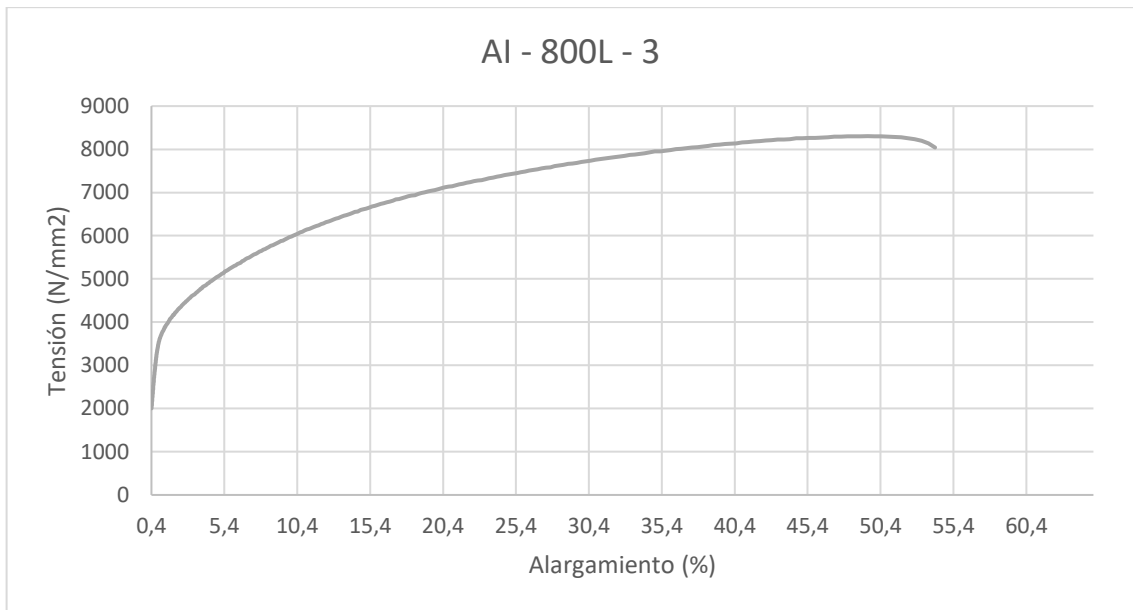


Figura 4.35. Gráfica Tensión-Deformación correspondiente a la probeta 3 de acero inoxidable ensayada a 800°C enfriada lentamente.

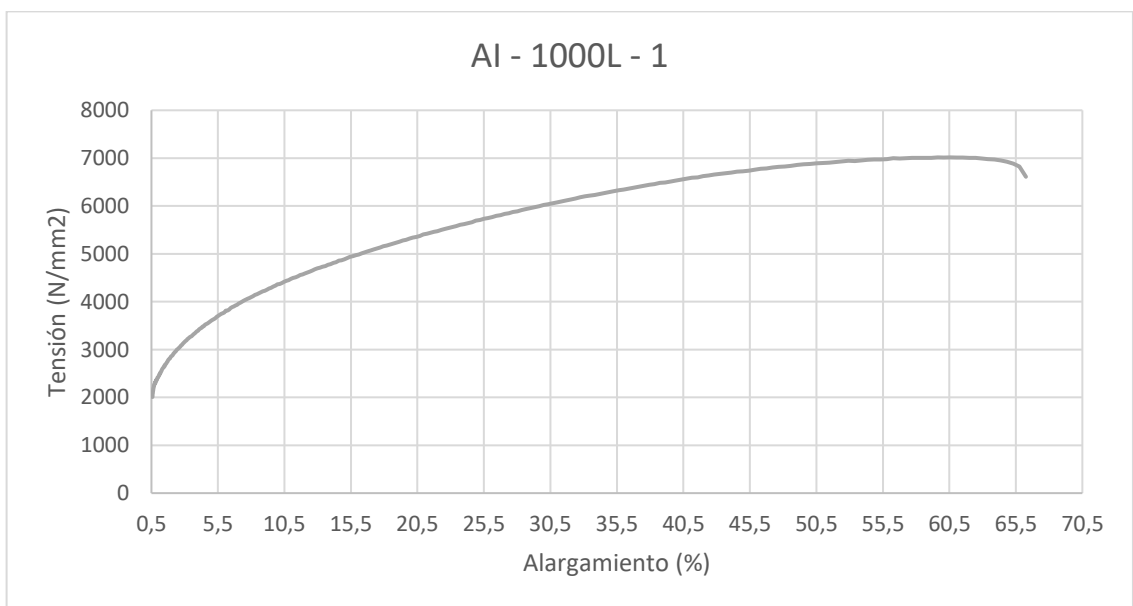


Figura 4.36. Gráfica Tensión-Deformación correspondiente a la probeta 1 de acero inoxidable ensayada a 1000°C enfriada lentamente.

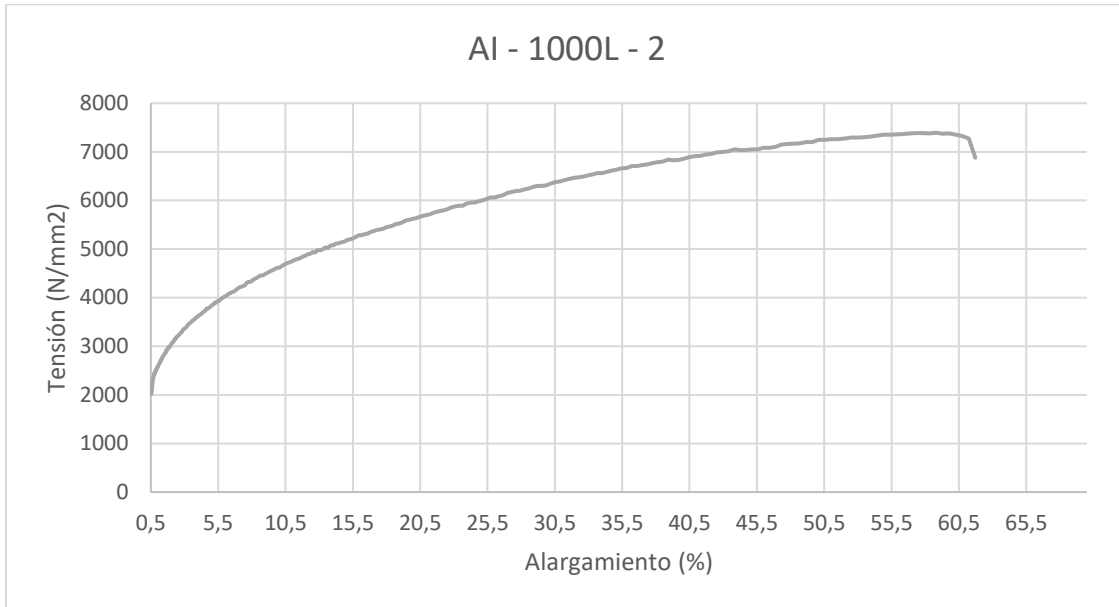


Figura 4.37. Gráfica Tensión-Deformación correspondiente a la probeta 2 de acero inoxidable ensayada a 1000°C enfriada lentamente.

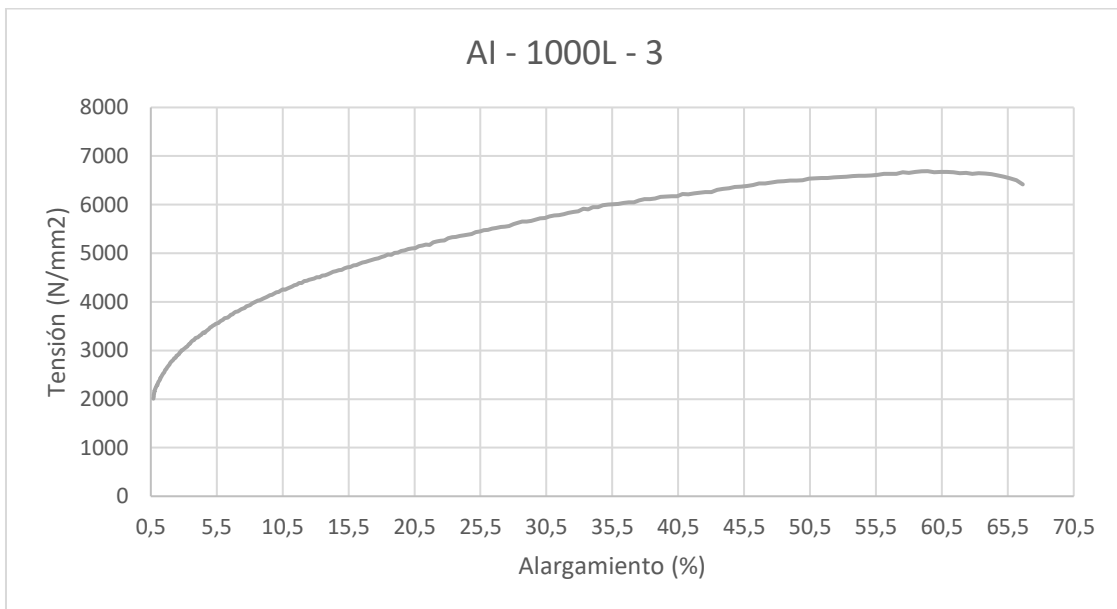


Figura 4.38. Gráfica Tensión-Deformación correspondiente a la probeta 3 de acero inoxidable ensayada a 1000°C enfriada lentamente.



- Acero inoxidable - Enfriamiento rápido:

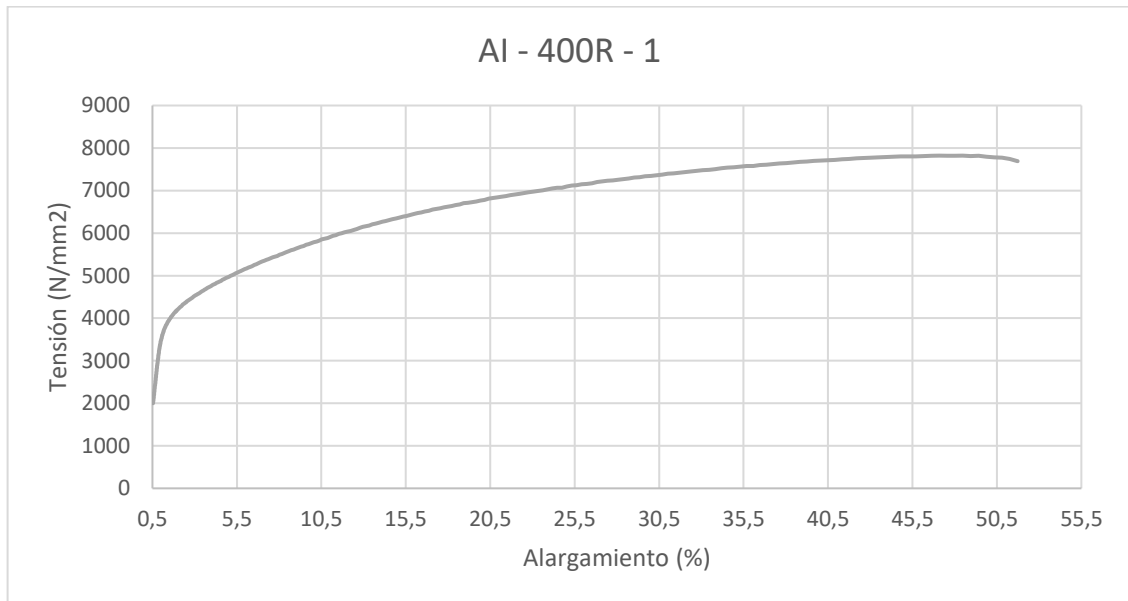


Figura 4.39. Gráfica Tensión-Deformación correspondiente a la probeta 1 de acero inoxidable ensayada a 400°C enfriada rápidamente.

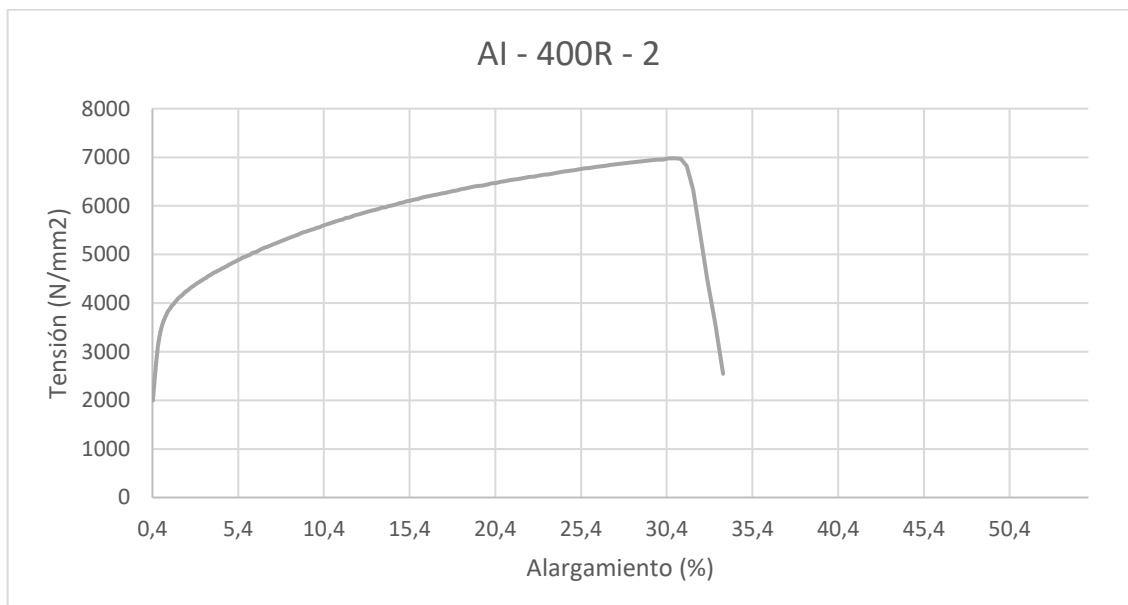


Figura 4.40. Gráfica Tensión-Deformación correspondiente a la probeta 2 de acero inoxidable ensayada a 400°C enfriada rápidamente.

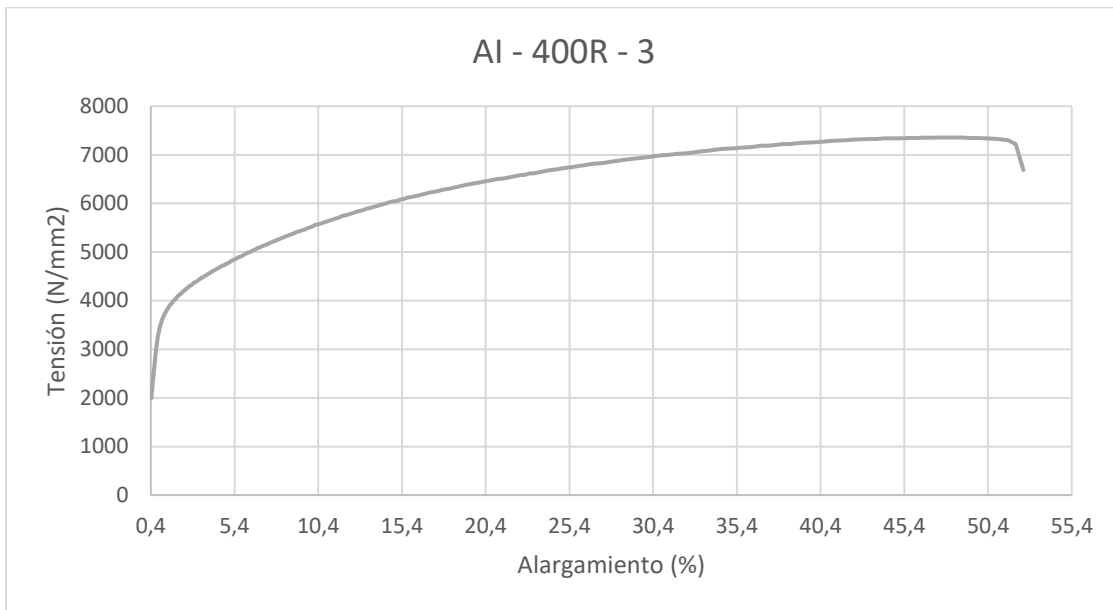


Figura 4.41. Gráfica Tensión-Deformación correspondiente a la probeta 3 de acero inoxidable ensayada a 400°C enfrida rápidamente.

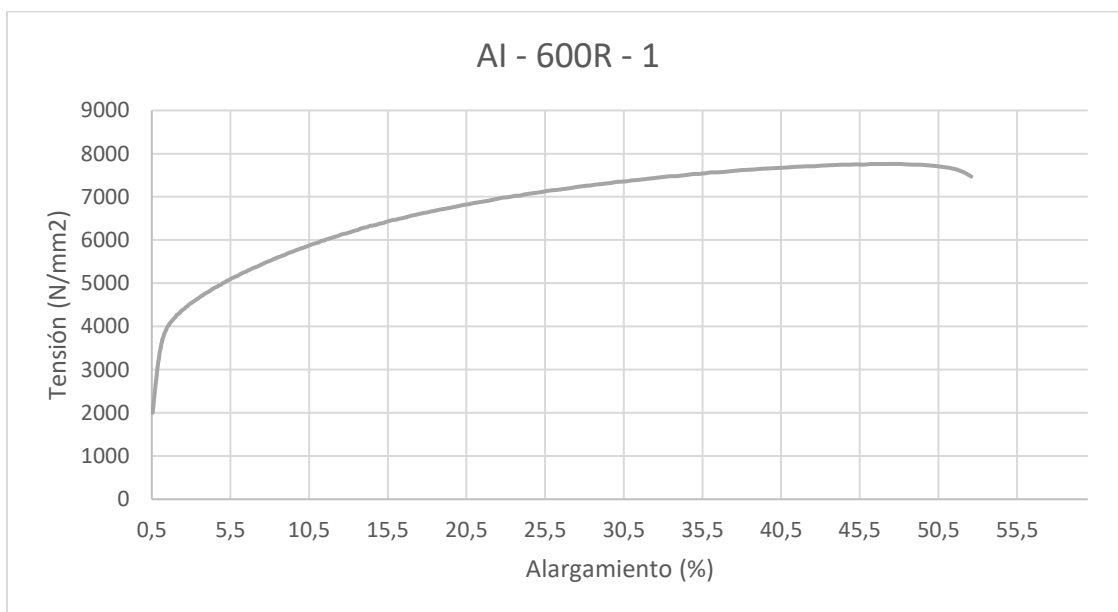


Figura 4.42. Gráfica Tensión-Deformación correspondiente a la probeta 1 de acero inoxidable ensayada a 600°C enfrida rápidamente.

