

(19)



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS
ESPAÑA



(11) Número de publicación: **2 779 929**

(51) Int. Cl.:

C22C 21/02 (2006.01)

C22F 1/043 (2006.01)

(12)

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

(96) Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **23.07.2018 E 18185053 (8)**

(97) Fecha y número de publicación de la concesión europea: **19.02.2020 EP 3434797**

(54) Título: **Aleaciones avanzadas de aluminio fundido para aplicación de motor automotriz con propiedades superiores de alta temperatura**

(30) Prioridad:

28.07.2017 US 201715663510

(45) Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:

20.08.2020

(73) Titular/es:

FORD GLOBAL TECHNOLOGIES, LLC (100.0%)
Fairlane Plaza South 330 Town Center Drive
Suite 800
Dearborn, MI 48126, US

(72) Inventor/es:

LI, MEI;
ZINDEL, JACOB;
GODLEWSKI, LARRY;
GHAFFARI, BITA;
HUO, YANG;
ENGLER-PINTO, CARLOS y
LAI, WEI-JEN

(74) Agente/Representante:

SÁEZ MAESO, Ana

ES 2 779 929 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Aleaciones avanzadas de aluminio fundido para aplicación de motor automotriz con propiedades superiores de alta temperatura

Campo

- 5 La presente divulgación se relaciona con una composición de aleación de aluminio y un método de fabricación para aplicaciones de fatiga de ciclo alto y alta temperatura, por ejemplo, en cabezas de cilindros y bloques de motor para vehículos de motor.

Antecedentes

- 10 Las declaraciones en esta sección simplemente proporcionan información de antecedentes relacionada con la presente divulgación y pueden no constituir la técnica anterior.

Dos métodos para mejorar la economía de combustible en vehículos de pasajeros que se han empleado en la técnica incluyen reducir el peso del vehículo y desarrollar motores de alto rendimiento. Para aumentar la eficiencia del motor, la temperatura máxima de funcionamiento de los componentes del motor ha aumentado de aproximadamente 170 °C en motores anteriores hasta temperaturas máximas muy superiores a 200 °C en motores recientes. El aumento de las 15 temperaturas operativas requiere un material con propiedades mejoradas en términos de resistencia a la tracción, a la fluencia y a la fatiga. Las aleaciones de aluminio fundido con base en el sistema eutéctico Al-Si con adiciones de Cu y Mg, tal como AA319, AA356 y AS7GU, se han utilizado ampliamente en bloques y cabezales de motores de automóviles debido a su baja densidad, alta conductividad térmica, buena capacidad de fundición y excelente 20 resistencia a baja temperatura. La patente alemana DE 100 26 626 C1 divulga una aleación con base en Al-Si destinada para uso en la fabricación de cabezas de cilindros y bloques de motor para vehículos de motor.

Estas aleaciones de aluminio fundido alcanzan su resistencia principalmente a partir de precipitados coherentes o semicoherentes que se forman durante el tratamiento térmico posterior a la solidificación, por ejemplo, precipitados θ' -Al₂Cu, Q'-Al₅Cu₂Mg₈Si₆ y β' -Mg₂Si. Estos pequeños precipitados son generalmente metaestables en lugar de estar en una fase de equilibrio. Como resultado, las aleaciones de aluminio mencionadas anteriormente pierden su resistencia 25 a temperatura elevada porque estos precipitados de fortalecimiento metaestables se disuelven en la matriz de Al o se vuelven gruesas en fases de equilibrio que no proporcionan el mismo nivel de fortalecimiento. Los datos experimentales muestran que el límite elástico y la máxima resistencia a la tracción de la aleación AA319 con un tratamiento térmico T7 disminuye drásticamente cuando se expone a temperaturas entre 170 °C y 200 °C. Además, el límite de resistencia de la aleación disminuye de 88 ± 6 MPa a temperatura ambiente hasta 62 ± 8 MPa a 120 °C.

30 Una estrategia común para mejorar el rendimiento a temperatura elevada de las aleaciones de aluminio fundido es modificar las aleaciones con la adición de metales de transición (TM). Estos TM forman precipitados térmicamente estables L₁₂-Al₃ TM, que son resistentes al engrosamiento a altas temperaturas. Sin embargo, para la gran mayoría de estas aleaciones Al-TM, los TM se agregan a una aleación de aluminio diluida, lo que conduce a un rendimiento 35 muy pobre a temperatura ambiente, ya que la solubilidad de los TM en la matriz Al es tan pequeña que la fracción de volumen y la densidad de estos precipitados son insuficientes para proporcionar un fortalecimiento significativo. Por ejemplo, la solubilidad máxima de Ti, V y Zr en Al es 1 % en peso, 0.6 % en peso y 0.25 % en peso, respectivamente, mucho más pequeña que la de los elementos de fortalecimiento comúnmente utilizados como Cu (4.7 % en peso) y Mg (14.9 % en peso).

40 La presente divulgación aborda la mejora de la fatiga de alto ciclo y el rendimiento a temperaturas elevadas para aleaciones de aluminio fundido que tienen TM seleccionados, especialmente en aplicaciones de motores de vehículos de motor.

Resumen

En una forma de la presente divulgación, se proporciona una aleación de aluminio de alta resistencia a la fatiga. La aleación comprende en % en peso:

Aluminio (Al)	balance + impurezas
Cobre (Cu)	3.0-3.5
Hierro (Fe)	0-1.3
Magnesio (Mg)	0.24-0.35
Manganoso (Mn)	0-0.8
Silicio (Si)	6.5-12.0

Estroncio (Sr)	0-0.025
Titanio (Ti)	0.05-0.2
Vanadio (V)	0.20-0.35
Zinc (Zn)	0-3.0
Zirconio (Zr)	0.2-0.4
Otros elementos	0-0.5 máx

La aleación define una microestructura que tiene una matriz de aluminio con el Zr y el V en solución sólida después de la solidificación. La matriz tiene una solución sólida Zr de al menos un 0.16 % después del tratamiento térmico y una solución sólida V de al menos 0.20 % después del tratamiento térmico, y tanto Cu como Mg se disuelven en la matriz de aluminio durante el tratamiento térmico y posteriormente se precipitan durante el tratamiento térmico. En una forma, la aleación es capaz de soportar hasta 98 MPa hasta 10^7 ciclos a hasta 180 °C después de 100 horas de remojo a la temperatura de prueba.

En otra aleación de la presente divulgación, la aleación comprende en % en peso: Si 6.5-8.0 %, Fe 0-0.2 %, Mn 0-0.4 %, y Zn es 0 % sin cambiar los intervalos de composición de los otros elementos y bloques de motor de cilindros habilitadoras formadas por fundición a presión semipermanente.

En otra aleación más de la presente divulgación, la aleación comprende en % en peso: Si 8.0-12.0 %, Fe 0.2-1.3 %, y Sr es 0 % sin cambiar los intervalos de composición de los otros elementos y habilitar bloques de motor formados por fundición a alta presión.

En otra aleación de la presente divulgación, la aleación comprende en % en peso: Si 7.2-7.7 %, Cu 3.2-3.5 %, Mg 0.24-0.28 %, Zr 0.33-0.38 %, V 0.22-0.28 %, Mn 0-0.15 %, y Ti 0.08-0.1 % sin cambiar los intervalos de composición de los otros elementos. Una forma de esta aleación de la presente divulgación comprende en % en peso: Si 7.5 %, Cu 3.4 %, Mg 0.25, Zr 0.35 %, V 0.25 %, Ti 0.1 %, Fe 0 %, Mn 0 % y Sr 0 % sin cambiar los intervalos de composición de los otros elementos.