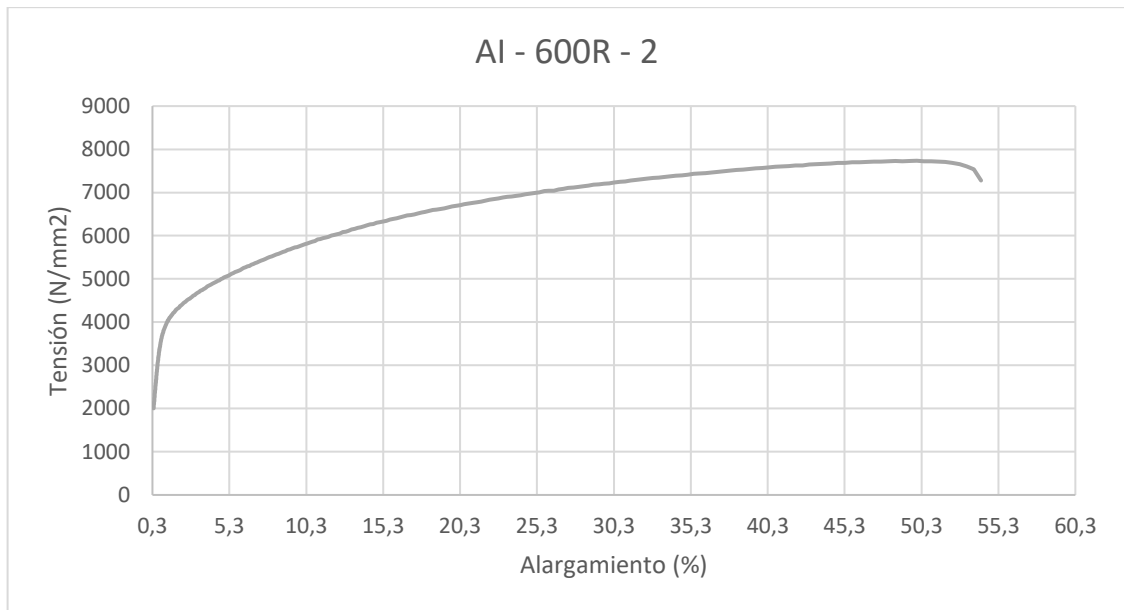


Figura 4.43. Gráfica Tensión-Deformación correspondiente a la probeta 2 de acero inoxidable ensayada a 600°C enfrida rápidamente.

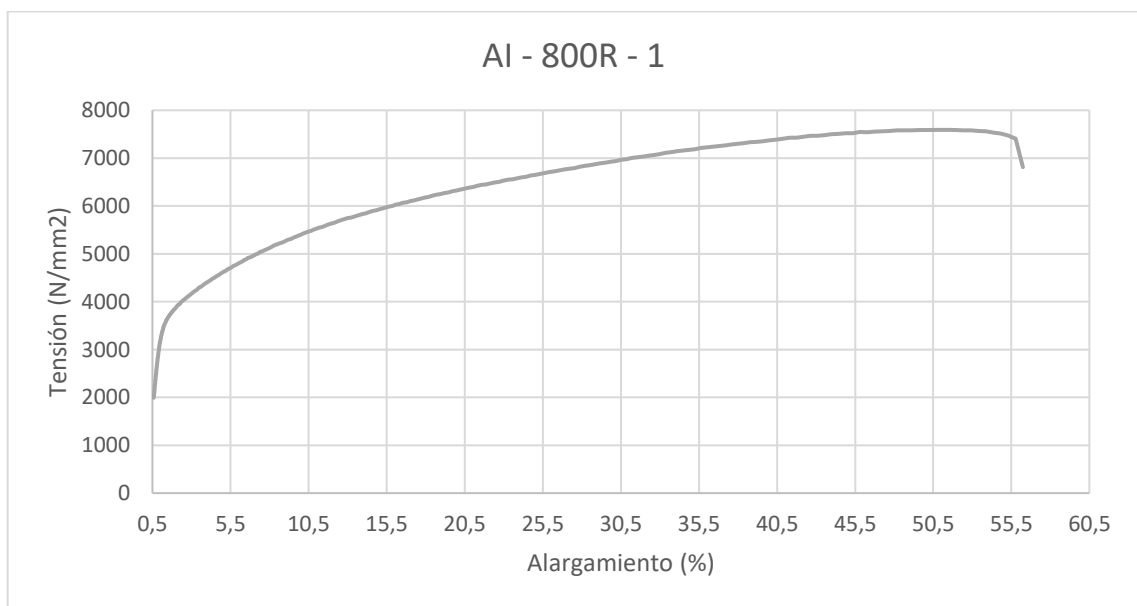


Figura 4.44. Gráfica Tensión-Deformación correspondiente a la probeta 1 de acero inoxidable ensayada a 800°C enfrida rápidamente.

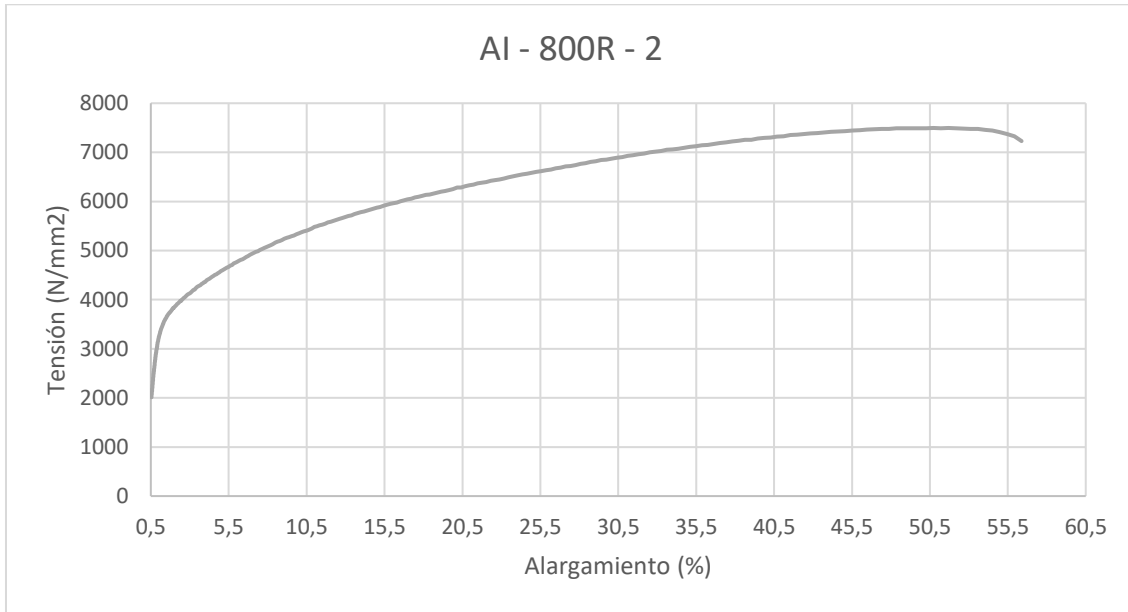


Figura 4.45. Gráfica Tensión-Deformación correspondiente a la probeta 2 de acero inoxidable ensayada a 800°C enfriada rápidamente.

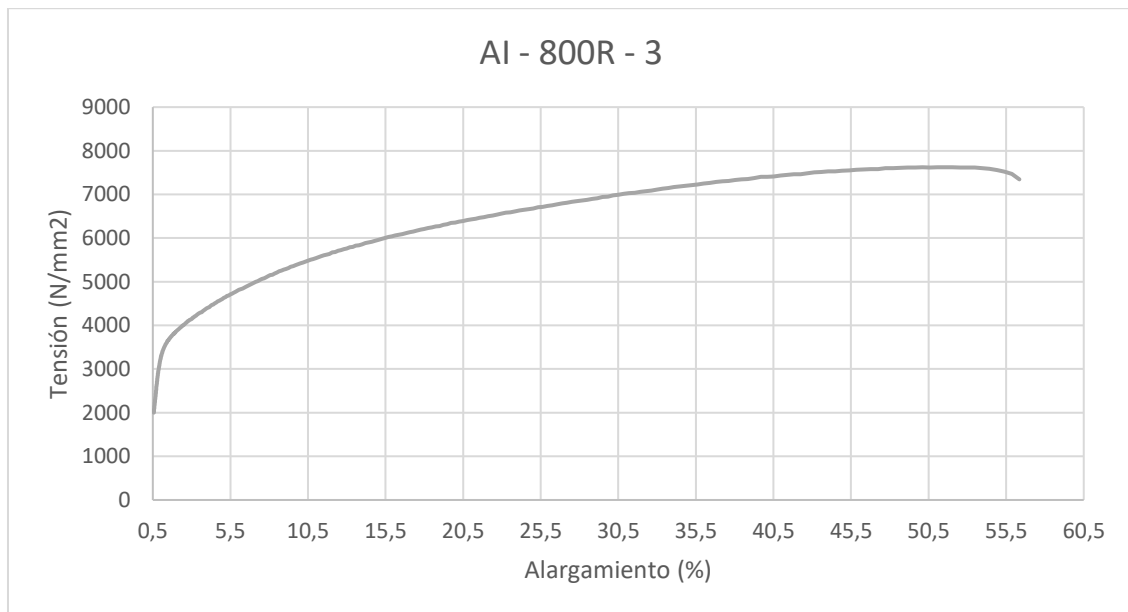


Figura 4.46. Gráfica Tensión-Deformación correspondiente a la probeta 3 de acero inoxidable ensayada a 800°C enfriada rápidamente.

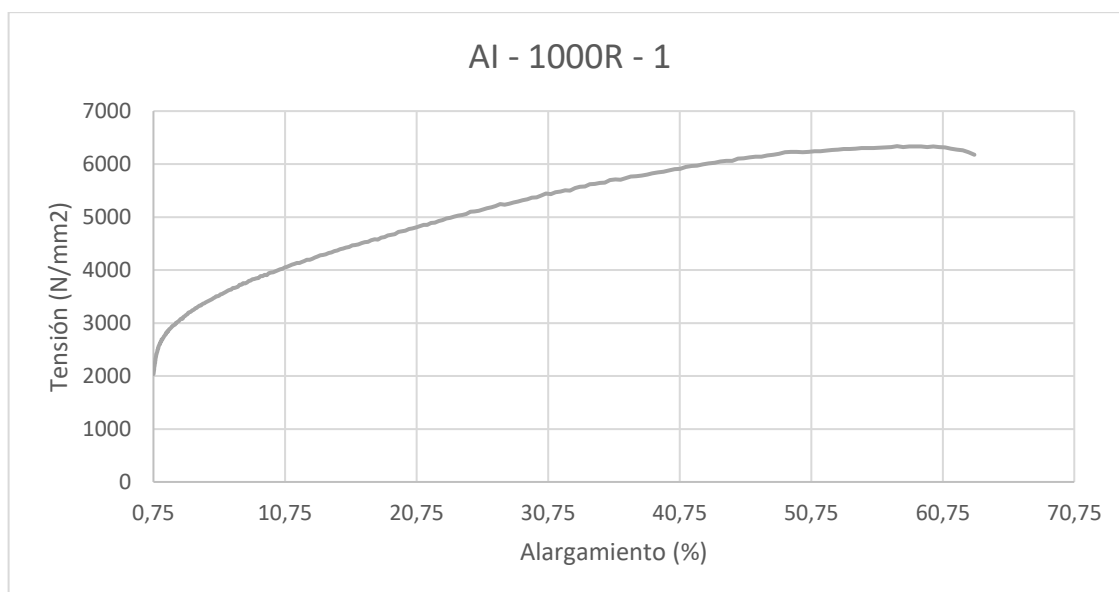


Figura 4.47. Gráfica Tensión-Deformación correspondiente a la probeta 1 de acero inoxidable ensayada a 1000°C enfriada rápidamente.

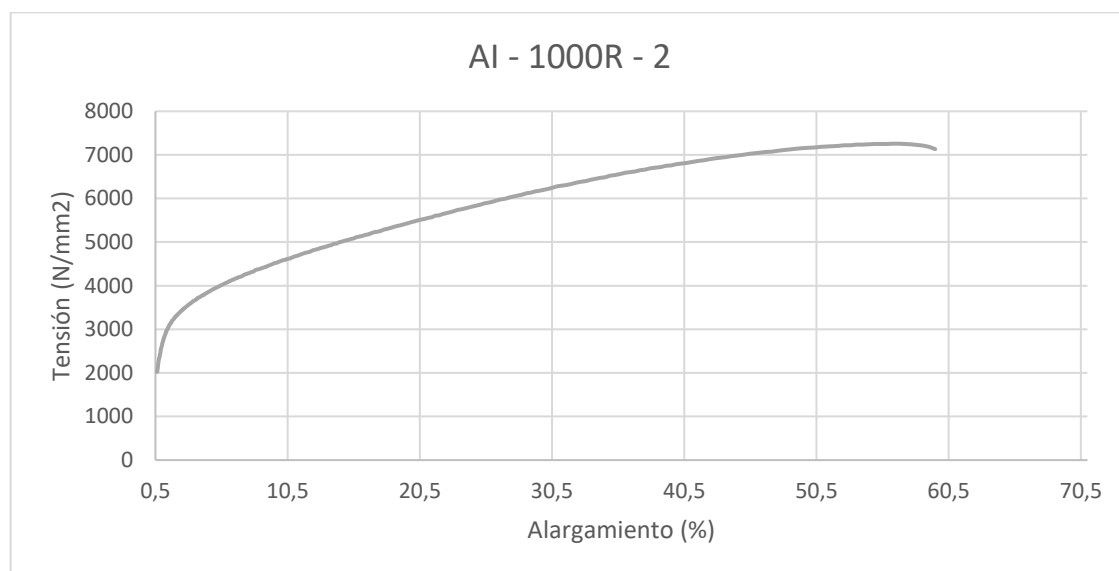


Figura 4.48. Gráfica Tensión-Deformación correspondiente a la probeta 2 de acero inoxidable ensayada a 1000°C enfriada rápidamente.

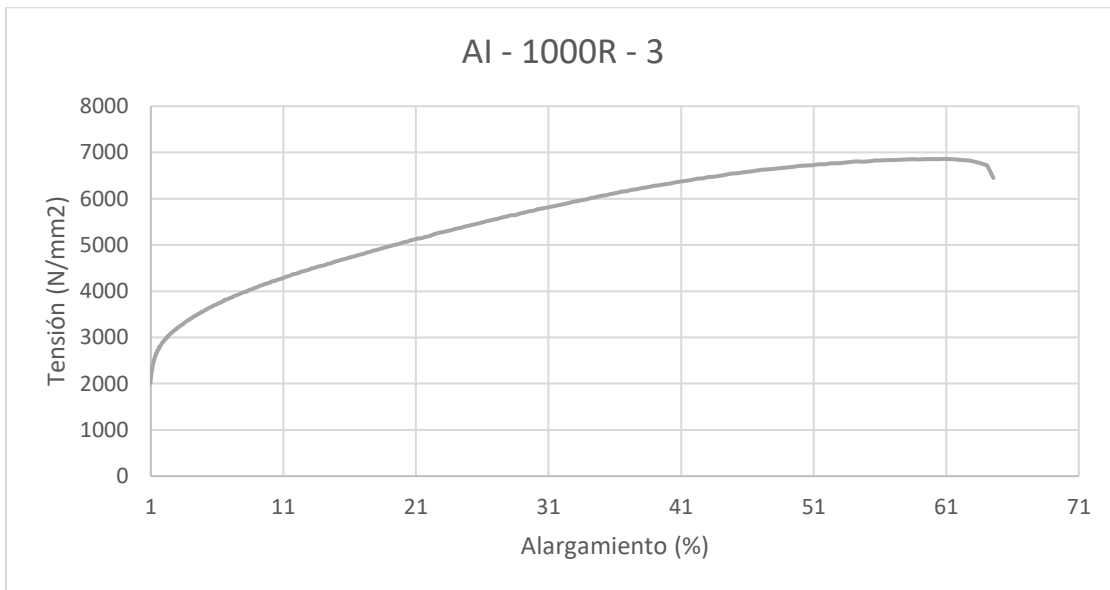


Figura 4.49. Gráfica Tensión-Deformación correspondiente a la probeta 3 de acero inoxidable ensayada a 1000°C enfriada rápidamente.

Las gráficas de tracción del acero inoxidable (Figura 4.25 a figura 4.49) muestran pocos cambios con respecto al alargamiento y la tensión, no hay una variación extrema ni se observa ninguna tendencia al alza o a la baja. Todas las gráficas, tanto las de enfriamiento lento como las de enfriamiento rápido, están en torno a unos valores parecidos independientemente de la temperatura que se haya aplicado. Se observa una pequeña diferencia al llegar a la temperatura de 1000°C, en la cual la tensión baja considerablemente con respecto a las muestras anteriores. En este caso, sí se aprecia un alargamiento de un 10% aproximadamente con respecto las probetas de temperaturas más bajas.

Las gráficas siguientes (Figura 4.50 y figura 4.51) muestran la progresión que sigue la deformación. Se aprecia claramente el mantenimiento del alargamiento que sufren las probetas hasta que, al llegar a 1000°C, donde se observa ese incremento del alargamiento.