En una aleación de la presente divulgación, la aleación comprende en % en peso de Zr 0.33-0.38 % y V 0.22-0.28% sin cambiar los intervalos de composición de los otros elementos. Una forma de esta aleación de la presente divulgación comprende en % en peso de Zr. 0.35 % y V 0.25 %.

En una forma de la presente divulgación, se proporciona un proceso de tratamiento térmico de una aleación Al-Si-Cu-Mg-Fe-Zn-Mn-Sr-TM con el proceso que incluye Zr y V como TM. El proceso comprende el tratamiento térmico de la aleación para producir una microestructura que tiene una matriz de aluminio con Zr y V en solución sólida después de la solidificación. La matriz de aluminio contiene tanto la solución sólida Zr de al menos 0.16 % como la solución sólida V de al menos 0.20 % después del tratamiento térmico. La matriz de aluminio incluye Cu y Mg disueltos en la matriz de aluminio durante el tratamiento térmico y posteriormente precipitados durante el tratamiento térmico.

En un proceso de la presente divulgación, la aleación del proceso comprende en % en peso: 6.5-8.0 % de Si, 3.0-3.5 % de Cu, 0.24-0.35 % de Mg, 0.2-0.4 % de Zr, 0.20-0.35 % de V, 0-0.2 % de Fe, 0-0.40% de Mn, 0-0.025 % de Sr, 0.05-0.2 % de Ti, un máximo de 0.5 % total de otros elementos, y el resto Al. Donde la aleación del proceso se forma por fundición de molde semipermanente seguida de un tratamiento térmico de tres etapas. En otro proceso de la presente divulgación, la aleación comprende en % en peso: Si 7.2-7.7 %, Cu 3.2-3.5 %, Mg 0.24-0.28 %, Zr 0.33-0.38 %, V 0.22-0.28 %, Ti 0.08-0.1 %, y Mn 0-0.15 % sin cambiar los intervalos de composición de los otros elementos. En otro proceso de la presente divulgación, la aleación comprende en % en peso: Si 7.5 %, Cu 3.4 %, Mg 0.25 %, Zr 0.35 %, V 0.25 %, Ti 0.1 %, Fe 0 %, Mn 0 % y Sr 0% sin cambiar los intervalos de composición de los otros elementos.

En otro proceso de la presente divulgación, la aleación comprende en % en peso de Zr 0.33-0.38 % y V 0.22-0.28 % sin cambiar los intervalos de composición de los otros elementos. En otro proceso más de la presente divulgación, la aleación comprende Zr 0.35 % en peso y V 0.25 % en peso.

En otro proceso de la presente divulgación, el tratamiento térmico en tres etapas comprende un tratamiento a 375 °C durante 6 horas, durante el cual se disuelven el Cu y el Mg; un tratamiento a 495 °C durante 0.5 horas, durante el cual el Cu y el Mg se disuelven adicionalmente; y un tratamiento a 230 °C durante 3 horas, durante el cual precipitan el Cu y el Mg.

En otro proceso de la presente divulgación, la aleación comprende en % en peso: 8.0-12.0 % de Si, 3.0 - 3.5 % de Cu, 0.24-0.35 % de Mg, 0.2-0.4 % de Zr, 0.20-0.35 % de V, 0.2-1.3 % de Fe, 0.05 - 0.2 % de Ti, 0 - 0.8 % de Mn, 0-3 % de Zn, un total máximo de 0.5 % de otros elementos, y el resto Al. Donde la aleación del proceso se forma mediante fundición a presión seguida de un tratamiento térmico T5 de una sola etapa. En un proceso de la presente divulgación,

el tratamiento térmico T5 de una sola etapa comprende 205 °C durante 4 horas, durante las cuales el Zr se mantiene en la matriz de aluminio al menos al 0.16 % y el V se mantiene en la matriz de aluminio al menos al 0.20 %, y el Cu y Mg se precipitan durante el tratamiento térmico. En otro proceso más de la presente divulgación, la aleación puede soportar hasta 98 MPa hasta 107 ciclos a hasta 180 °C después de 100 horas de remojo a la temperatura de prueba.

- 5 Otras áreas de aplicabilidad resultarán evidentes a partir de la descripción proporcionada aquí. Debe entenderse que la descripción y los ejemplos específicos están destinados únicamente a fines ilustrativos y no están destinados a limitar el alcance de la presente divulgación.

Dibujos

- 10 Para que la divulgación se entienda bien, ahora se describirán varias formas de la misma, a modo de ejemplo, haciendo referencia a los dibujos adjuntos, en los que:

La FIG. 1 es una representación gráfica de los cálculos termodinámicos que representan la solubilidad de Mg (eje horizontal) y Cu (eje vertical), a la temperatura de tratamiento de solución elegida, 495 °C, el texto negro en el gráfico indica las fases de la aleación en diferentes regiones de la gráfica, de acuerdo con el estado de la técnica;

- 15 La FIG. 2 es una representación gráfica de la cinética de crecimiento de L₁₂-(Al, Si)₃TM en un sistema Al-Si-TM (azul) y L₁₂-Al₃TM se precipita en un sistema Al-TM de acuerdo con las enseñanzas de la presente divulgación y la técnica anterior, respectivamente;

- 20 La FIG. 3 es una representación gráfica de una comparación de tres tratamientos térmicos diferentes, donde el tercero incluye el de la presente divulgación con un tratamiento térmico de tres etapas utilizado con una aleación que se formó previamente utilizando una fundición en molde semipermanente (SPMC), donde el primero muestra que Zr y V pierden sus efectos de fortalecimiento en el tratamiento térmico T7;

- 25 La FIG. 4 es una representación gráfica del novedoso tratamiento térmico en tres etapas desarrollado para una aleación de la presente divulgación que se formó previamente utilizando una fundición en molde semipermanente (SPMC), así como microscopía electrónica de transmisión (TEM) y imágenes de espectroscopía de rayos X de energía dispersiva (EDS) de la aleación y gráficos de la concentración del elemento de las mediciones del análisis de microscopio con sonda electrónica (EPMA) en diferentes etapas durante el tratamiento térmico, estableciendo la microestructura de la aleación;

- 30 La FIG. 5 es una representación gráfica de cálculos termodinámicos que muestran la formación de α-Al(Fe, Mn)Si y β-AlFeSi durante la solidificación;

- 35 La FIG. 6 es una representación gráfica de cálculos termodinámicos, que muestra cómo disminuye la temperatura eutéctica con la adición de Zn;

- 40 La FIG. 7 es una representación gráfica del tratamiento térmico T5 para una aleación de la presente divulgación que se formó previamente usando un proceso de fundición a presión a alta presión (HPDC), así como imágenes TEM, estableciendo la microestructura de la aleación resultante de dicho tratamiento térmico;

- 45 La FIG. 8 son gráficos de resistencia final a la tracción, límite elástico y alargamiento de aleaciones y tratamientos térmicos de la presente divulgación y la técnica anterior, que se probaron a diversas temperaturas; y

- 50 La FIG. 9 son gráficos de datos de fatiga para aleaciones de la presente divulgación en comparación con la técnica anterior.

Los dibujos descritos aquí son solo para fines ilustrativos y no pretenden limitar el alcance de la presente divulgación de ninguna manera.

40 Descripción detallada

- Debe entenderse que, a lo largo de los dibujos, los números de referencia correspondientes indican partes y características similares o correspondientes.

- Para la presente divulgación, el sistema de aleación de interés es Al-Si-Cu-Mg-Fe-Zn-Mn-Sr-TM con TM (metales de transición) de particular interés que son V y Zr. Los inventores han descubierto que la cinética de crecimiento de los precipitados que contienen TM (que contiene metales de transición) durante el envejecimiento artificial en los sistemas Al-Si-TM es mucho más rápida que en los sistemas Al-TM.

- 55 La presente divulgación comprende una aleación Al-Si-Cu-Mg-Fe-Zn-Mn-Sr-TMs (TM = Zr o V) combinada con un novedoso tratamiento térmico de tres etapas para aplicaciones de cabezal de cilindro que utilizan un proceso de molde semipermanente y una segunda aleación de Al-Si-Cu-Mg-Fe-Zn-Mn-Sr-TM (TM = Zr o V) para la aplicación de bloque de motor utilizando fundición a presión convencional y tratamiento térmico T5. Con aleaciones novedosas y los métodos de fundición y tratamientos térmicos asociados, esta aleación Al-Si-Cu-Mg-Fe-Zn-Mn-Sr-TM (TM = Zr o V) demuestra propiedades mejoradas de fatiga (límite de resistencia) de hasta 180 °C.

Para aplicaciones de cabezal de cilindro, la aleación de la presente divulgación es una aleación primaria con un bajo contenido de Fe y se prepara por fundición en molde semipermanente (SPMC). La aplicación de cabezal de cilindro utiliza un tratamiento térmico de tres etapas, diseñado para mejorar las propiedades a temperatura ambiente, como el límite elástico y la ductilidad, al tiempo que mantiene los efectos de las adiciones de TM para mejorar el límite de resistencia a 150 °C.

Para aplicaciones de bloque de motor, la aleación de la presente divulgación puede ser una aleación primaria con un contenido bajo de Fe o una aleación secundaria con un contenido relativamente alto de Fe y Mn. Para aplicaciones de bloque de motor, la aleación de la presente divulgación se prepara mediante un proceso de fundición a presión a alta presión (HPDC) y un tratamiento térmico T5, que muestra una mejora significativa en el límite de resistencia a 180 °C.

La presente divulgación divulga aleaciones de aluminio que incluyen las composiciones expresadas en porcentaje en peso en la Tabla 1:

Tabla 1: Composición a manera de ejemplo de la presente divulgación

Elemento	% en peso
Aluminio (Al)	balance + impurezas
Cobre (Cu)	3.0-3.5
Hierro (Fe)	0-1.3
Magnesio (Mg)	0.24-0.35
Manganoso (Mn)	0-0.8
Silicio (Si)	6.5-12.0
Estroncio (Sr)	0-0.025
Titanio (Ti)	0.05-0.2
Vanadio (V)	0.20-0.35
Zinc (Zn)	0-3.0
zirconio (Zr)	0.2-0.4
Otros elementos	0-0.5 máx

En esta forma, la aleación define una microestructura que tiene una matriz con Zr y V en solución sólida después de la solidificación, con solución sólida Zr de al menos 0.16 % después del tratamiento térmico y solución V sólida de al menos 0.20 % después del tratamiento térmico, y Cu y Mg se disolvieron en la matriz durante el tratamiento térmico y posteriormente se precipitaron durante el tratamiento térmico.

Las aleaciones de aluminio de la presente divulgación se preparan por al menos dos métodos. Primero, las fundiciones en molde semipermanente (SPMC) con un proceso de tratamiento térmico de tres etapas se utilizan para aplicaciones de cabezal de cilindro. En segundo lugar, la fundición a presión a alta presión (HPDC) con un tratamiento térmico T5 se utiliza para aplicaciones de bloque de motor.

El cobre (Cu) y el magnesio (Mg) forman al menos dos precipitados de fortalecimiento θ' - (Al_2Cu) y $\text{Q}'-\text{Al}_5\text{Cu}_2\text{Mg}_8\text{Si}_6$) en aleaciones de aluminio fundido. Los cálculos termodinámicos representados en la FIG. 1 indican que a la temperatura de tratamiento de la solución elegida 495 °C, la solubilidad del Cu es alrededor del 3.6 % en peso y la solubilidad del Mg es alrededor del 0.33 % en peso. Para obtener un fortalecimiento suficiente de estos precipitados de Cu y Mg para aplicaciones de motor, a la temperatura de tratamiento de la solución elegida de 495 °C, el contenido de Cu varía de 3-3.5 % en peso y el contenido de Mg varía de 0.24-0.35 % en peso. El cobre excesivo reduce la conductividad térmica, causa inestabilidad dimensional, reduce la capacidad de fundición y provoca desgarros en caliente. En el límite de solubilidad del cobre (~3.6 % en peso a 495 °C) en la matriz Al, el cobre ya no se disuelve en la matriz Al. Por el contrario, el cobre insuficiente no proporciona suficientes precipitados de fortalecimiento. Del mismo modo, el exceso de magnesio aumenta la oxidación de la superficie fundida en la fundición, lo que aumenta el número de inclusiones y defectos en las fundiciones. En el límite de solubilidad del magnesio (~0.33 % en peso a 495 °C) en la matriz Al, el magnesio ya no se disuelve en la matriz Al. Por el contrario, el magnesio insuficiente no proporciona suficientes precipitados de fortalecimiento.

El hierro (Fe) es una impureza en las aleaciones de aluminio fundido y es casi inevitable. En presencia de Si, Fe forma frágiles intermetálicos β -AlFeSi con una morfología de aguja. Estos compuestos intermedios son perjudiciales para las propiedades mecánicas de la aleación. Además, estos intermetálicos aumentan el nivel de porosidad de la aleación al bloquear la alimentación interdendrítica. Para la aleación SPMC de la presente divulgación (tratamiento térmico en tres etapas), el contenido de Fe es inferior al 0.2 % en peso, ya que la pequeña cantidad de Fe afecta mínimamente las propiedades de la aleación. Para la aleación HPDC de la presente divulgación (tratamiento térmico T5), el contenido de Fe varía de 0.2 a 1.3 % en peso. Con la presencia de Fe, se agrega Manganese (Mn) a la aleación para reducir los efectos adversos del Fe sobre las propiedades mecánicas de la aleación.

El manganeso (Mn) transforma las partículas β -AlFeSi, que tienen una morfología de aguja, en la fase α -Al (Fe, Mn)Si. La fase α -Al(Fe, Mn)Si tiene una morfología que se asemeja a la escritura china y es menos dañina para las propiedades mecánicas de la aleación. De acuerdo con los cálculos termodinámicos (FIG. 5), la fracción de fase β -AlFeSi aumenta con el contenido de Fe. Al agregar Mn, se forma α -Al (Fe, Mn)Si antes de que se forme la matriz Al, y la fracción de β -AlFeSi disminuye. Por lo tanto, el contenido de Mn de la presente divulgación varía de 0-0.8 % en peso y el contenido de Mn se ajusta a medida que se ajusta el contenido de Fe. Por ejemplo, para una aleación de 0.8 % en peso de Fe, el contenido de Mn es de 0.8 % en peso, sin embargo, la relación de Fe a Mn no es necesariamente 1:1.

Se añade silicio (Si) al aluminio para formar eutéticos de Al-Si para mejorar la capacidad de fundición de las aleaciones de la presente divulgación. Las características de fluidez y alimentación son características deseables en aleaciones fundidas. La fluidez se define como la capacidad de la aleación fundida de fluir fácilmente a través de áreas gruesas y delgadas del molde por largas distancias. Las pruebas indican que la fluidez de las aleaciones de Al-Si es más alta en la composición eutética. La alimentación se caracteriza por la capacidad del metal líquido para fluir a través de redes dendríticas para llegar a áreas donde se produce la contracción debido al cambio de fase de líquido a sólido. Si no hay flujo de metal líquido, se producirá porosidad debido a la contracción de solidificación. El llenado de moldes es más difícil en los moldes de metal debido a las altas tasas de enfriamiento, principalmente porque el tiempo de congelación disminuye. El contenido de Si de acuerdo con la presente divulgación es del 6.5-8 % en peso para aleaciones de molde semipermanente (SPMC), que experimentan una tasa de solidificación media. El contenido de Si de acuerdo con la presente divulgación es del 8-12 % en peso para aleaciones fundidas a presión a alta presión (HPDC), que experimentan una tasa de solidificación relativamente alta. Además, el Si puede precipitarse con otros elementos durante el envejecimiento artificial para proporcionar fortalecimiento.