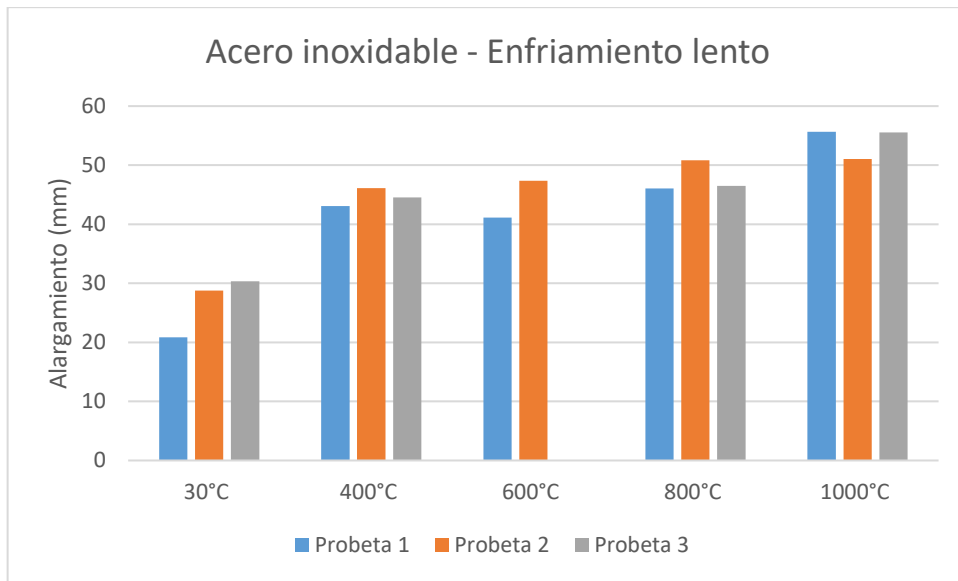


Figura 4.50. Gráfica Alargamiento-Temperatura generada a partir de los alargamientos máximos de cada probeta de acero inoxidable enfriada lentamente en función de la temperatura.

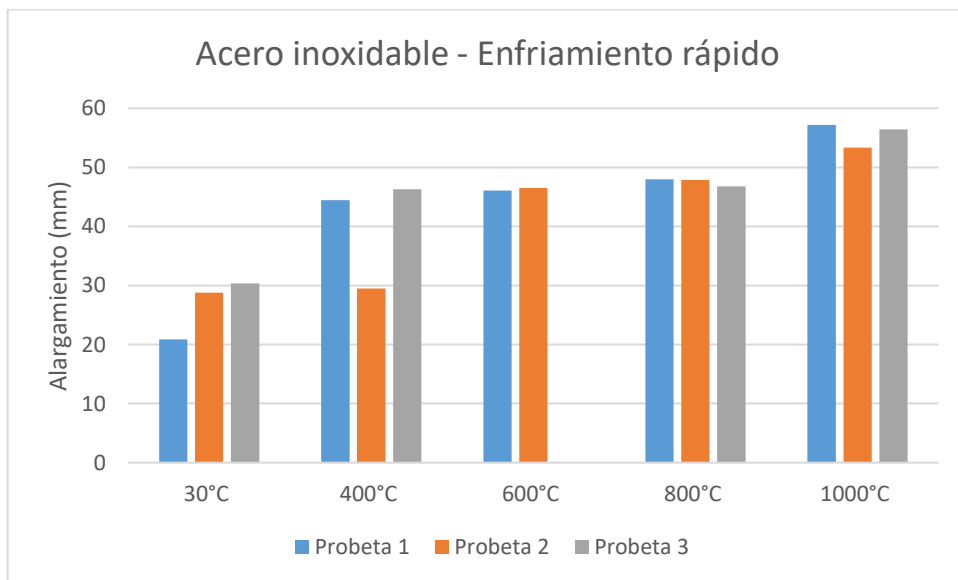


Figura 4.51. Gráfica Alargamiento-Temperatura generada a partir de los alargamientos máximos de cada probeta de acero inoxidable enfriada rápidamente en función de la temperatura.

Este fenómeno podría deberse al hecho de que la microestructura está formada de granos y de que, con la temperatura, estos aumentan de tamaño haciendo disminuir la tensión y provocando un aumento en el alargamiento, como ya se ha explicado. Pero debido a que esto no está ocurriendo exactamente así, podríamos estar ante un caso de un material recocido (laminado en caliente), el cual ya habría sido calentado y al calentarlo de nuevo para este ensayo, habría provocado una bajada tan sutil de la tensión que incluso podría parecer que se mantiene. A su vez, provocaría un alargamiento que se produce más rápidamente a temperaturas muy elevadas como es el caso de las probetas ensayadas a 1000°C.

Las siguientes gráficas Tensión-Deformación(%) son los resultados del ensayo de tracción de las probetas de acero galvanizado, una vez los datos se han convertido a las unidades adecuadas para su representación.

Se aplica la siguiente nomenclatura para definir el nombre de cada probeta:

- AMB: temperatura ambiente
  - 400, 600, 800, 1000: temperaturas de tratamiento de calor
  - L: enfriamiento lento
  - R: enfriamiento rápido
- 
- Acero galvanizado - Enfriamiento lento:



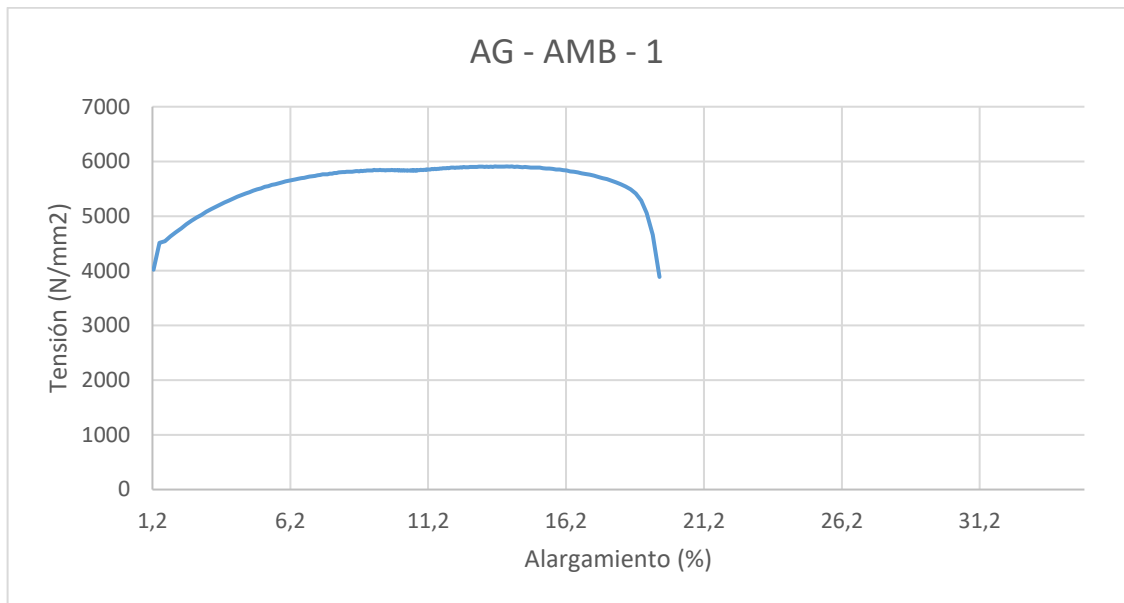


Figura 4.52. Gráfica Tensión-Deformación correspondiente a la probeta 1 de acero galvanizado ensayada a temperatura ambiente.

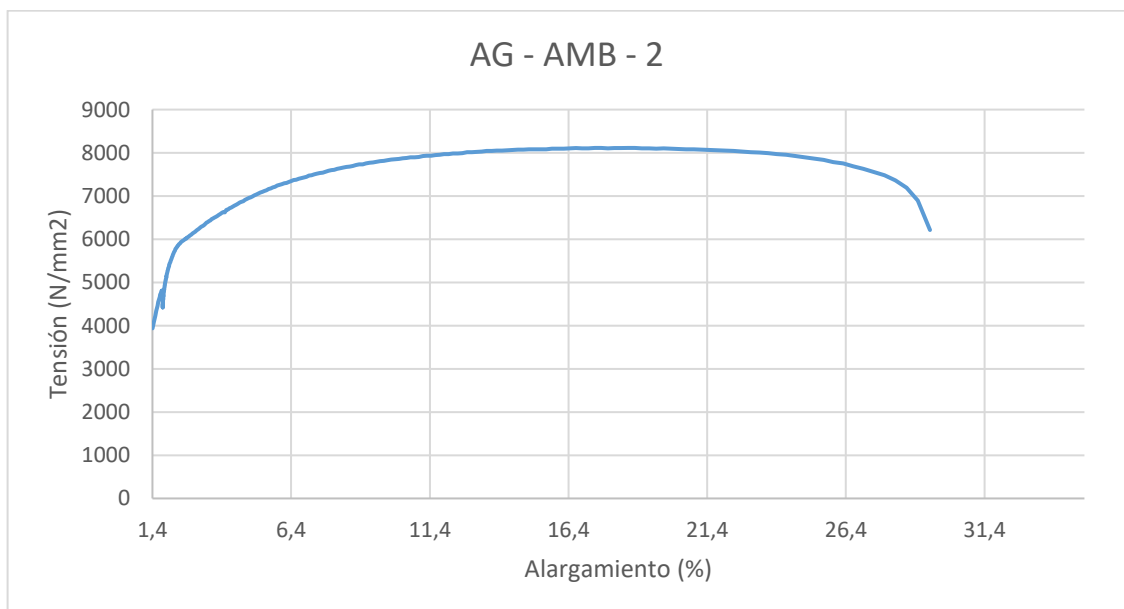


Figura 4.53. Gráfica Tensión-Deformación correspondiente a la probeta 2 de acero galvanizado ensayada a temperatura ambiente.

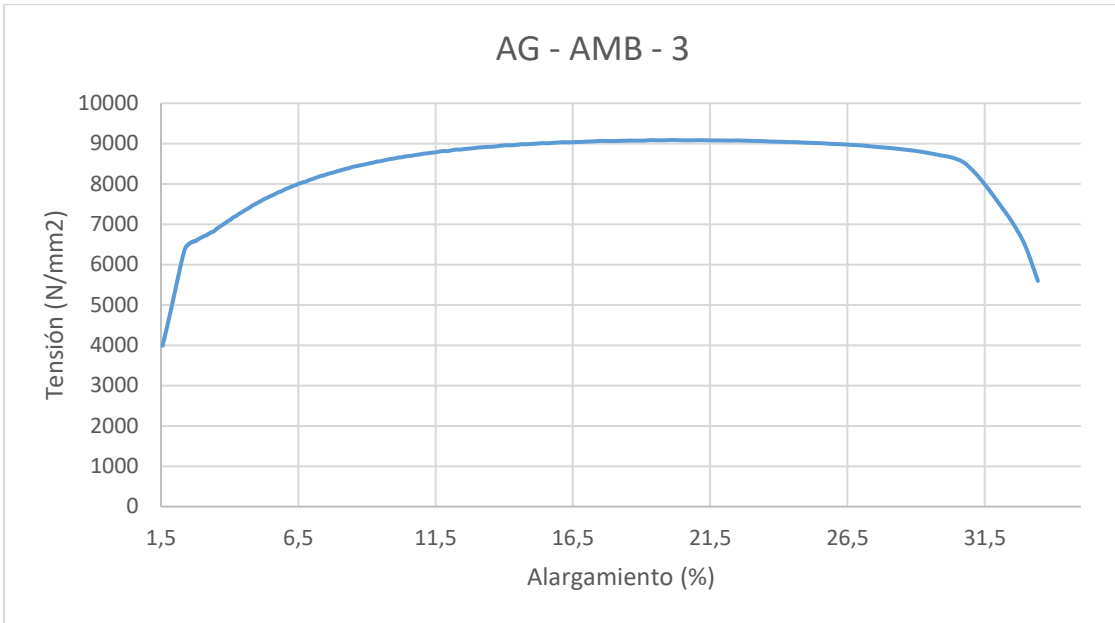


Figura 4.54. Gráfica Tensión-Deformación correspondiente a la probeta 3 de acero galvanizado ensayada a temperatura ambiente.

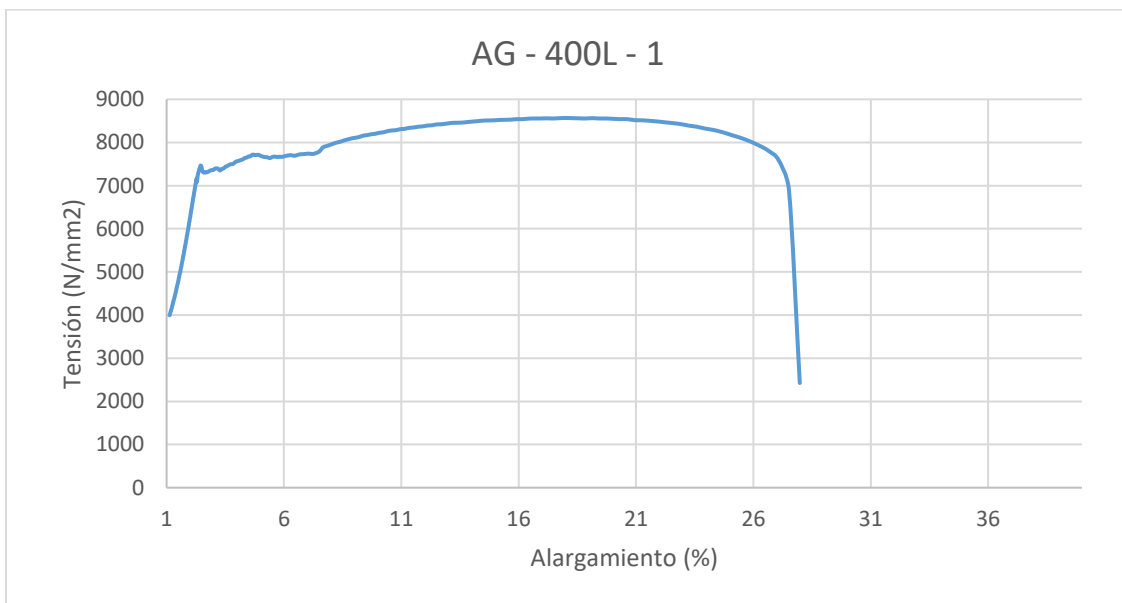


Figura 4.55. Gráfica Tensión-Deformación correspondiente a la probeta 1 de acero galvanizado ensayada a 400°C enfriada lentamente.

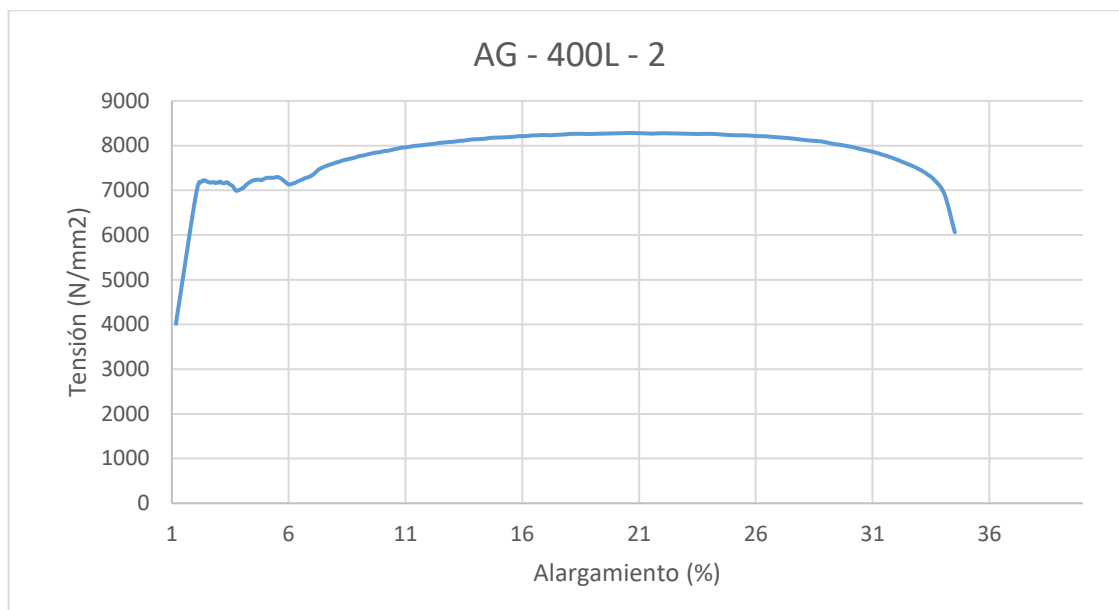


Figura 4.56. Gráfica Tensión-Deformación correspondiente a la probeta 2 de acero galvanizado ensayada a 400°C enfriada lentamente.

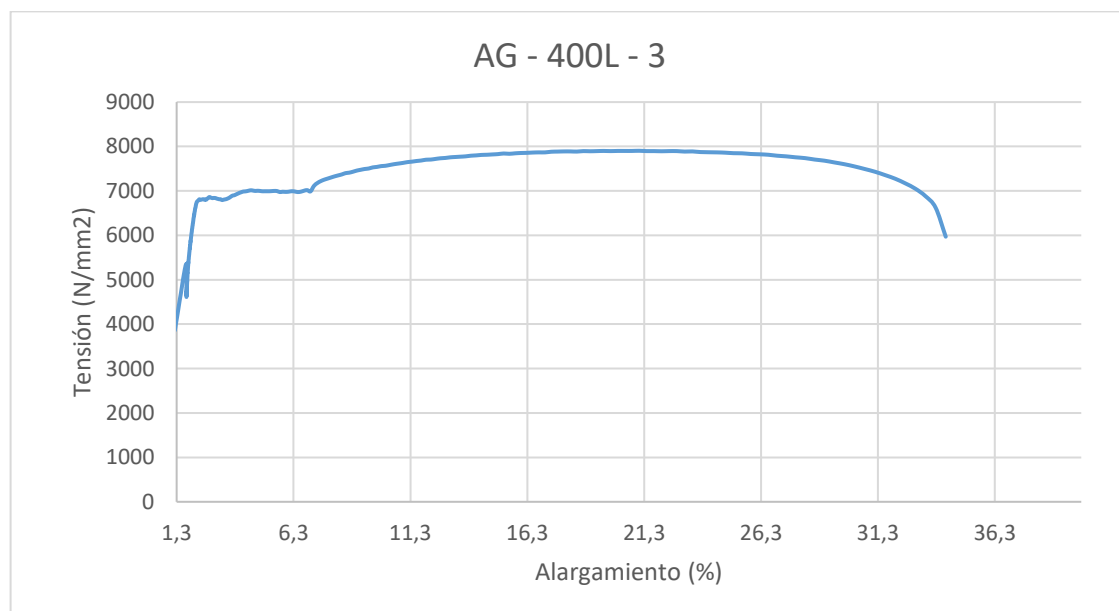


Figura 4.57. Gráfica Tensión-Deformación correspondiente a la probeta 3 de acero galvanizado ensayada a 400°C enfriada lentamente.