El contenido de titanio (Ti) varía de 0.05 a 0.2 % en peso y se usa como refinador de grano durante la solidificación.

El vanadio (V) tiene la función de mejorar el rendimiento mecánico a temperatura elevada de la aleación de la presente divulgación. Cuando está presente en la matriz de aluminio, V también mejora el límite de resistencia a la fatiga a temperatura elevada de la presente divulgación. El contenido de V varía de 0.20-0.35 % en peso, ya que las mediciones de EPMA (microanálisis con sonda electrónica) indican que 0.25 % en peso de V puede disolverse en la matriz de Al. Si el contenido de V es superior al 0.35 % en peso, el V forma precipitados primarios gruesos que tienen un efecto de fortalecimiento mínimo.

El zinc (Zn) proviene de materiales reciclados o se agrega a la aleación para minimizar los efectos adversos del Fe sobre las propiedades mecánicas de la aleación. Los cálculos termodinámicos (véase la FIG 6) indican que la temperatura eutética disminuye con cantidades crecientes de Zn, por lo tanto, el contenido de Zn varía de 0-3.0 % en peso.

El zirconio (Zr) mejora el rendimiento mecánico a temperatura elevada de la aleación de la presente divulgación. Cuando está presente en la matriz de aluminio, Zr también mejora el límite de resistencia a la fatiga a temperatura elevada de la presente divulgación. El contenido de Zr varía de 0.2-0.4 % en peso, ya que las mediciones de EPMA (microanálisis de sonda electrónica) indican que 0.16 % en peso de Zr se puede disolver en la matriz de Al. Si el contenido de Zr es superior al 0.4 % en peso, el Zr forma precipitados primarios gruesos que tienen un efecto de fortalecimiento mínimo.

A diferencia de los sistemas binarios Al-Zr, Al-V y Al-Ti, en los que los precipitados L_{12} -Al₃TM exhiben resistencia al engrosamiento a temperatura elevada, los precipitados que se forman en los sistemas Al-Si-TM (TM-Zr, V, Ti) son L_{12} -(Al, Si)₃TM (TM - Zr, V, Ti). La FIG. 2 compara el comportamiento de envejecimiento de los precipitados L_{12} -(Al, Si)₃TM en un sistema Al-Si-TM, y el de L_{12} -Al₃TM en un sistema Al-TM, que los inventores han caracterizado con microscopía electrónica de transmisión (TEM). La cinética de crecimiento acelerado de los precipitados L_{12} -(Al, Si)₃TM es dramáticamente más rápida que la de L_{12} -Al₃TM. Por lo tanto, las adiciones de TM pierden sus efectos de fortalecimiento a temperaturas elevadas, si se utilizan tratamientos térmicos tradicionales como T6 y T7. Esto se debe a que los precipitados de L_{12} -(Al, Si)₃TM se transformarán en su estructura de equilibrio durante los tratamientos de larga duración con solución y a alta temperatura en T6 y T7. Los datos experimentales confirman el hecho de que las aleaciones de aluminio se benefician mínimamente de las adiciones de TM a través del tratamiento térmico T7 convencional.

Como se expuso anteriormente, las aplicaciones SPMC de algunas aleaciones de la presente divulgación se habilitan mediante un nuevo tratamiento térmico de tres etapas. Por lo tanto, los tratamientos térmicos convencionales, tal como

T6 y T7, no pueden aprovechar por completo las adiciones de TM (TM = Zr o V) como precipitados de fortalecimiento porque estas adiciones de TM se transforman en partículas gruesas con una estructura cristalina de equilibrio durante las etapas de tratamiento de larga duración con solución y a alta temperatura de T6 y T7. Tales partículas gruesas casi no proporcionan beneficios de fortalecimiento. Por otro lado, una etapa de tratamiento de solución mejora las aplicaciones de cabezal de cilindro porque se deben disolver cantidades suficientes de Cu/Mg en la matriz de Al para formar precipitados de fortalecimiento durante el envejecimiento artificial. Por lo tanto, se desarrolló un tratamiento térmico en tres etapas, que comprende 375 °C durante 6 horas como la primera etapa, 495 °C durante 0.5 horas como la segunda etapa y 230 °C durante 3 horas como la tercera etapa.

La primera etapa de 375 °C durante 6 horas es un tratamiento térmico a baja temperatura y larga duración. Como se muestra en la imagen TEM en la FIG. 4, las adiciones de TM (TM - Zr, V) permanecen en la matriz de Al y se observan partículas mínimas que contienen TM. Además, los resultados de EPMA muestran que la concentración de Cu y Mg en la matriz de Al exhibe un aumento menor, y se alivia la macrosegregación, en comparación con la muestra tal como fue fundida.

La segunda etapa de 495 °C durante 0.5 horas es un tratamiento térmico a alta temperatura y corta duración. Como se muestra en la imagen TEM en la FIG. 4, la mayoría de las adiciones de TM permanecen en solución sólida y se observaron pocas partículas que contienen TM. Además, los datos de EPMA muestran que la concentración de Cu y Mg en la matriz de Al muestra un aumento significativo. El Cu y Mg disuelto forman precipitados de θ'-Al₂Cu en forma de placa durante la etapa de envejecimiento posterior.

La tercera etapa de 230 °C durante 3 horas es un tratamiento térmico artificial de sobrevejecimiento. Como se muestra en la FIG. 4, una fracción de alto volumen de precipitados de θ'-Al₂Cu en forma de placa a nanoscala y Q'-Al₅Si₂Mg₈Si₆ en forma de barra se forman durante la tercera etapa para proporcionar el fortalecimiento de la precipitación.

La FIG. 4 incluye imágenes TEM y EDS de las aleaciones, así como gráficos de la concentración de elementos a partir de mediciones de EPMA en diferentes etapas durante el tratamiento térmico, estableciendo la microestructura de la aleación.

La Tabla 2 a continuación muestra diversas formas de los intervalos de composición para las aleaciones de tratamiento térmico de tres etapas SPMC.

Tabla 2: Composiciones del tratamiento térmico de tres etapas SPMC de la presente divulgación

Elemento	% en peso	Intervalo Alternativo (% en peso)	Composición Dirigida (% en peso)
Aluminio (Al)	balance + impurezas	balance + impurezas	balance + impurezas
Cobre (Cu)	3.0-3.5	3.2-3.5	3.4
Hierro (Fe)	0-0.20	0-0.20	0
Magnesio (Mg)	0.24-0.35	0.24-0.28	0.25
Manganoso (Mn)	0-0.4	0-0.15	0
Silicio (Si)	6.5-8.0	7.2-7.7	7.5
Estroncio (Sr)	0-0.025	0-0.025	0
Titanio (Ti)	0.05-0.2	0.08-0.10	0.10
Vanadio (V)	0.20-0.35	0.22-0.28	0.25
Zirconio (Zr)	0.20-0.40	0.33-0.38	0.35
Otros elementos	0.5 máx	0.5 máx	0.5 máx

Con referencia a la FIG. 5, se muestran los cálculos termodinámicos para la formación de α-Al (Fe, Mn)Si, indicados como alfa en la gráfica, y β-AlFeSi, indicados como beta, durante la solidificación. Las diferencias entre las curvas continua, discontinua y punteada muestran que la fracción de volumen de α-Al (Fe, Mn)Si aumenta con el contenido de Fe + Mn, y la fracción de volumen de β-AlFeSi aumenta con Fe pero disminuye con Mn. El recuadro muestra el cambio en las fracciones de volumen de α-Al (Fe, Mn)Si y β-AlFeSi cuantitativamente.

En referencia también a la FIG. 6, se muestra una representación gráfica de los cálculos termodinámicos, que muestra cómo la temperatura eutéctica disminuye con la adición de Zn, como se enfatiza en el recuadro.

Las aplicaciones de bloque de motor de la presente divulgación usan un tratamiento térmico T5. Los componentes fabricados por el proceso de fundición a presión a alta presión (HPDC) no son susceptibles a tratamiento de solución debido a los poros internos que se forman como una característica siempre presente de este proceso. Estos poros contienen gas o compuestos formadores de gas y, por lo tanto, se expanden durante los tratamientos de solución convencionales a altas temperaturas (por ejemplo, 495 °C), lo que resulta en la formación de ampollas superficiales en las fundiciones. Por lo tanto, se utiliza un tratamiento térmico T5 para aleaciones de bloque de motor. Aunque las propiedades a temperatura ambiente de estas aleaciones con T5 no son tan altas como las de las aleaciones con tratamientos térmicos T6 o T7, las propiedades a temperatura ambiente son suficientes para el rendimiento a temperatura ambiente. La aleación divulgada con un tratamiento térmico T5 tiene propiedades de temperatura elevada mejoradas porque las adiciones de TM (TM - Zr, V) se mantienen en la matriz Al en este tratamiento térmico, como se muestra en la FIG. 7. Además, después de la exposición previa a 300 °C durante 100 horas, la mayoría de los precipitados de θ'-Al₂Cu siguen siendo pequeños y coherentes dentro de la matriz Al. Por lo tanto, la aleación HPDC-T5 de la presente divulgación tiene una mejora significativa tanto en la resistencia a la temperatura elevada como en las propiedades de tracción.

La Tabla 3 a continuación muestra los intervalos de composición para las aleaciones de tratamiento térmico HPDC T5 de acuerdo con la presente divulgación.

Tabla 3: Composiciones de aleaciones HPDC T5 de la presente divulgación

Elemento	% en peso	Intervalo Alternativo (% en peso)	Composición Dirigida (% en peso)
Aluminio (Al)	balance + impurezas	balance + impurezas	balance + impurezas
Cobre (Cu)	3.0-3.5	3.2-3.5	3.4
Hierro (Fe)	0.20-1.3	0.20-1.0	0.25
Magnesio (Mg)	0.24-0.35	0.24-0.28	0.25
Manganoso (Mn)	0-0.80	0.35-0.50	0.40
Silicio (Si)	8.0-12.0	9.0-11.0	9.5
Titanio (Ti)	0.05-0.2	0.08-0.10	0.10
Vanadio (V)	0.20-0.35	0.22-0.28	0.25
Zinc (Zn)	0-3.0	0-1.5	0.0
Zirconio (Zr)	0.20-0.40	0.33-0.38	0.35
Otros elementos	0.5 máx	0.5 máx	0.5 máx

Un tratamiento térmico de tres etapas permite las aleaciones SPMC y un tratamiento térmico T5 permite las aleaciones HPDC porque el tratamiento térmico convencional T7 no puede aprovechar las adiciones de TM en los sistemas Al-Si-TM. Las adiciones de TM engruesan muy rápidamente durante el tratamiento con solución a alta temperatura y larga duración del tratamiento térmico T7. Como el punto 1 indica en la FIG. 3, se observan partículas muy gruesas de Zr y V después del tratamiento con solución, que no tienen ningún efecto en mejorar el rendimiento a altas temperaturas de las aleaciones. Por otro lado, Zr y V se pueden mantener en la matriz Al tanto en el tratamiento térmico de tres etapas como en el tratamiento térmico T5 para proporcionar fortalecimiento a temperatura elevada.

- En una aplicación a manera de ejemplo de la presente divulgación, se fundieron dos aleaciones de aluminio diferentes en forma de cilindros (120 mm de largo y 20 mm de diámetro) en un horno de resistencia eléctrica de 100 lb.
- Una de las aleaciones, con una composición de Al-7.5Si-3.3Cu-0.24Mg-0.16Fe-0.1Ti-0.25V-0.4Zr, es representativa de las aleaciones de fundición en molde semipermanente (SPMC) de la presente divulgación. Se usaron dos tratamientos térmicos diferentes para esta aleación, el T7 tradicional y las tres etapas novedosas de la presente divulgación, para mostrar el rendimiento superior del tratamiento de tres etapas.

La otra aleación, con una composición de Al-9.3Si-3.3Cu-0.24Mg-0.25Fe-0.4Mn-0.1Ti-0.23V-0.4Zr, es representativa de la versión de fundición a presión a alta presión (HPDC) de las aleaciones de la presente divulgación. Se usó un tratamiento térmico T5 para la aleación HPDC.

5 Las muestras se mecanizaron en forma de hueso para perro para pruebas de resistencia cuasiestáticas y límite de tracción. Las pruebas de tracción cuasiestáticas se realizaron a temperatura ambiente, 150 °C, 200 °C, 250 °C y 300 °C. Para las pruebas de límite de resistencia, se seleccionaron diferentes temperaturas de prueba, incluyendo la temperatura ambiente, 120 °C, 150 °C y 180 °C. Todas las muestras se expusieron previamente a la temperatura de prueba durante un tiempo de remojo de 100 horas.

10 Las propiedades de tracción, que incluyen la resistencia a la tracción máxima (UTS), el límite elástico (YS) y el alargamiento de AA319-T7, SPMC-T7, SPMC de tres etapas y HPDC-T5 se resumen en la FIG. 6. A temperaturas de funcionamiento de menos de 150 °C, la resistencia a la tracción (UTS) máxima, el límite elástico (YS) de AA319 y la aleación con tratamiento térmico SPMC-T7 se midieron siendo ligeramente más altas que las aleaciones de la presente divulgación (SPMC de tres etapas y HPDC-T5). Esto se debe a que las aleaciones AA319 y SPMC-T7 han experimentado tratamientos con solución de mayor duración y mayor temperatura que las aleaciones de la presente divulgación, lo que resulta en la disolución de más Cu y Mg en la matriz Al. Sin embargo, el rendimiento de las aleaciones de la presente divulgación (SPMC de tres etapas y HPDC-T5) es suficiente para las aplicaciones previstas a estas temperaturas relativamente más bajas, y se mejora con respecto a las aleaciones de producción actuales (AA319-T7 y SPMC-T7) a temperaturas más altas. Cuando la temperatura es superior a 250 °C, HPDC-T5 tiene un UTS e YS mucho más altos que las otras tres aleaciones porque las adiciones de TM se mantienen dentro de la matriz Al. La aleación de tres etapas SPMC es aplicable para aplicaciones que requieren mayor ductilidad, tal como los cabezales de cilindros.

15 Aunque la aleación de tres etapas SPMC propuesta de la presente divulgación tiene límites de resistencia a temperatura ambiente comparables con las aleaciones de producción actuales, la aleación de tres etapas SPMC tiene un límite de resistencia mucho mayor a 120 °C que AA319-T7 y SPMC-T7 (véase la Tabla 4 y FIG. 9). Este resultado indica que el límite de resistencia a temperatura elevada se beneficia de las adiciones de TM a través del tratamiento térmico diseñado. La mejora mínima se logra únicamente a través de la química propuesta, ya que AA319-T7 y SPMC-T7 tienen límites de resistencia comparables a 120 °C. Además, la FIG. 9 muestra que el límite de resistencia mejorado de SPMC de tres etapas se mantiene hasta al menos 150 °C, y los datos de estas pruebas se muestran a continuación en la Tabla 4:

20 30 Tabla 4: Límites de resistencia de varias aleaciones a diferentes temperaturas de prueba, después de 100 horas de remojo a la temperatura de prueba

Aleación	Temperatura Ambiente	120°C	150°C	180°C
AA319-T7	88 ± 6	62 ± 8	< 62	<<62
SPMC-T7	89 ± 6	68 ± 17	< 68	<< 68
SPMC de tres etapas	83 ± 9	91 ± 12	92 ± 2	
HPDC-T5	-	-	97 ± 7	98 ± 9

Las aleaciones procesadas de acuerdo con el HPDC-T5 tienen un excelente límite de resistencia a temperatura elevada, 98 ± 9 MPa hasta al menos 180 °C después de 100 horas de remojo a la temperatura de prueba, una mejora significativa en el rendimiento a alta temperatura de aleaciones disponibles para aplicaciones en bloques de motor.