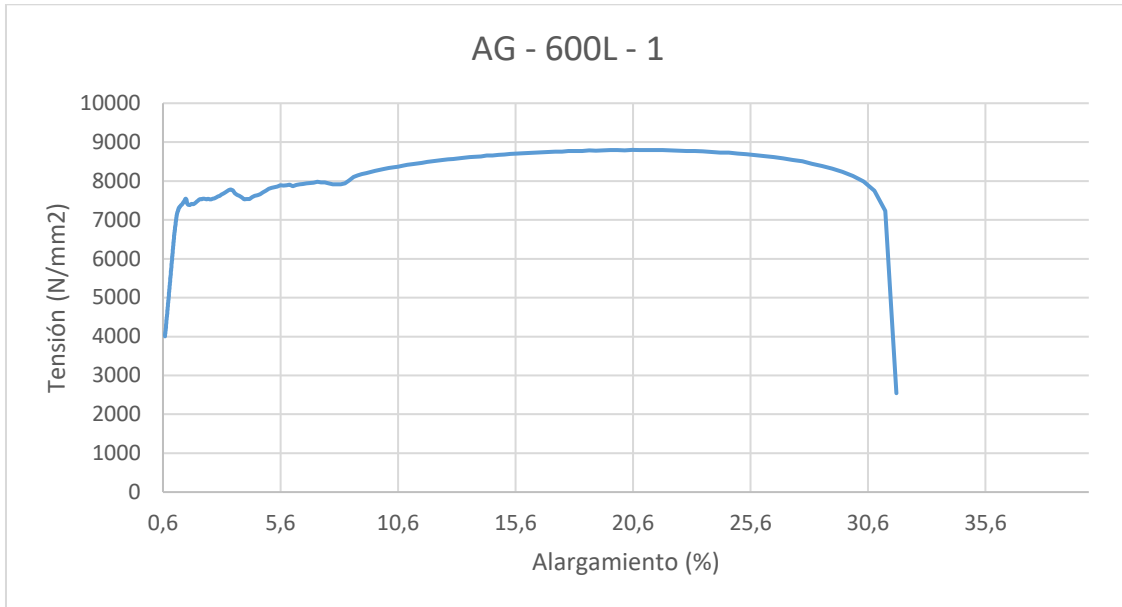


Figura 4.58. Gráfica Tensión-Deformación correspondiente a la probeta 1 de acero galvanizado ensayada a 600°C enfríada lentamente.

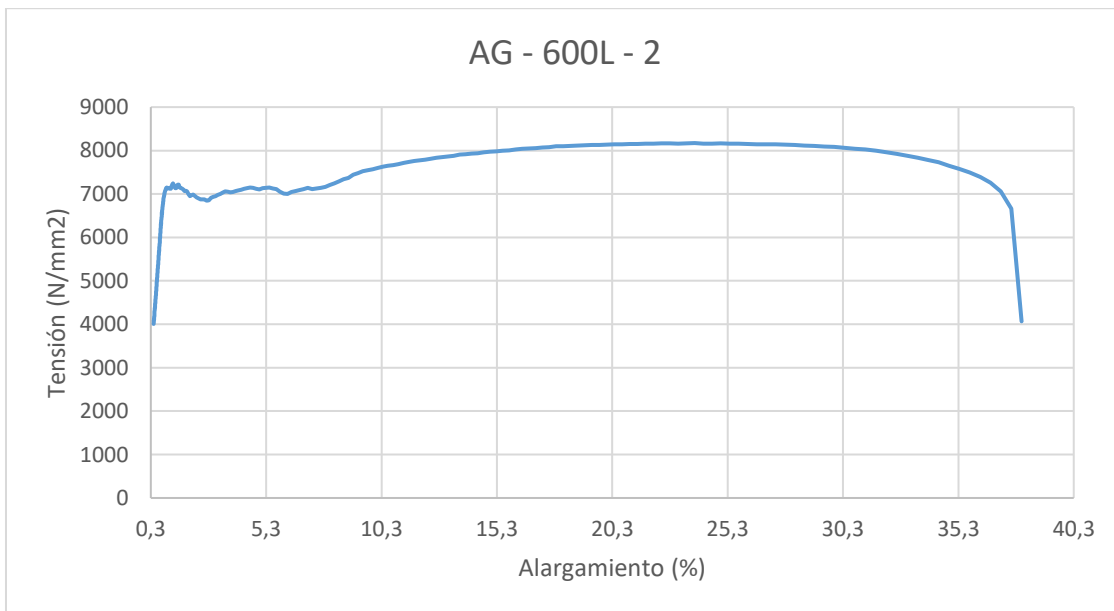


Figura 4.59. Gráfica Tensión-Deformación correspondiente a la probeta 2 de acero galvanizado ensayada a 600°C enfríada lentamente.

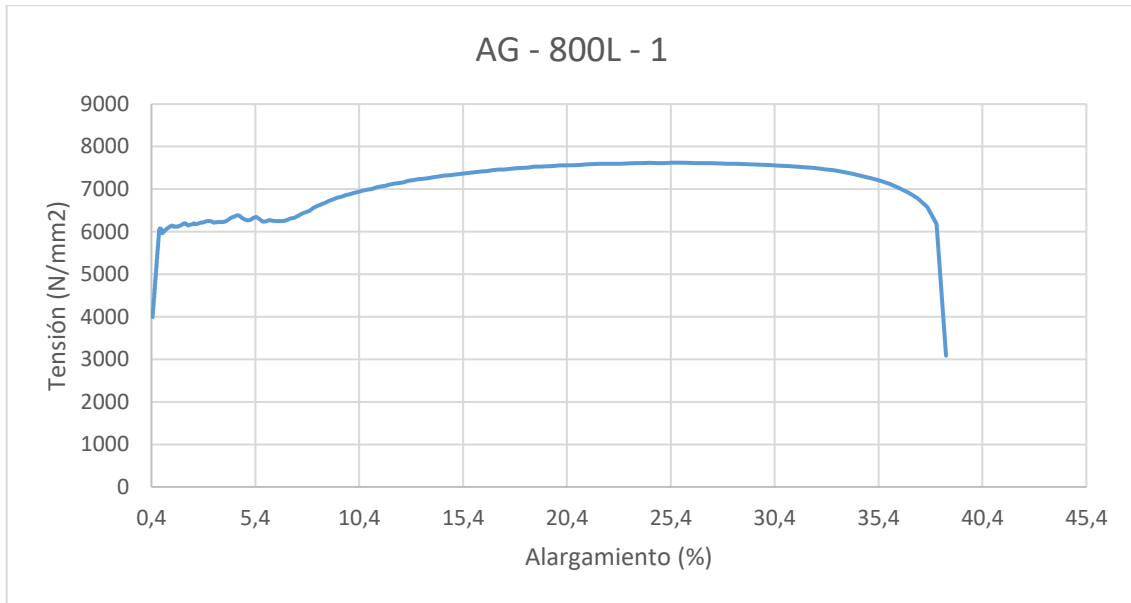


Figura 4.60. Gráfica Tensión-Deformación correspondiente a la probeta 1 de acero galvanizado ensayada a 800°C enfriada lentamente.

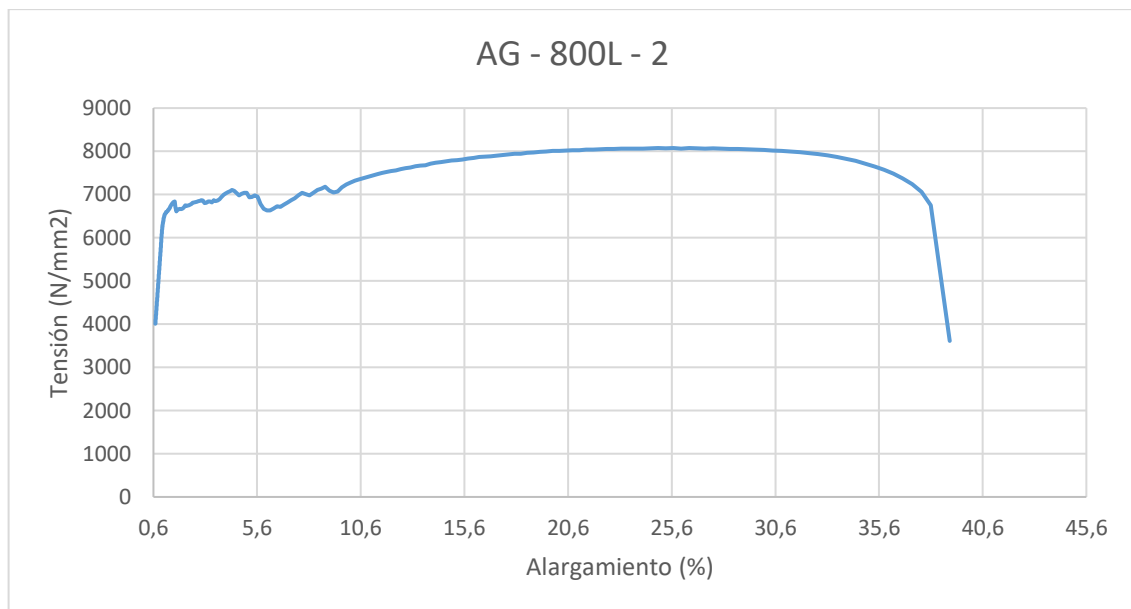


Figura 4.61. Gráfica Tensión-Deformación correspondiente a la probeta 2 de acero galvanizado ensayada a 800°C enfriada lentamente.

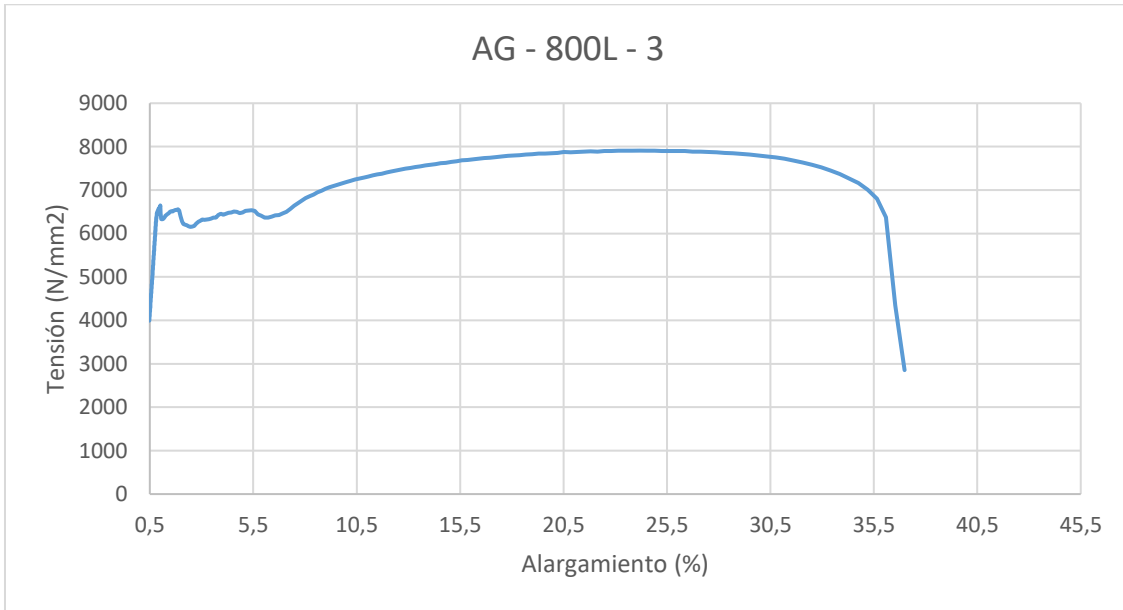


Figura 4.62. Gráfica Tensión-Deformación correspondiente a la probeta 3 de acero galvanizado ensayada a 800°C enfrida lentamente.

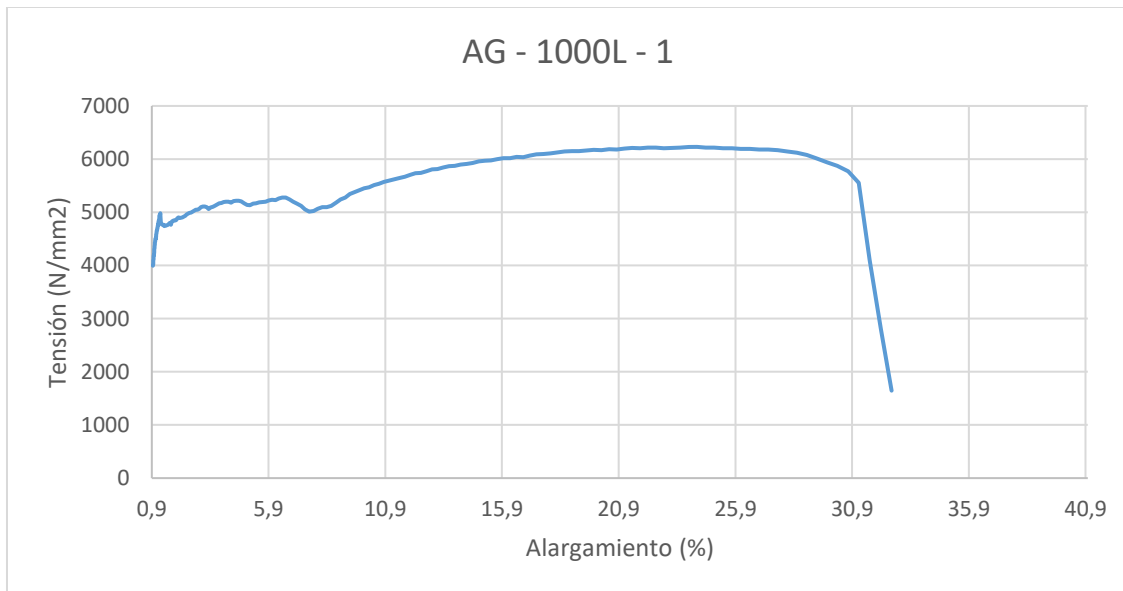


Figura 4.63. Gráfica Tensión-Deformación correspondiente a la probeta 1 de acero galvanizado ensayada a 1000°C enfrida lentamente.

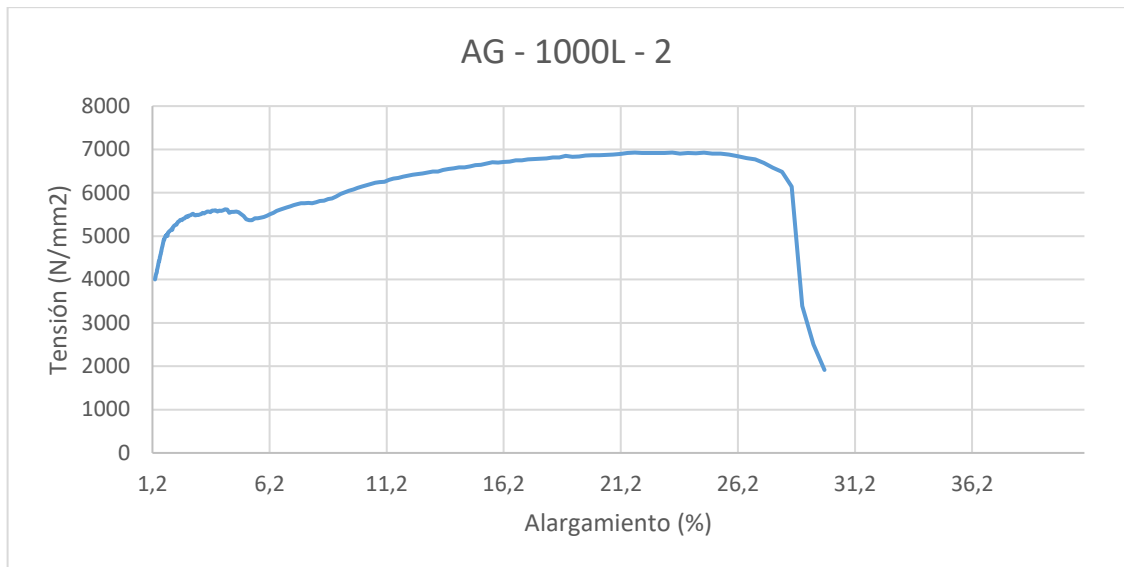


Figura 4.64. Gráfica Tensión-Deformación correspondiente a la probeta 2 de acero galvanizado ensayada a 1000°C enfriada lentamente.

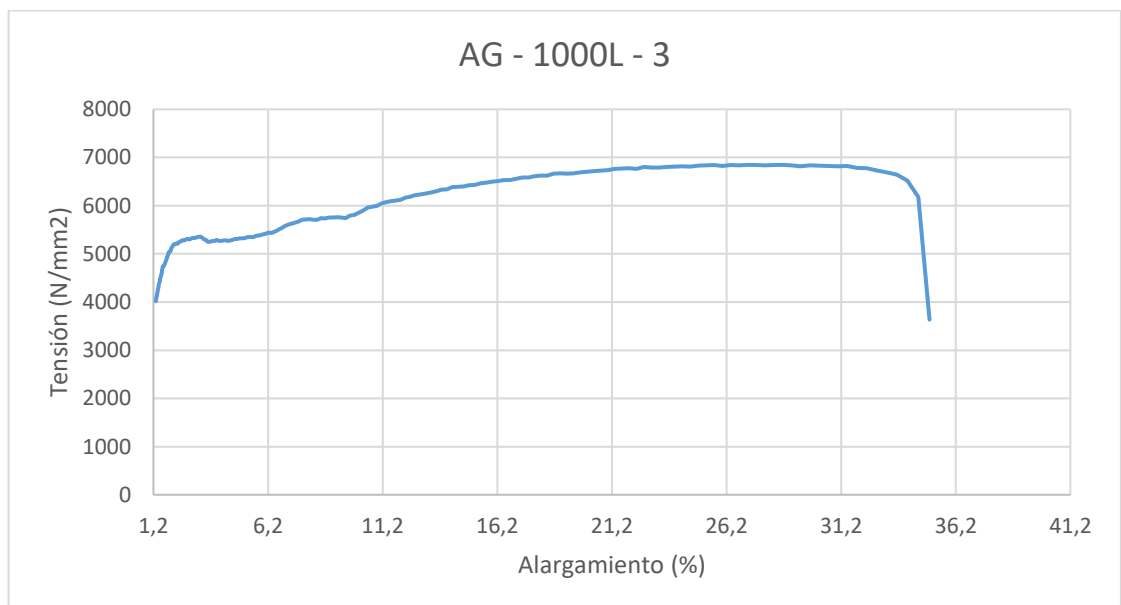


Figura 4.65. Gráfica Tensión-Deformación correspondiente a la probeta 3 de acero galvanizado ensayada a 1000°C enfriada lentamente.