35 40 Las aleaciones de la presente divulgación, SPMC de tres etapas y HPDC-T5, presentan mejoras significativas sobre el límite de resistencia a temperatura elevada de las aleaciones disponibles actualmente para aplicaciones de cabezal de cilindro y bloque de motor en la industria automotriz. En comparación con las aleaciones disponibles actualmente para cabezales de cilindro y bloques de motores con tratamientos térmicos, las aleaciones de la presente divulgación y los tratamientos térmicos asociados han logrado características microestructurales únicas, que conducen a las mejoras deseadas en el rendimiento.

REIVINDICACIONES

1. Una aleación de aluminio de alta resistencia a la fatiga que comprende, en% en peso:
 Cu entre 3.0-3.5 %;
 Fe entre 0-1.3 %;
 5 Mg entre 0.24-0.35 %;
 Mn entre 0-0.8 %;
 Si entre 6.5-12.0 %;
 Sr entre 0-0.025 %;
 Ti entre 0.05-0.2 %;
 10 V entre 0.20-0.35 %;
 Zn entre 0-3.0 %;
 Zr entre 0.2-0.4 %;
 máximo 0.5 % de otros elementos; y
 balance Al,
 15 en el que la aleación define una microestructura que tiene una matriz con el Zr y el V en solución sólida después de la solidificación, con una solución sólida de Zr de al menos 0.16 % después del tratamiento térmico y una solución sólida de V de al menos 0.20 % después del tratamiento térmico, y el Cu y el Mg se disolvieron en la matriz durante el tratamiento térmico y posteriormente se precipitó durante el tratamiento térmico.
2. La aleación de acuerdo con la reivindicación 1, en la que el Si está entre 6.5-8.0 %, el Fe es 0-0.2 %, el Mn es 0-0.4 %, el Sr es 0-0.025 %, y el Zn es 0 %.
3. Un cabezal de cilindro que tiene la aleación de acuerdo con la reivindicación 2 y que está formada por fundición en molde semipermanente.
4. La aleación de acuerdo con la reivindicación 1, en la que el Si es 8.0-12.0 % y el Fe es 0.2-1.3 %.
5. Un bloque de motor que tiene la aleación de acuerdo con la reivindicación 4 y que está formado por fundición a presión a alta presión.
 25 6. La aleación de acuerdo con la reivindicación 1, en la que:
 el Cu está entre 3.0-3.5 %;
 el Mg está entre 0.24-0.35 %;
 el Mn está entre 0-0.4 %;
- 30 30 el Si está entre 6.5-8.0 %;
 el Ti está entre 0.05-0.2 %
 el V está entre 0.20-0.35 %; and
 el Zr está entre 0.20 - 0.40 %.
7. La aleación de acuerdo con la reivindicación 6, en la que:
 35 el Cu está entre 3.2-3.5 %;
 el Mg está entre 0.24-0.28 %;
 el Mn está entre 0-0.15 %;
 el Si está entre 7.2-7.7 %;
 el Ti está entre 0.08 - 0.1 %

el V está entre 0.22 - 0.28 %; y

el Zr está entre 0.33 - 0.38 %.

8. La aleación de acuerdo con la reivindicación 7, en la que:

el Cu es 3.4 %;

5 el Fe es 0 %;

el Mg es 0.25 %;

el Mn es 0 %;

el Si es 7.5 %;

el Sr es 0 %;

10 el Ti es 0.1 %;

el V es 0.25 %; y

el Zr es 0.35 %.

9. La aleación de acuerdo con la reivindicación 1, en la que:

el Zr está entre 0.33 - 0.38 %; y

15 el V está entre 0.22 - 0.28 %.

10. La aleación de acuerdo con la reivindicación 9, en la que:

el Zr es 0.35 %; y

el V es 0.25 %.

11. La aleación de acuerdo con la reivindicación 1, en la que:

20 el Cu está entre 3.0-3.5;

el Fe está entre 0.20-1.3;

el Mg está entre 0.24-0.35;

el Mn está entre 0-0.80;

el Si está entre 8.0-12.0;

25 el Ti está entre 0.05-0.2;

el V está entre 0.20- 0.35;

el Zn está entre 0-3.0; y

el Zr está entre 0.20-0.40.

12. La aleación de acuerdo con la reivindicación 11, en la que:

30 el Cu está entre 3.2-3.5;

el Fe está entre 0.20-1.0;

el Mg está entre 0.24-0.28;

el Mn está entre 0.35-0.50;

el Si está entre 9.0-11.0;

35 el Ti está entre 0.08-0.10;

el V está entre 0.22-0.28;

el Zn está entre 0-1.5; y

el Zr está entre 0.33-0.38.

13. La aleación de acuerdo con la reivindicación 12, en la que:

el Cu es 3.4 %;

el Fe es 0.25 %;

5 el Mg es 0.25 %;

el Mn es 0.40 %;

el Si es 9.5 %;

el Ti es 0.10 %;

el V es 0.25 %;

10 el Zn es 0 %; y

el Zr es 0.35 %.

14. Un proceso de tratamiento térmico de la aleación de la reivindicación 1, que comprende:

un tratamiento a 375 °C durante 6 horas, durante el cual se disuelven el Cu y el Mg;

un tratamiento a 495 °C durante 0.5 horas, durante el cual el Cu y el Mg se disuelven adicionalmente; y

15 un tratamiento a 230 °C durante 3 horas, durante el cual se precipitan el Cu y el Mg.