- Acero galvanizado - Enfriamiento rápido:

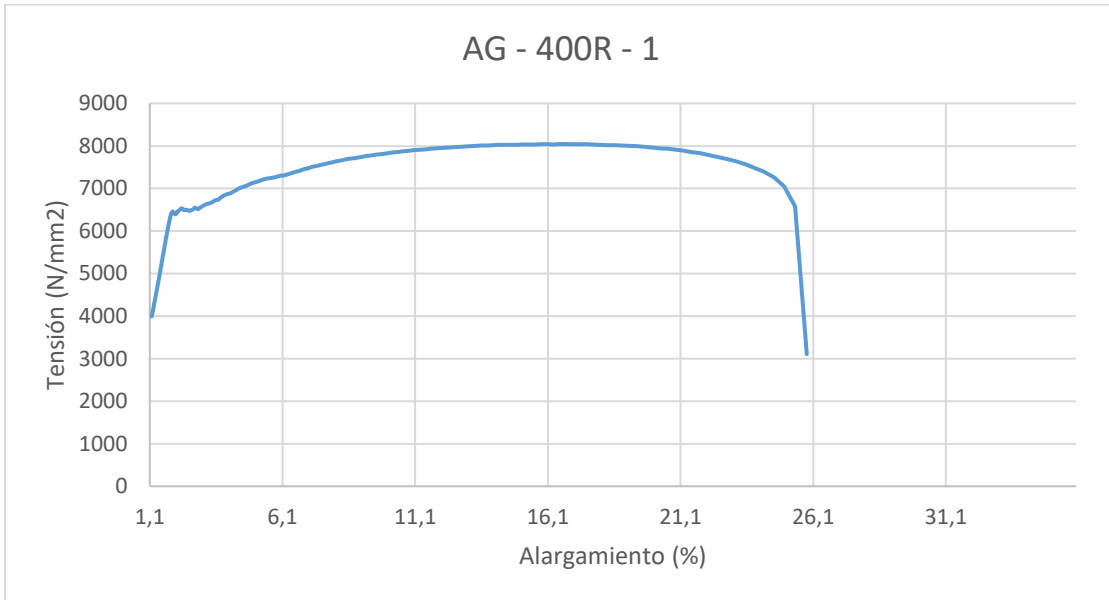


Figura 4.66. Gráfica Tensión-Deformación correspondiente a la probeta 1 de acero galvanizado ensayada a 400°C enfriada rápidamente.

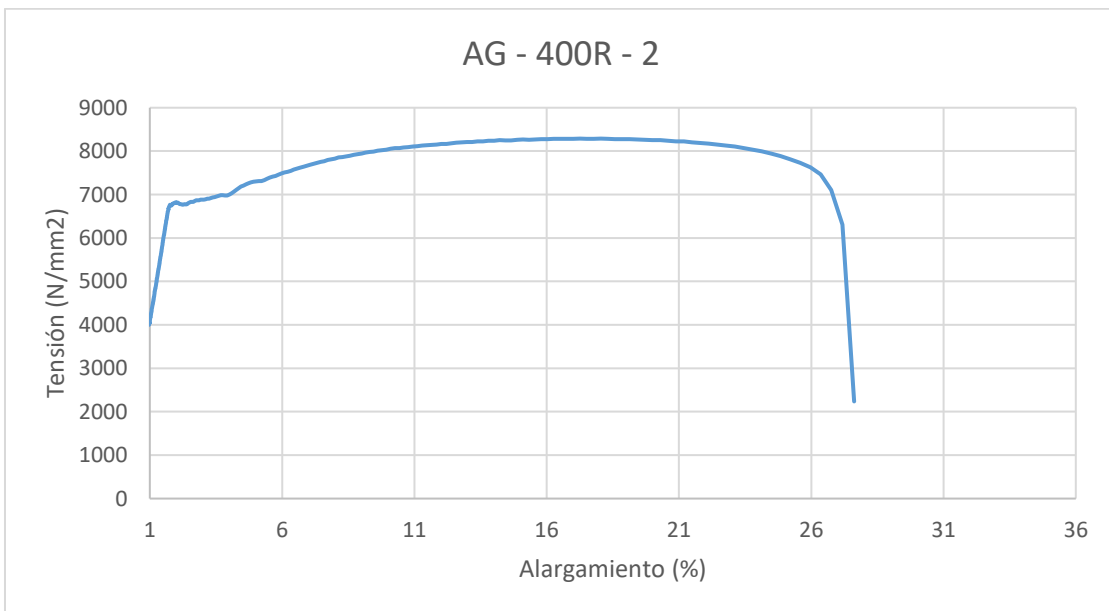


Figura 4.67. Gráfica Tensión-Deformación correspondiente a la probeta 2 de acero galvanizado ensayada a 400°C enfriada lentamente.



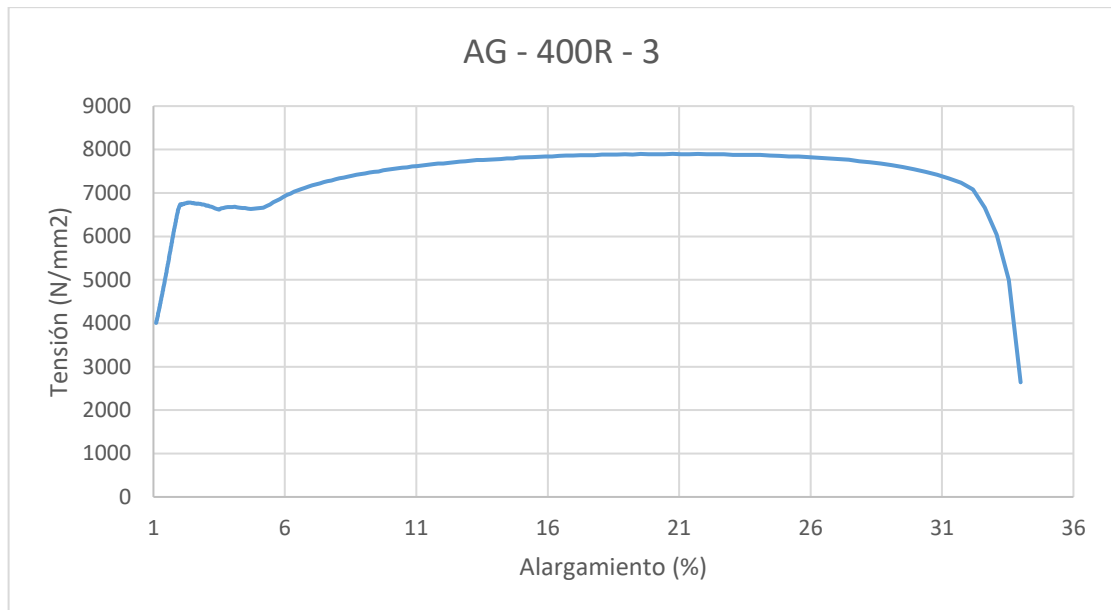


Figura 4.68. Gráfica Tensión-Deformación correspondiente a la probeta 3 de acero galvanizado ensayada a 400°C enfriada rápidamente.

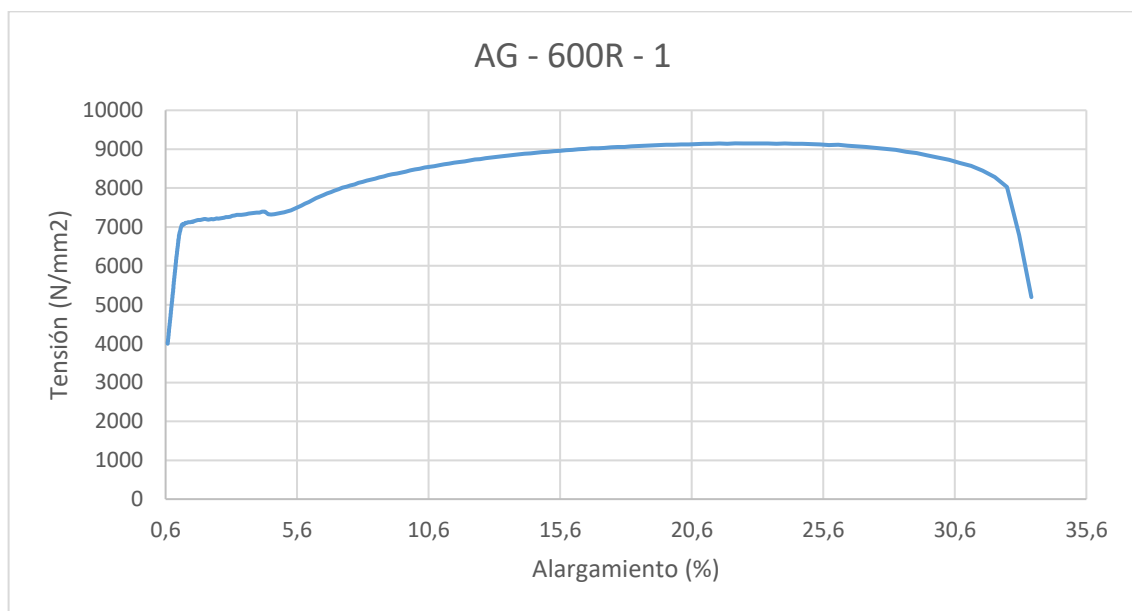


Figura 4.69. Gráfica Tensión-Deformación correspondiente a la probeta 1 de acero galvanizado ensayada a 600°C enfriada rápidamente.

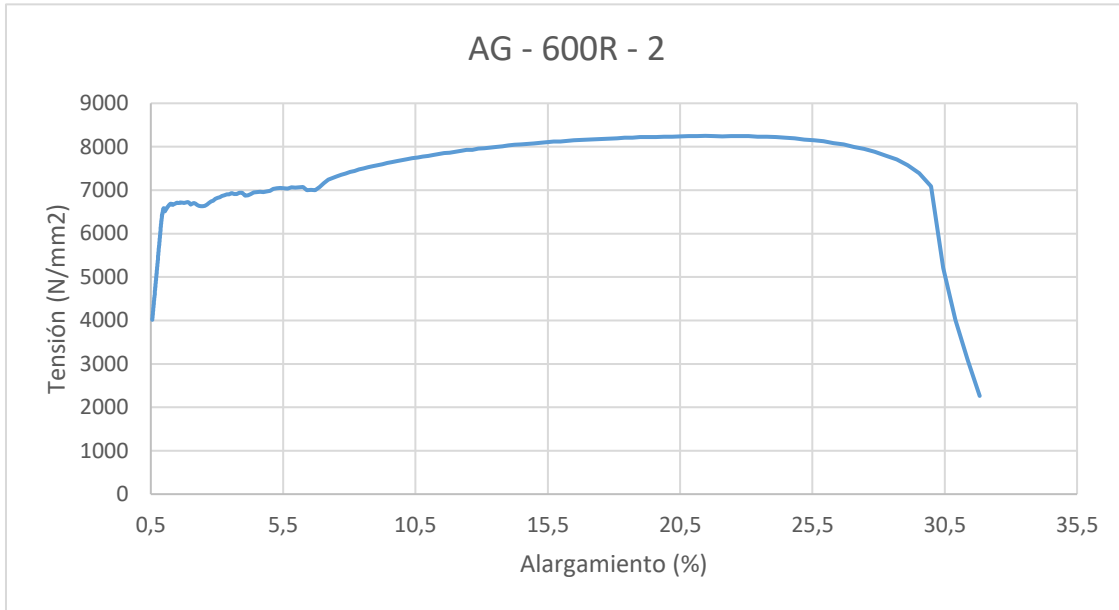


Figura 4.70. Gráfica Tensión-Deformación correspondiente a la probeta 2 de acero galvanizado ensayada a 600°C enfriada rápidamente.

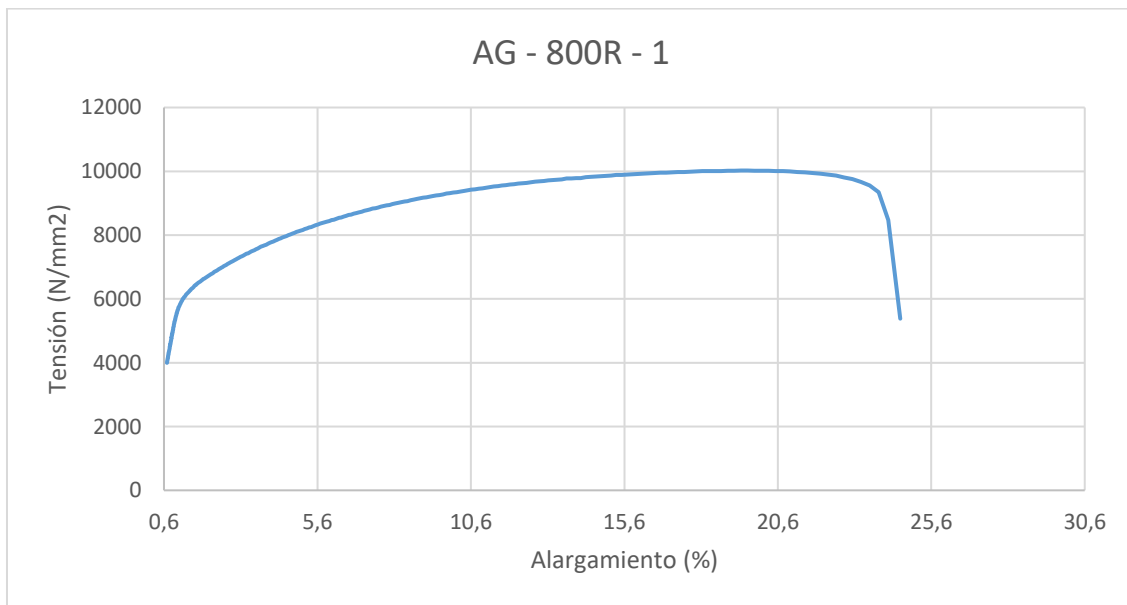


Figura 4.71. Gráfica Tensión-Deformación correspondiente a la probeta 1 de acero galvanizado ensayada a 800°C enfriada rápidamente.

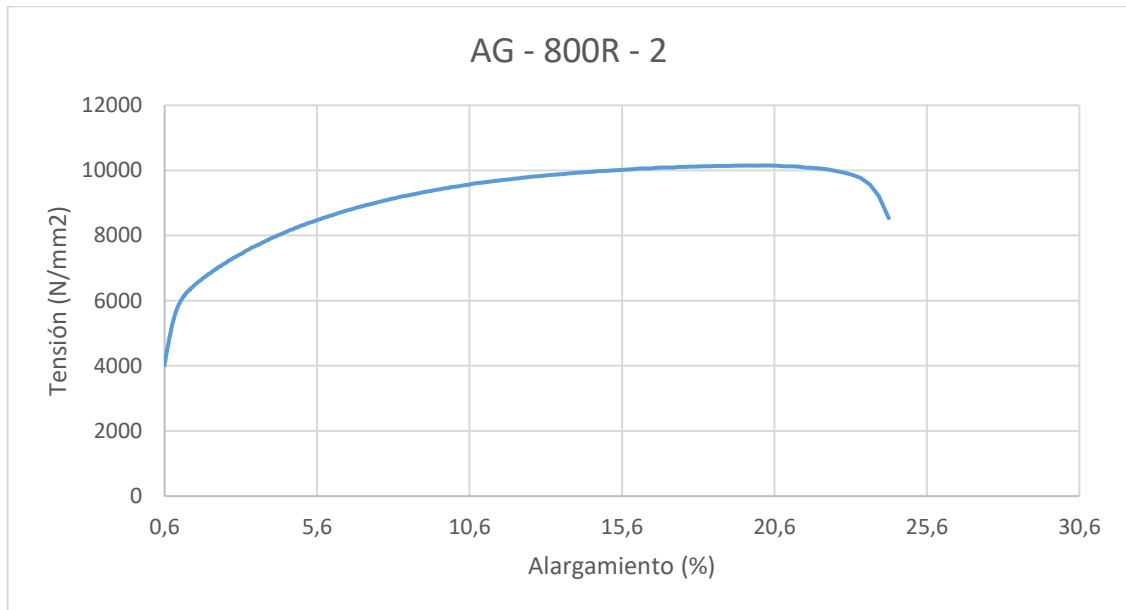


Figura 4.72. Gráfica Tensión-Deformación correspondiente a la probeta 2 de acero galvanizado ensayada a 800°C enfriada rápidamente.

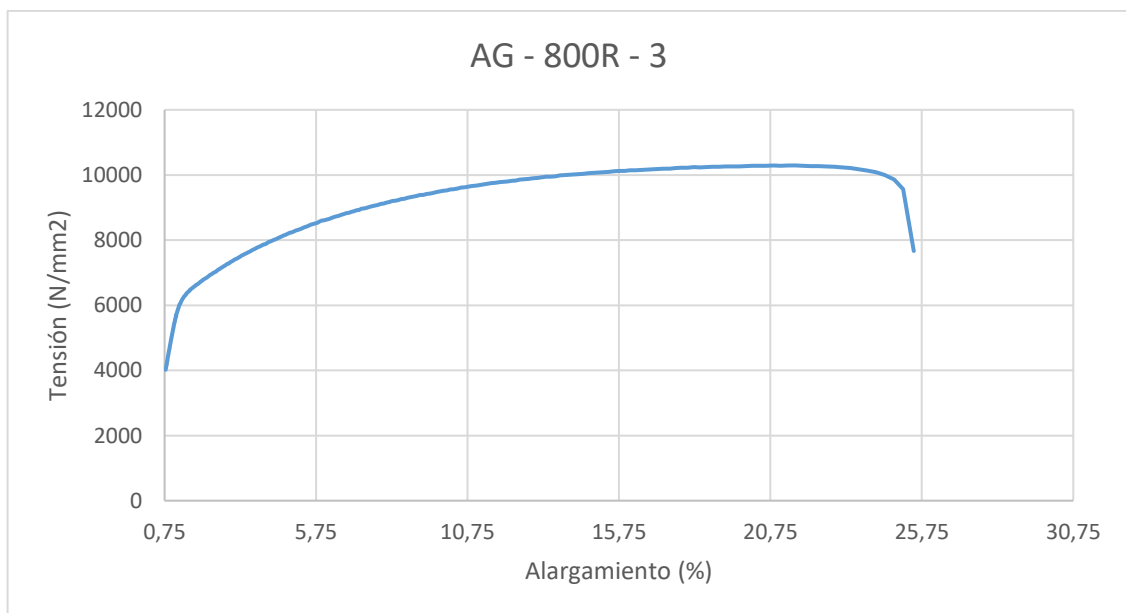


Figura 4.73. Gráfica Tensión-Deformación correspondiente a la probeta 3 de acero galvanizado ensayada a 800°C enfriada rápidamente.

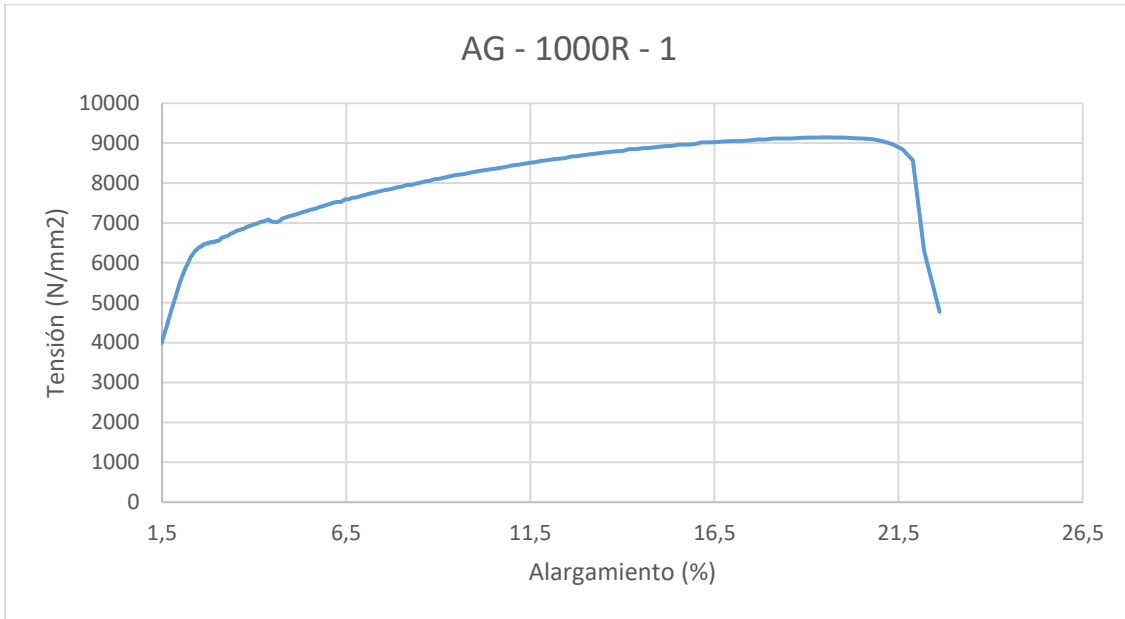


Figura 4.74. Gráfica Tensión-Deformación correspondiente a la probeta 1 de acero galvanizado ensayada a 1000°C enfriada rápidamente.

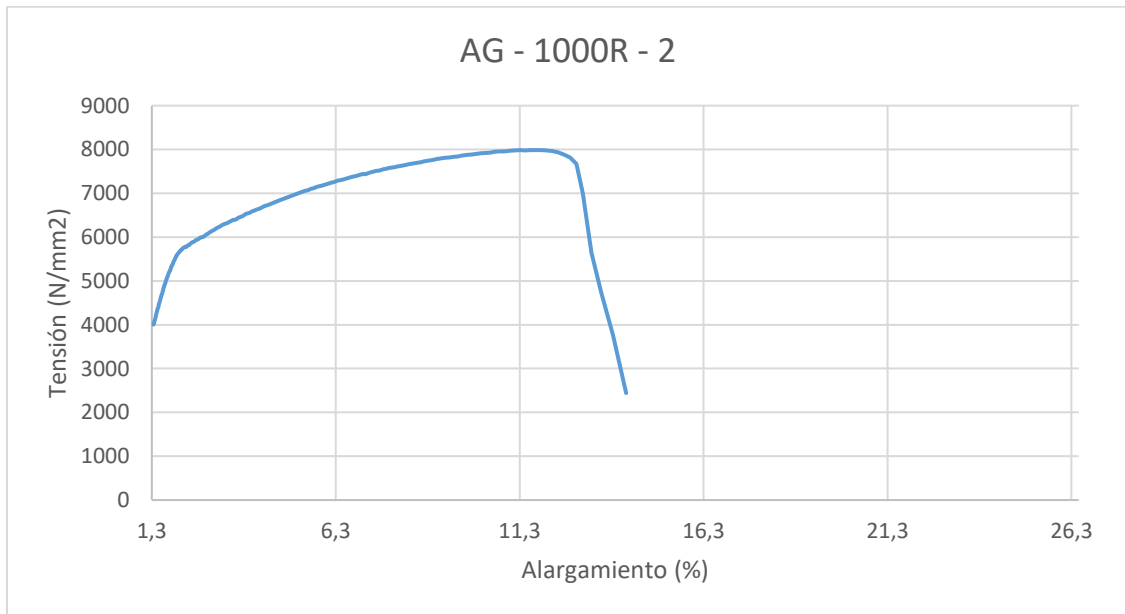


Figura 4.75. Gráfica Tensión-Deformación correspondiente a la probeta 2 de acero galvanizado ensayada a 1000°C enfriada rápidamente.

Las gráficas de tracción del acero galvanizado (Figura 4.52 a figura 4.75) muestran pocos cambios con respecto al alargamiento y la tensión, de igual modo que en el caso anterior. Todas las gráficas, tanto las de enfriamiento lento como las de enfriamiento rápido, están en torno a unos valores parecidos de tensión independientemente de la temperatura que se haya aplicado. La única diferencia que se observa es en la temperatura de 1000°C, en la que la tensión baja ligeramente respecto a las muestras anteriores en ambos enfriamientos.

Las gráficas de alargamiento del acero galvanizado (Figura 4.76 y figura 4.77) muestran pocos cambios con respecto al alargamiento, a diferencia del caso anterior. Los resultados de las probetas que se han sometido a un enfriamiento lento, se encuentran en torno a unos valores parecidos independientemente de la temperatura que se haya aplicado.

Sí que se aprecian ligeras variaciones, pero no se ve ninguna tendencia ni de aumento ni de descenso. En cambio, en el caso del enfriamiento rápido, se puede ver como el alargamiento disminuye drásticamente al llegar a la temperatura de 1000°C.

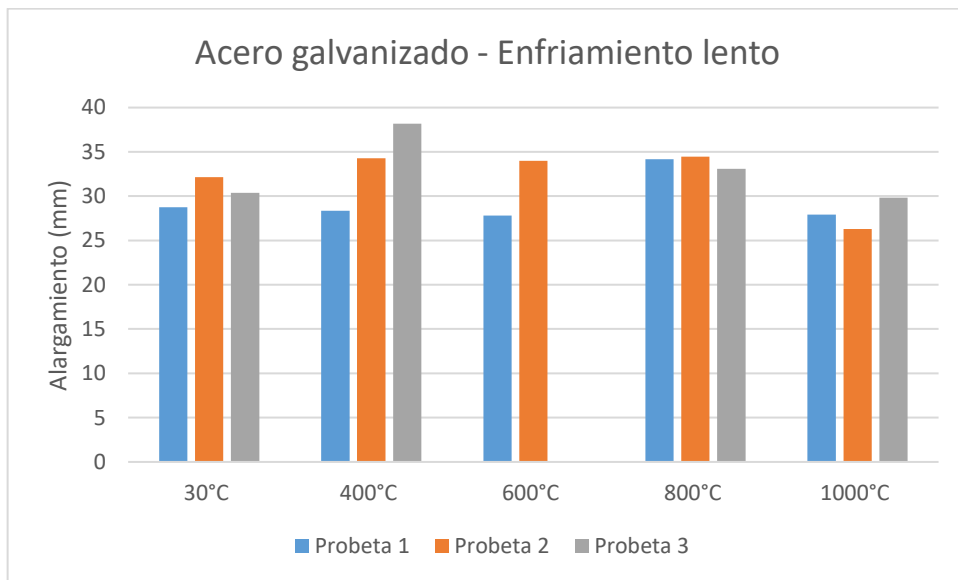


Figura 4.76. Gráfica Alargamiento-Temperatura generada a partir de los alargamientos máximos de cada probeta de acero galvanizado enfriada lentamente en función de la temperatura.

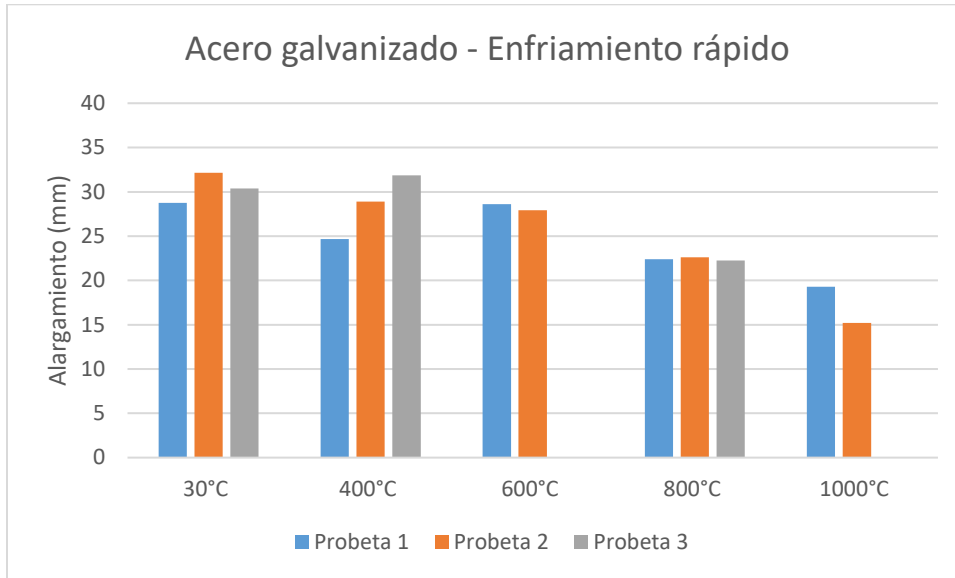


Figura 4.77. Gráfica Alargamiento-Temperatura generada a partir de los alargamientos máximos de cada probeta de acero galvanizado enfriada rápidamente en función de la temperatura.

Este hecho puede estar relacionado con la microestructura del metal y los granos que la forman. Como se ha explicado en el caso anterior, con la temperatura los granos aumentan de tamaño provocando una distensión de los granos y disminuyendo así la tensión, y provocando más fácilmente un aumento del alargamiento. Pero, como este hecho no ha sucedido así, podríamos estar ante otro caso de un material recocido (laminado en caliente), el cual, al ser calentado por segunda vez, provocaría una bajada muy sutil de la tensión y, en el caso del enfriamiento lento, un alargamiento que puede suceder más rápidamente como ocurre cuando se alcanzan los 1000°C.

En el caso del enfriamiento rápido los valores sí responderían en gran medida al caso del material recocido, sin embargo, al llegar a 800°C, se produce una disminución del alargamiento, lo cual podría deberse a un comienzo de transformación a martensita, el cual tiene un comportamiento cerámico y no tiene casi alargamiento o deformación. Esto podrá confirmarse a través de la metalografía, la cual revelará si realmente se ha transformado a martensita o no.

### 4.3 Dureza

Después de realizar con el durómetro 3 descargas por probeta, se han obtenido los resultados de durezas siguientes (Tabla 4.1):

Tabla 4.1. Resultados del ensayo de dureza obtenidos mediante durómetro.

		Enfriamiento lento			Enfriamiento rápido		
		Descarga 1	Descarga 2	Descarga 3	Descarga 1	Descarga 2	Descarga 3
Aluminio	T <sup>a</sup> Ambiente	(111,6)	(114,0)	(115,0)	-	-	-
	200°C	(103,0)	(103,5)	(106,0)	88,5	89,5	80,0
	400°C	74,5	78,0	70,5	96,5	92,5	95,5
	600°C	98,0	98,5	97,5	98,5	100,0	99,5
Acero Inoxidable	T <sup>a</sup> Ambiente	84,0	85,5	84,5	-	-	-
	400°C	82,0	81,5	81,5	81,0	80,5	80,0
	600°C	78,0	75,5	77,5	51,5	52,5	52,0
	800°C	81,0	79,5	80,0	74,0	75,5	76,5
	1000°C	64,5	67,5	71,0	68,0	69,0	65,5
Acero Galvanizado	T <sup>a</sup> Ambiente	80,0	81,0	80,5	-	-	-
	400°C	50,0	54,5	55,0	41,0	48,0	44,0
	600°C	48,5	52,0	47,5	59,5	63,0	56,5
	800°C	83,5	85,0	85,5	84,0	85,5	85,0
	1000°C	44,5	36,5	38,5	87,0	84,5	81,0

Se puede observar, en los resultados de las probetas de aluminio, que los primeros valores de las temperaturas ambiente y 200°C con enfriamiento lento, son igual o superiores a 100. Después, parece que hace una ligera bajada en 400°C y vuelve a rondar el 100 en 600°C. El resto de valores del enfriamiento rápido también son muy elevados, casi rozando el límite superior de la escala Rockwell F, que se encuentra en el 100.

Como se ha explicado anteriormente, a medida que aumenta la temperatura, se produce un reblandecimiento, por tanto, no es posible que aumente la dureza a medida que aumenta la



Figura 4.77. Imagen de una probeta en la que se muestra como el indentador ha marcado en exceso la superficie posterior.

temperatura. Además, la mayoría de valores están fuera de escala. Este fenómeno puede ser producido por el hecho de que quizás el material se ha reblandecido en exceso hasta el punto de que la base del durómetro, que es de acero, ha empezado a interactuar con el indentador y realmente se está valorando una mezcla de acero y aluminio. Se puede

comprobar mirando la parte de atrás de la probeta, ya que se pueden observar marcas de la descarga del durómetro, lo cual no debería verse (Figura 4.77). Esto parece indicar que habría que utilizar una escala menor junto con un indentador y una carga diferente. Al utilizar esta escala más baja, los valores disminuirían y entrarían dentro de una zona más computable y no mellarían la parte trasera de la probeta.

En cuanto al acero inoxidable, se puede advertir en la tabla 4.1 que, a medida que aumenta la temperatura en las probetas enfriadas lentamente, se produce un ligero descenso de los valores de dureza hasta la temperatura de 600°C. Al llegar a 800°C, la dureza aumenta unos pocos puntos para volver a disminuir al llegar a 1000°C. En las probetas enfriadas rápidamente, se produce un efecto similar, aunque ligeramente más pronunciado en los aumentos y disminuciones.

Este efecto de disminución de la dureza a medida que aumenta la temperatura, se debe a que los granos que forman la estructura del acero se agrandan, provocando una distensión de los mismos y, por lo tanto, el descenso de la dureza. Al llegar a 800°C, el acero podría haber comenzado a cambiar de fase y a formar austenita. Entonces, estaríamos ante una mezcla de fases y, al enfriarse, solo parte de la fase austenítica habría vuelto a transformarse en ferrita. Por ese motivo, aun quedaría parte de austenita y habría hecho que su dureza aumentara ligeramente. No obstante, al seguir aumentando la temperatura hasta los 1000°C, la dureza disminuye, probablemente producido por los elementos de aleación que, en concentraciones significativas, pueden producir dramáticas alteraciones en el diagrama de fases hierro-carburo <sup>6</sup>.

En el acero galvanizado observamos, para el enfriamiento lento, una progresión similar a la del acero inoxidable, disminuyendo la dureza a medida que aumenta la temperatura, aumentando a 800°C y disminuyendo nuevamente al alcanzar los 1000°C. En el enfriamiento rápido sucede algo distinto. Se puede ver como la dureza va en aumento a medida que se eleva la temperatura.

La explicación de la progresión del enfriamiento lento es similar a lo que sucede con el acero inoxidable. Los granos que forman el acero galvanizado van creciendo y provocando una distensión durante la fase de ferrita ( $\alpha$ ) + cementita ( $Fe_3C$ ). En 800°C, según el diagrama de fases hierro-carburo <sup>7</sup> la probeta se encontraría en el límite de la fase  $\alpha$  +  $\gamma$  con la fase  $\gamma$  (austenita), debido al bajo contenido en C que tiene el material, solo un 0,05 de carbono. Por eso, gran parte de los granos se han transformado y ha aumentado la dureza. Las probetas



de 1000°C, deberían haber llegado a la fase  $\gamma$ , con una austenización completa, por ese motivo la dureza ha disminuido, porque al enfriar lentamente y cambiar de fase desde la austenización, volvemos a encontrar  $\alpha + \gamma$ , pero son unas  $\alpha + \gamma$  diferentes de las iniciales con unas nuevas propiedades mecánicas.

El caso del enfriamiento rápido es diferente. Como se ha indicado en el apartado anterior, la tensión en los aceros en este caso ha disminuido. Como la tensión y la dureza son propiedades que están correlacionadas deberían aumentar o disminuir a la vez, por lo que este resultado es contradictorio. Una de las posibles causas podría ser que el acero estuviera recocido y su estructura estuviera cómodamente estable por ser un material laminado en caliente.

#### **4.4 Metalografía**

Como se explicó en el apartado de materiales y métodos, el proceso para obtener una imagen metalográfica es muy laborioso y delicado, por ese motivo se decidió qué muestras eran las más idóneas para realizar este ensayo.

Teniendo en cuenta que el acero es un material más común en la construcción que el aluminio y que, de este último, era muy difícil el proceso de desbastado y pulido, se excluyó del ensayo.