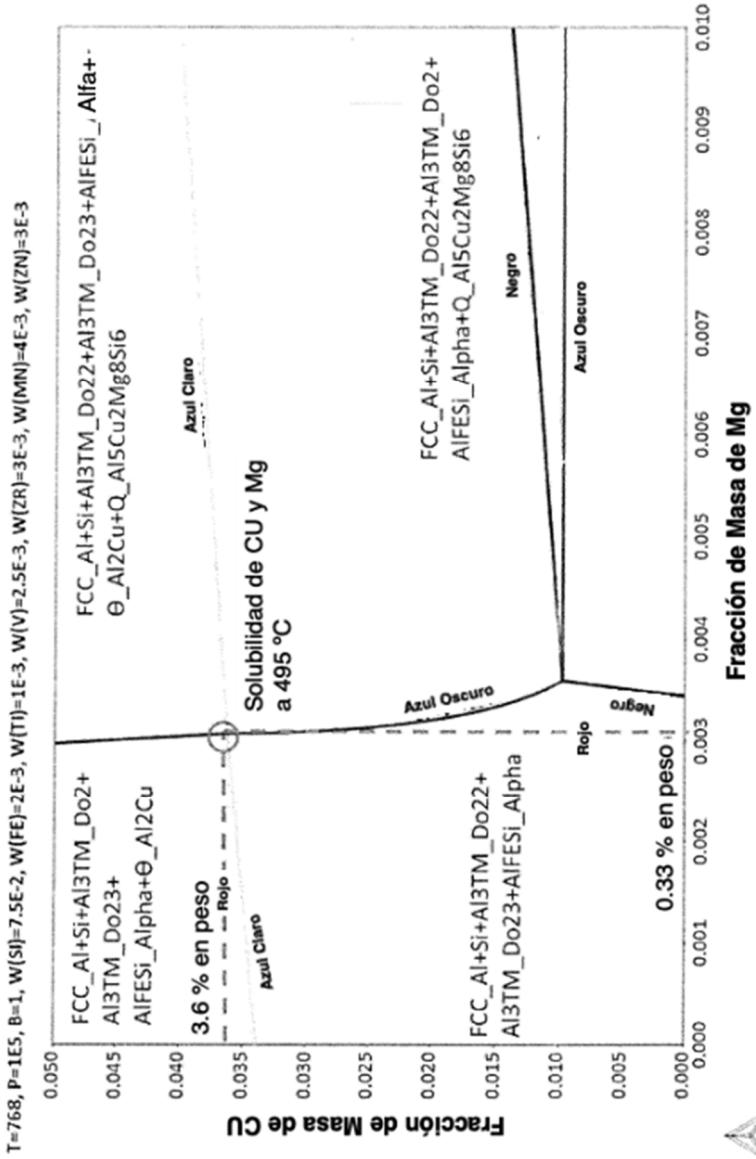


FIG. 1

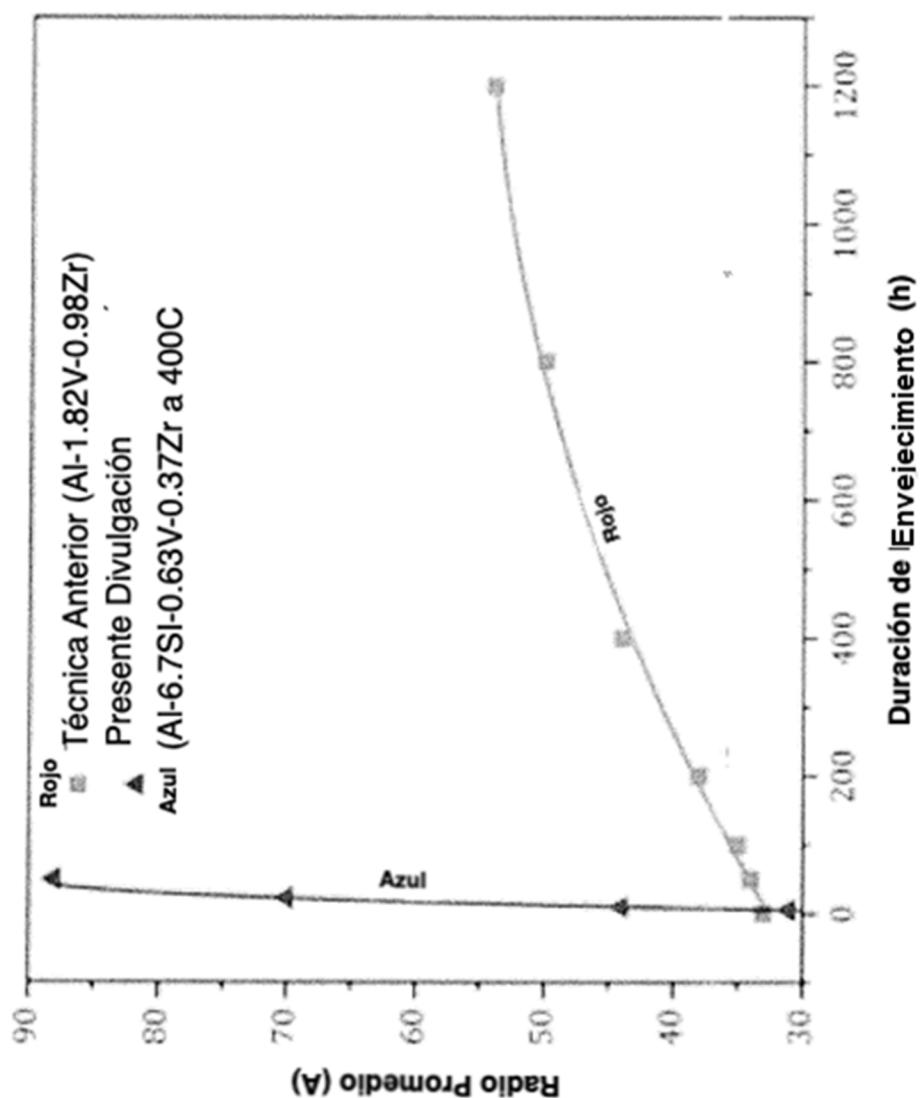


FIG. 2