El acero inoxidable también presentó un inconveniente para este proceso, el espesor de las probetas era demasiado fino, de 1mm, lo cual impedía realizar correctamente el desbastado y la posterior observación. Además, la cantidad de precipitados que pueda contener, como el níquel (austenizado) y cromo, pueden afectar drásticamente en el diagrama de fases, así como la cantidad de aleaciones diferentes que no nos permiten saber cómo se segregan los materiales <sup>7</sup>. Por estos motivos, también se excluyó del ensayo de metalografía.

Finalmente, de entre todas las muestras de acero galvanizado, se decidió que las más idóneas eran las de temperatura ambiente, 600, 800 y 1000°C, y sus variables con enfriamiento lento y rápido.

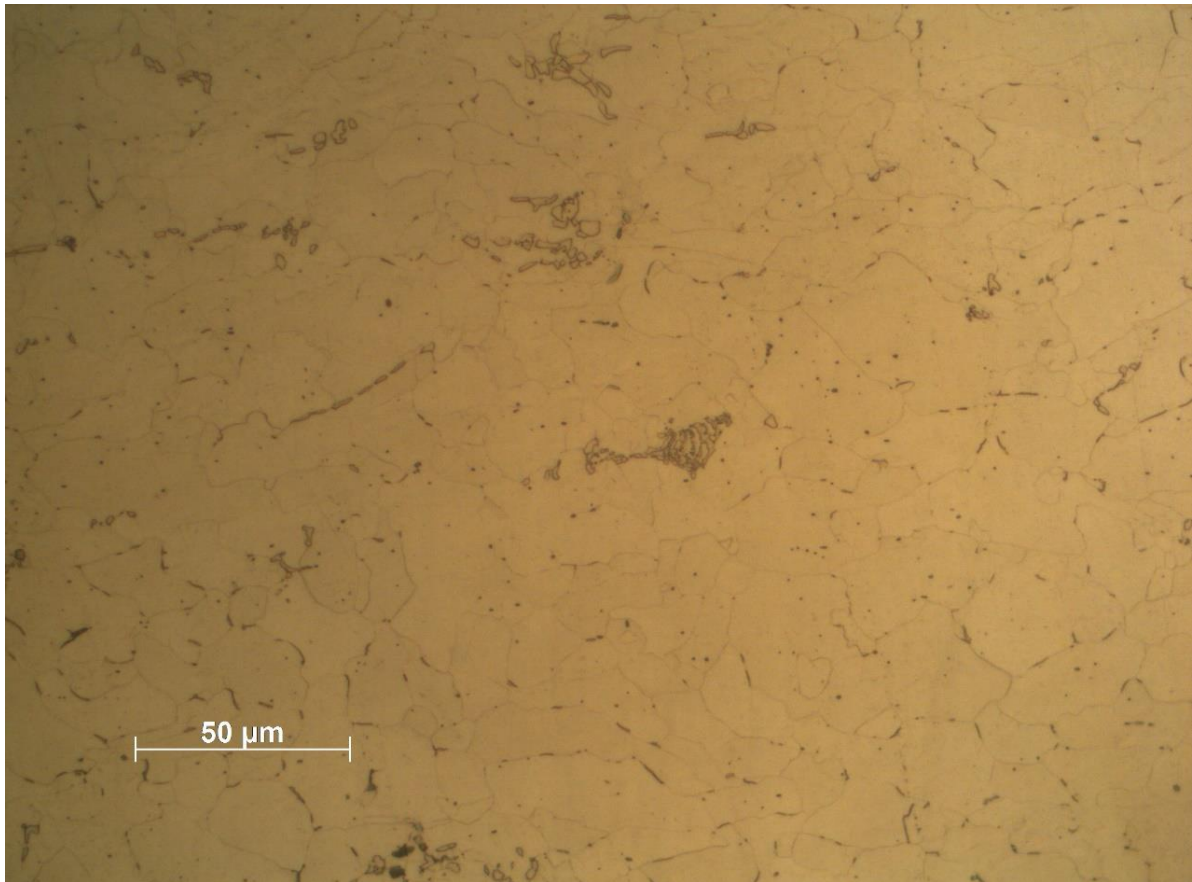


Figura 4.78. Imagen metalográfica del acero galvanizado a temperatura ambiente x50.

En la figura 4.78 se pueden ver las dos fases que componen el acero cuando está a temperatura ambiente. Tenemos ferrita (parte clara) y perlita (parte oscura), la cual es escasa debido al bajo contenido de carbono que tiene este acero en concreto. Se puede observar claramente como la perlita se encuentra situada en los límites de los granos.

La parte oscura, que pertenece a la perlita, debe tener forma de cebra, con láminas intercaladas de las dos fases que la componen (blanco-negro-blanco-negro). En este caso, al ser el grano pequeño y haber utilizado un microscopio óptico, no podemos comprobar que estas partes oscuras estén laminadas, pero es posible que se pueda comprobar si los granos aumentan de tamaño.

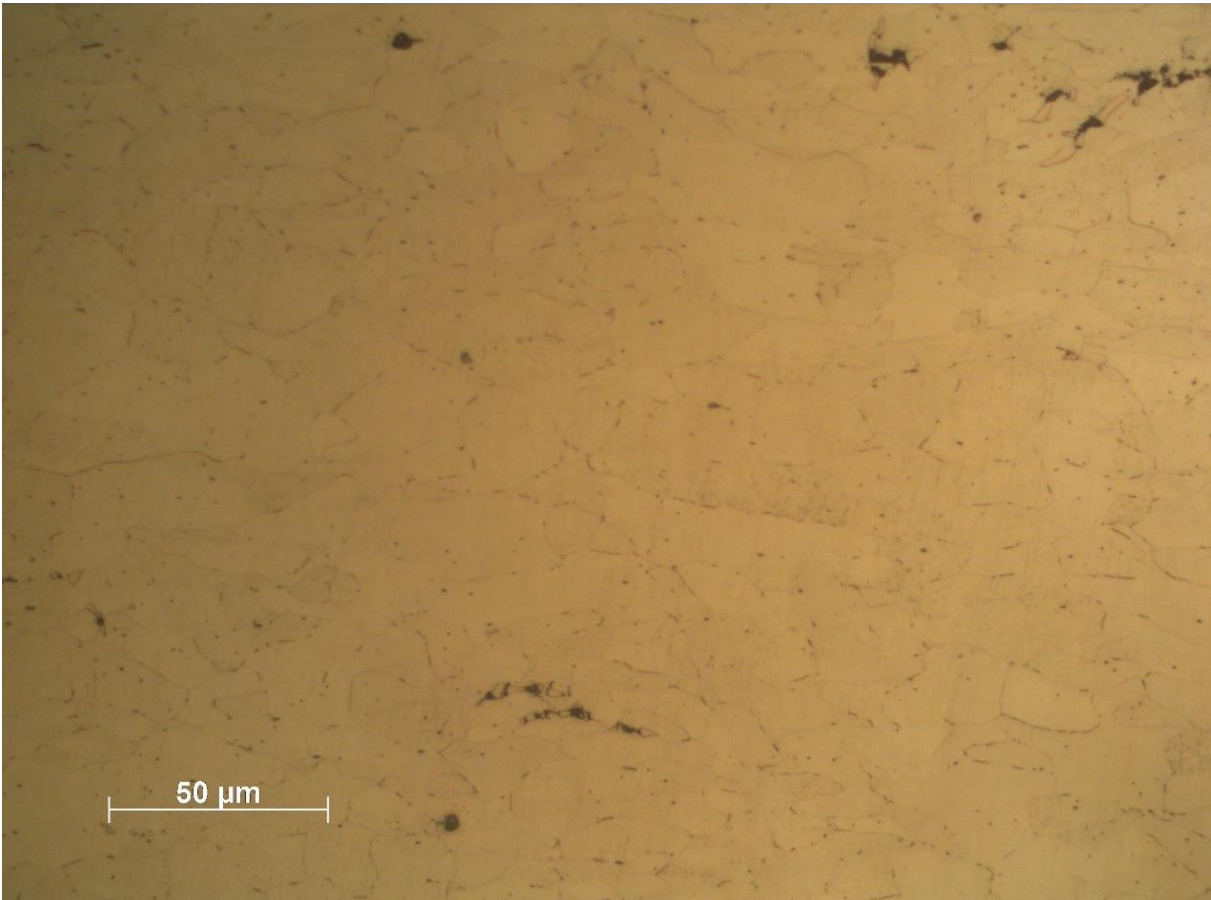


Figura 4.79. Imagen metalográfica del acero galvanizado a 600°C con enfriamiento lento x50.

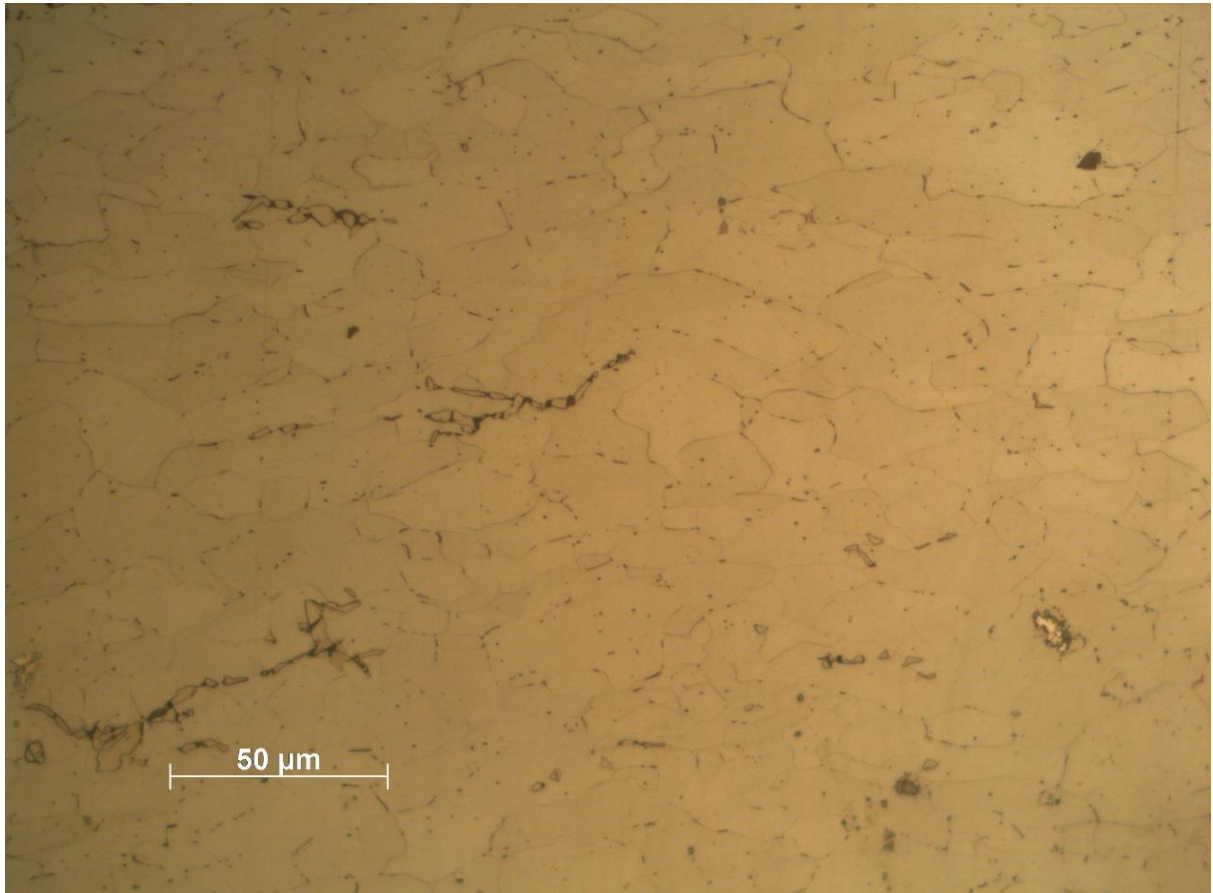


Figura 4.80. Imagen metalográfica del acero galvanizado a 600°C con enfriamiento rápido x50.

Las figuras 4.79 y 4.80 son muy similares entre sí y con la figura 4.78, tienen dos fases visibles, la ferrita y la perlita. En estos dos casos, los granos han aumentado ligeramente de tamaño, lo cual corrobora los datos obtenidos en los ensayos anteriores sobre la disminución de la tensión. Además, se puede observar cómo los granos oscuros también se han agrandado, dejando comprobar que, efectivamente, se trata de perlita por sus láminas de ferrita y cementita intercaladas.

El motivo por el cual las dos probetas tienen similares microestructuras es que tanto una como la otra no han aumentado tanto de temperatura como para llegar a cambiar de fase, por lo tanto, simplemente han sufrido el agrandamiento de los granos.

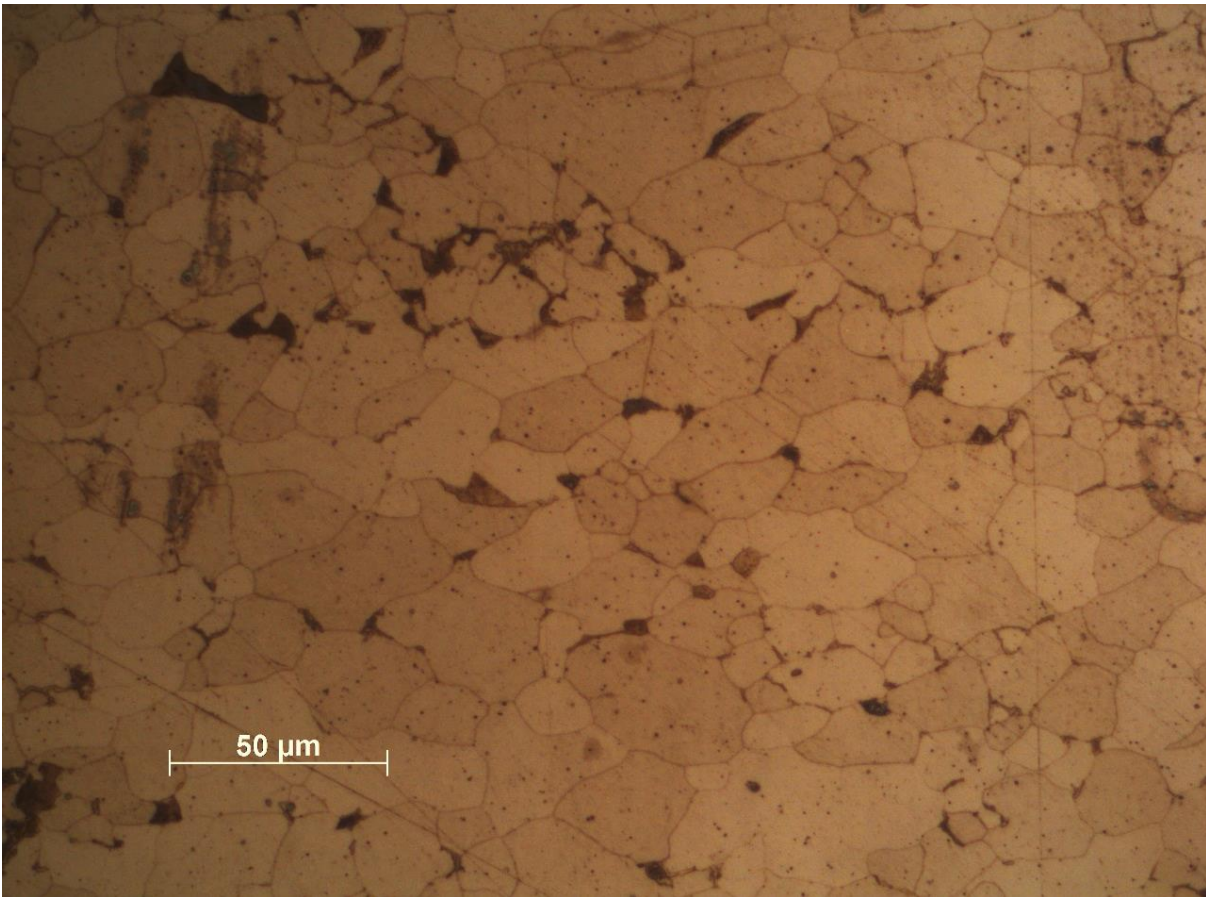


Figura 4.81. Imagen metalográfica del acero galvanizado a 800°C con enfriamiento lento x50.

La figura 4.81 muestra como el acero ha cambiado de fase a la fase intermedia que hay antes de la austenización ( $\alpha + \gamma$ ). Por la cantidad de carbono que tiene el acero (0,05%) este material se encuentra muy a la izquierda del diagrama de fases, por lo tanto, la temperatura de austenización cuesta más de alcanzar. Respecto a esta imagen, se puede observar que el acero se encuentra entre la temperatura b y c de este diagrama. Es, decir, la perlita se ha agrandado en los límites de los granos.

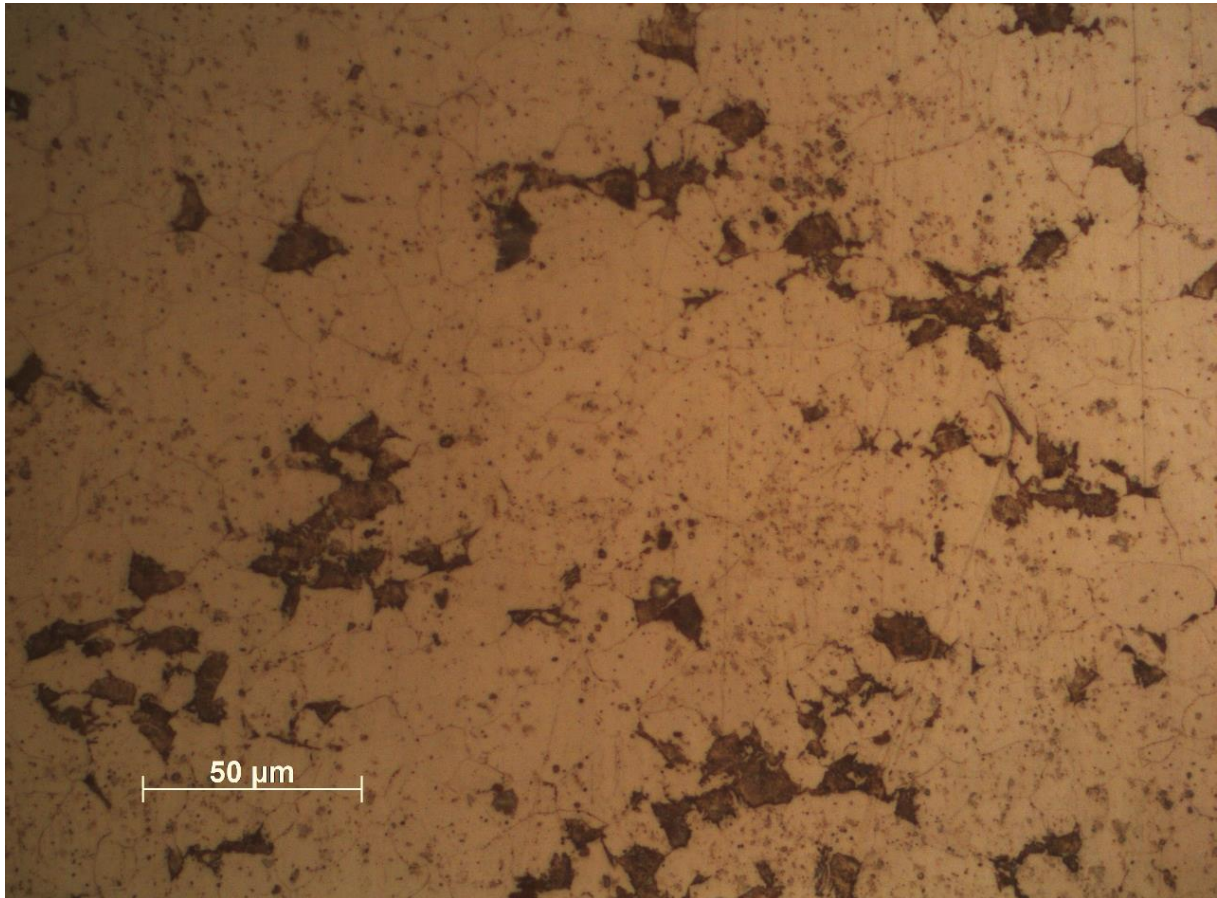


Figura 4.82. Imagen metalográfica del acero galvanizado a 800°C con enfriamiento rápido x50.

En la figura 4.82, se observan diferencias con respecto a la misma temperatura con enfriamiento lento. Se pueden ver dos fases, la fase clara podría ser ferrita ( $\alpha$ ), y la oscura podrían ser uno de estos dos elementos: perlita o martensita. Si se utilizara un microscopio electrónico, se podría saber al momento de cual se trata, pero al utilizar un microscopio óptico solo se puede ver una fase oscura e intuir de qué fase se trata combinando el resto de ensayos.

Teniendo en cuenta que ha habido una transformación y que la dureza ha aumentado a esta temperatura y la tracción se ha mantenido bastante estable, podría ser que se haya formado algo de martensita, ya que los resultados del ensayo de tracción indican que el alargamiento ha disminuido. Esto indica que podría haber sufrido un ligero cambio hacia unas propiedades cerámicas.

A pesar de esto, la transformación no ha sido suficiente como para afirmar que se trate únicamente de martensita y todo apunta a que puede haber una mezcla entre martensita y perlita. También, es posible que el crisol utilizado como recipiente impidiera que la probeta alcanzara la temperatura suficiente como para terminar de realizar esta transformación.

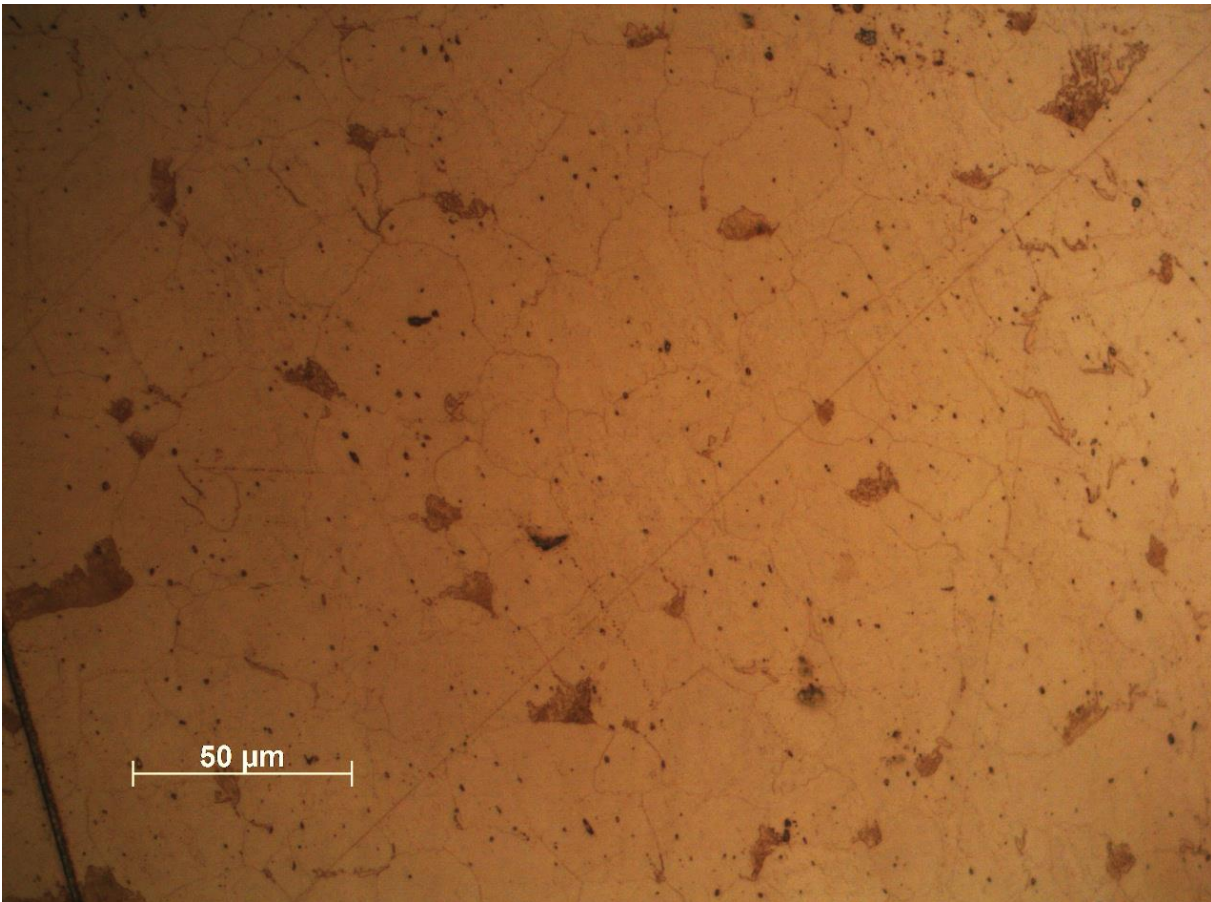


Figura 4.83. Imagen metalográfica del acero galvanizado a 1000°C con enfriamiento lento x50.

En la figura 4.83, se puede observar que vuelven a aparecer dos fases. Esto quiere decir que, al aumentar la temperatura hasta los 1000°C, el acero ha austenizado y, al enfriarse lentamente, la austenita ha dejado de ser soluble y “ha expulsado” la ferrita que contenía. De este modo, ha continuado enfriándose lentamente hasta que la austenita se ha transformado en perlita + ferrita. Esto provoca que sea más débil, lo cual encaja con los resultados que se han obtenido en los anteriores ensayos. Hay que tener en cuenta que cuando se calienta un acero por encima de los 800°C aparecen las dos fases que hacen que el grano se agrande y que, al enfriarse vuelve a las dos fases anteriores. Si esas fases no son del mismo tamaño que las primeras, estaremos ante unas nuevas fases con unas nuevas propiedades mecánicas asociadas. Esto implica que no se puede dar por hecho que si el metal se encuentra en la misma fase vaya a tener las mismas propiedades, si ha habido calentamiento, se habrá visto afectado.



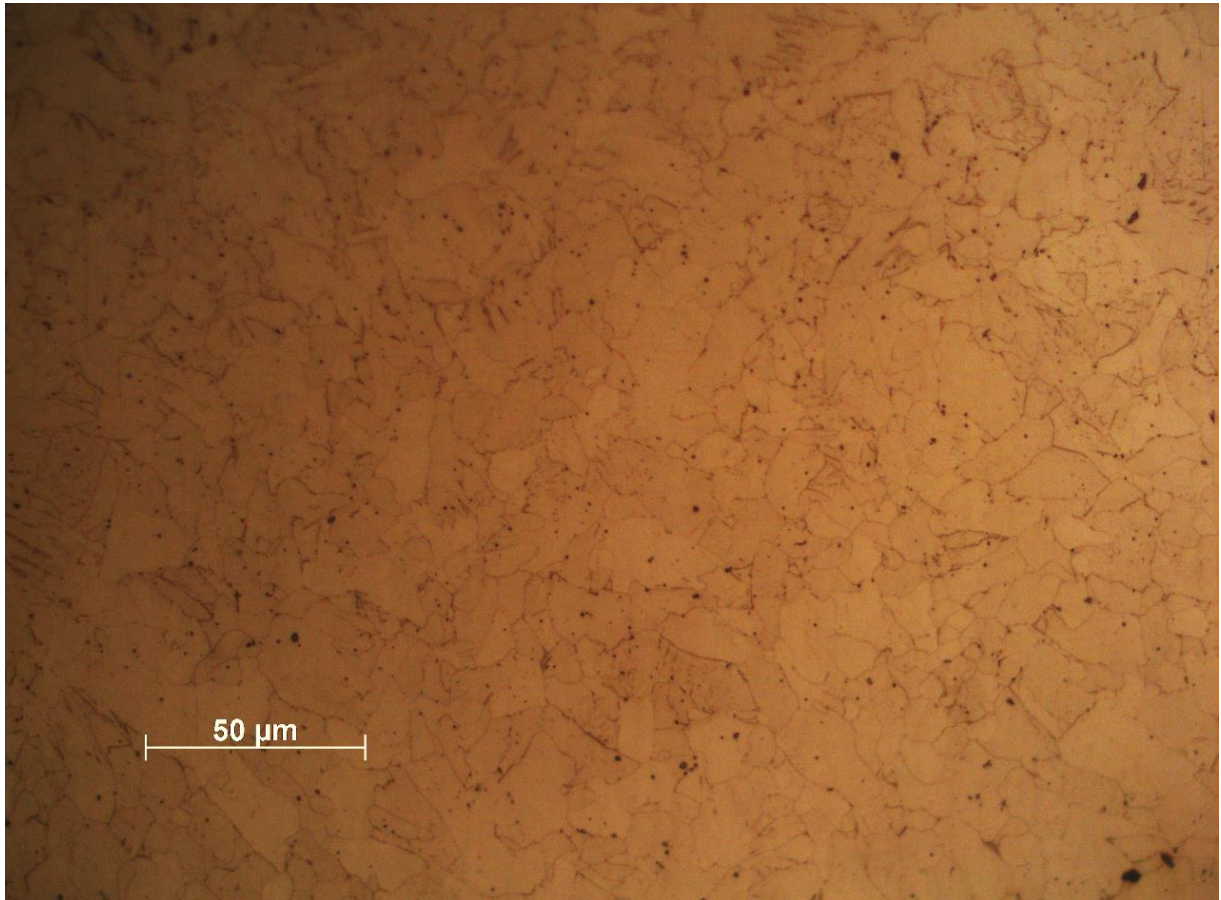


Figura 4.84. Imagen metalográfica del acero galvanizado a 1000°C con enfriamiento rápido x50.

Como se ha explicado anteriormente, si el acero alcanza la austenización y después se enfría lo suficientemente rápido, éste debería transformarse en martensita completamente. En la figura 4.84, podemos ver como esto no es así, ya que no se observa ninguna estructura parecida a la martensita. Se puede advertir que solo hay una sola fase, ferrita, y que el carbono que debería haberse transformado es inexistente. Es posible que se deba al hecho de que esa transformación requiere mucha rapidez en el proceso y que, por la metodología de este proyecto, no haya sido igual al proceso necesario para la obtención de martensita.

#### **4.5 Reflexiones finales**

Se ha observado, en todos los ensayos, que las fases de transformación del metal afectan a las propiedades mecánicas. A temperaturas por debajo de los 723°C, aunque no se hayan producido cambios de fase, se ha detectado que las propiedades pueden verse alteradas con el incremento de temperatura. Por encima de ese valor, se ha observado que los cambios de fase han quedado incompletos, generando una mezcla de fases que puede provocar la creación de unas propiedades mecánicas impredecibles. Y, aunque en este caso no se haya podido controlar la transformación de fases, en un caso real de incendio muy posiblemente tampoco se podrían controlar, ya que son situaciones imprevisibles. Para poder trabajar con fases completas se deberían alcanzar temperaturas algo más elevadas o mantener temperaturas de unos 800°C durante un tiempo prolongado.

Se podría decir que son importantes todos los análisis en conjunto ya que, aunque por sí solos se puede extraer información, no se puede afirmar una hipótesis concreta solo con un ensayo. Es necesario tener una visión del conjunto para poder averiguar qué les ha sucedido a las muestras analizadas.

En este proyecto ha habido algunas limitaciones que pueden haber afectado a la obtención de los resultados esperados. Se trata de variables que no se han controlado del todo, como el tipo de recipiente que se usó en el tratamiento de temperatura, el cual es posible que haya impedido el alcance de la temperatura esperada; el hecho de que la obtención del material haya sido a partir de retales, lo que ha impedido conocer la composición exacta de alguno de ellos; o que se utilizó el mismo recipiente con agua para el enfriamiento de las probetas ensayadas a la misma temperatura, lo cual implicó verter tres muestras de un metal en el agua y, éstas pudieron calentarla antes de verter las siguientes tres muestras.

De cara a futuros proyectos, se podrían mejorar los resultados obtenidos controlando este tipo de variables y mejorando así el método utilizado.

## 5 Conclusiones

De este proyecto se han extraído las siguientes conclusiones:

- Cuando hay un incendio, los materiales metálicos que hay en la escena quedan afectados y, aunque pueda parecer que no tengan reacción al fuego por su apariencia, realmente hay muchas variables que afectan a sus propiedades mecánicas. Por eso, se deben entender las transformaciones que sufre la estructura y porqué quedan afectadas sus propiedades.
- Las variables, como conocer la composición de los metales, utilizar material adecuado para el análisis, etc. probablemente, afectan directamente a los resultados obtenidos y deben ser tenidos en cuenta en futuros estudios.
- Después de realizar varios análisis de la estructura de los metales, se puede asegurar que, si un incendio ha superado los 700°C, en el caso de los aceros, el metal habrá sido dañado debido a que su microestructura ha cambiado. Se habrá reblandecido y no se puede garantizar que conserve ninguna de sus propiedades iniciales. Al tener una nueva estructura, tendrá también unas nuevas propiedades. Por lo tanto, habrá que evaluar si esas nuevas propiedades mecánicas pueden servir para el uso al que estaba destinado.
- Si observamos la microestructura de una muestra sin saber si ha sido sometida a temperatura, no podemos afirmar que pertenezca a una fase concreta. La estructura de la fase de un metal austenizado enfriado lentamente, puede parecerse a la de un metal que solo ha alcanzado unos 200°C ya que ambos contienen ferrita y perlita, incluso puede que sus propiedades mecánicas sean parecidas, pero nunca serán las mismas. Por tanto, en un análisis pericial, podrían confundirse y proporcionar hipótesis erróneas.
- Este conjunto de ensayos, pueden servir, no tanto como herramienta de prevención para saber qué ha pasado en un incendio y no cometer el mismo error, sino más como una herramienta de evaluación del estado en el que ha quedado el material en sí y poder saber si ese elemento sigue cumpliendo los requisitos que se le asignaron inicialmente.

- Los metales son materiales que conservan la microestructura una vez se ha transformado, sus propiedades no pueden ser modificadas si no es por otro tratamiento de temperatura. Por ese motivo, son los mejores aliados en el análisis pericial, pueden conservar esas condiciones a pesar del paso del tiempo y por mucho que se alargue una investigación, nunca se perderán las pruebas.

## 6 Agradecimientos

Mi más sincero agradecimiento a todas las personas que me han ayudado a realizar este proyecto. A mis tutoras Ana Lacasta y Laia Haurie, por sus consejos. A Elena Xuriguera y José Antonio Padilla "Padi", del grupo DIOPMA del departamento de Química, Física y Ciencia de Materiales de la facultad de química de la Universitat de Barcelona, que han tenido la generosidad de dedicar parte de su tiempo a ayudarme a realizar dos de los ensayos y han compartido conmigo su conocimiento sobre el tema de este trabajo. A la empresa DECA Group, en la cual trabajo, que me han proporcionado todo el material para ensayar. A mi familia, por su apoyo y a Sergio, que además de su ayuda y su paciencia, siempre me anima en los momentos más duros.

## 7 Bibliografía

1. Giraldo Forero, M. del P. Evaluación del comportamiento del fuego y protección contra incendios en diversas tipologías de fachadas. *TDX (Tesis Doctorals en Xarxa)* (2012).
2. Wei, M. M., Zhao, Z. & Liang, D. Experiment of Electrical Fire Burned Copper Wire and Parameters Analysis on Metallographic Test of Melted Mark. *Procedia Engineering* **11**, 496–503 (2011).
3. Wei, M. M., Mo, S. J., Liang, D. & Li, J. B. The experiment on melted mark formed by copper wire in electrical fire and the analytic researcher on the feature parameters of metallographic structure. *Procedia Engineering* **11**, 504–513 (2011).
4. Wang, W., Zhao, W. & Qu, J. Effect of Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of 2.25Cr–1Mo Steel. *steel research international* **84**, 178–183 (2013).
5. Chi, J.-H. & Peng, P.-C. Using the microstructure and mechanical behavior of steel materials to develop a new fire investigation technology. *Fire and Materials* **41**, 864–870 (2017).
6. Callister, W. D. J. *Introducción a la Ciencia e Ingeniería De Los Materiales. The University of Utah*. (Editorial Reverté, S.A., 2002).
7. Smith, W. F. (William F., Hashemi, Javad., Nagore Cázares, Gabriel. & González-Caver, P. Alejandro. *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*. (McGRAW-HILL INTERAMERICANA EDITORES, S. A. DE C.V., 2006).
8. Universidad Complutense de Madrid. Proyecto de Innovación Atlas Metalográfico. <https://www.ucm.es/atlasmetalografico/x26>.