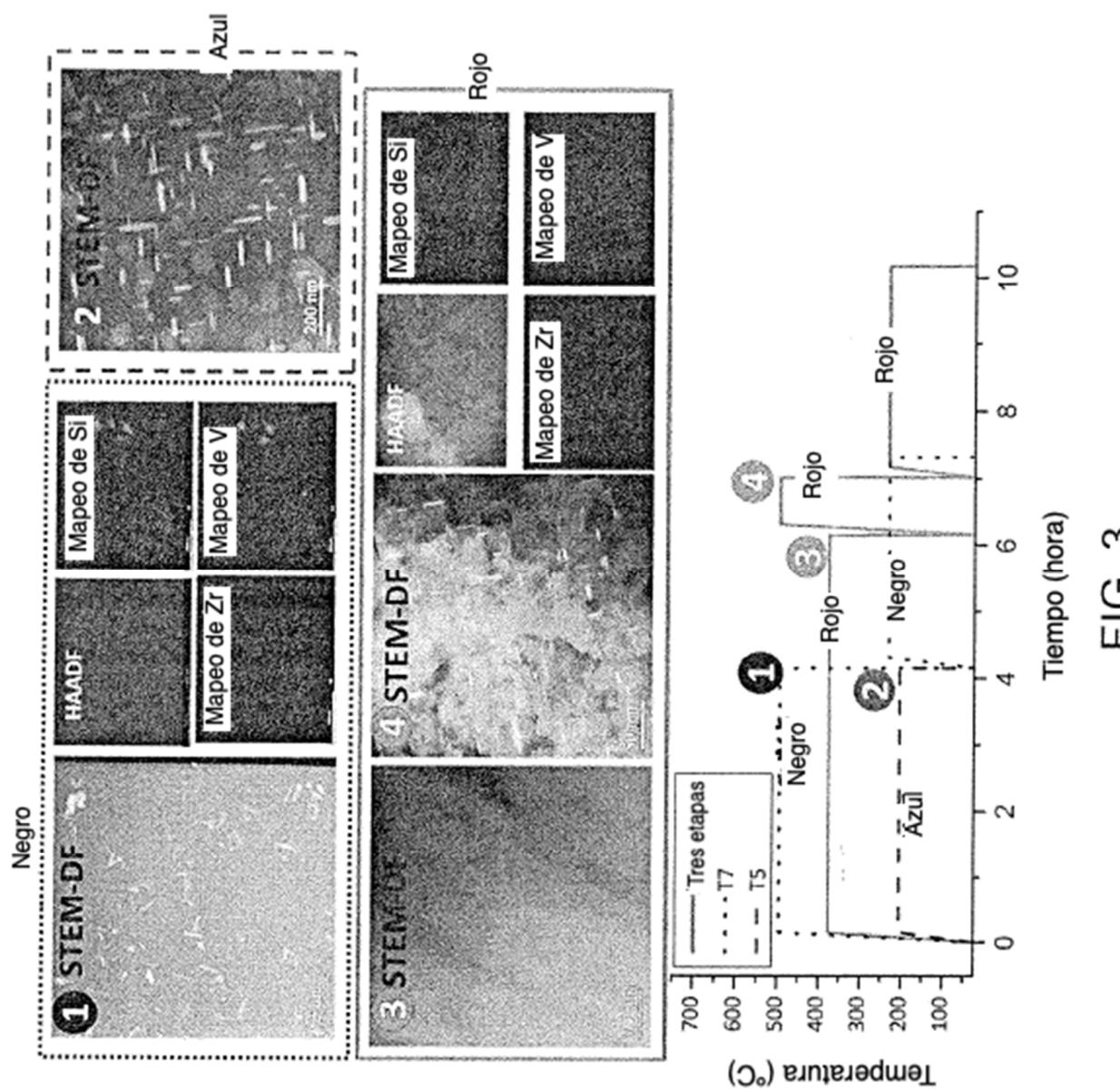


FIG. 3

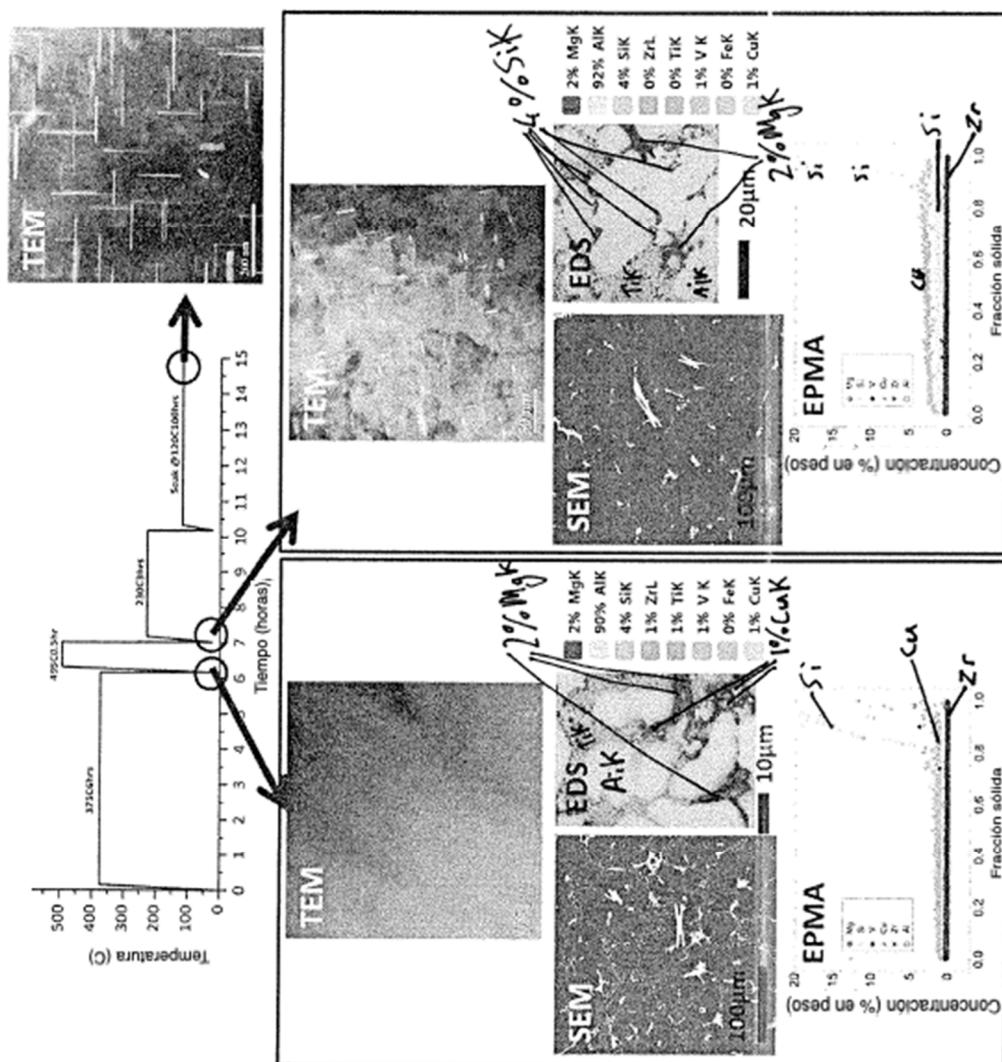


FIG. 4

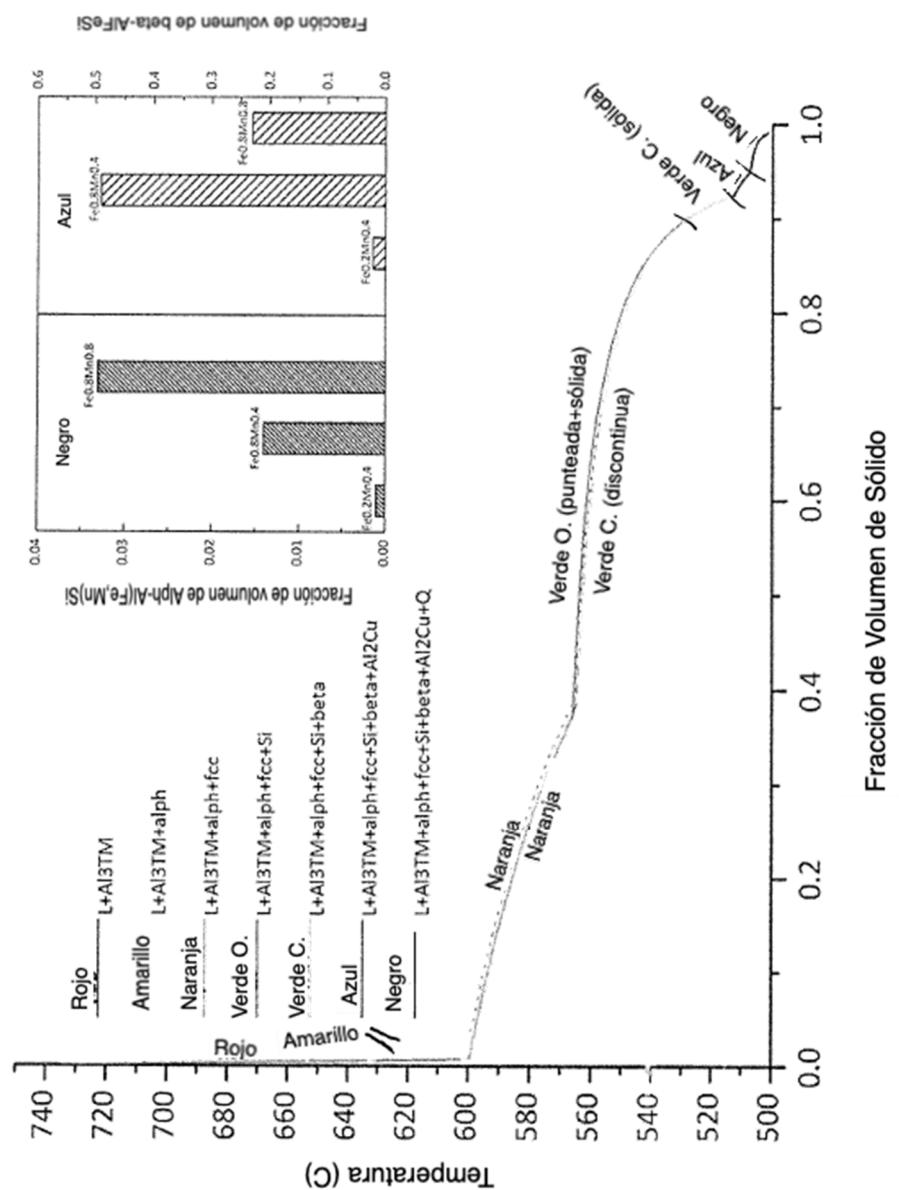
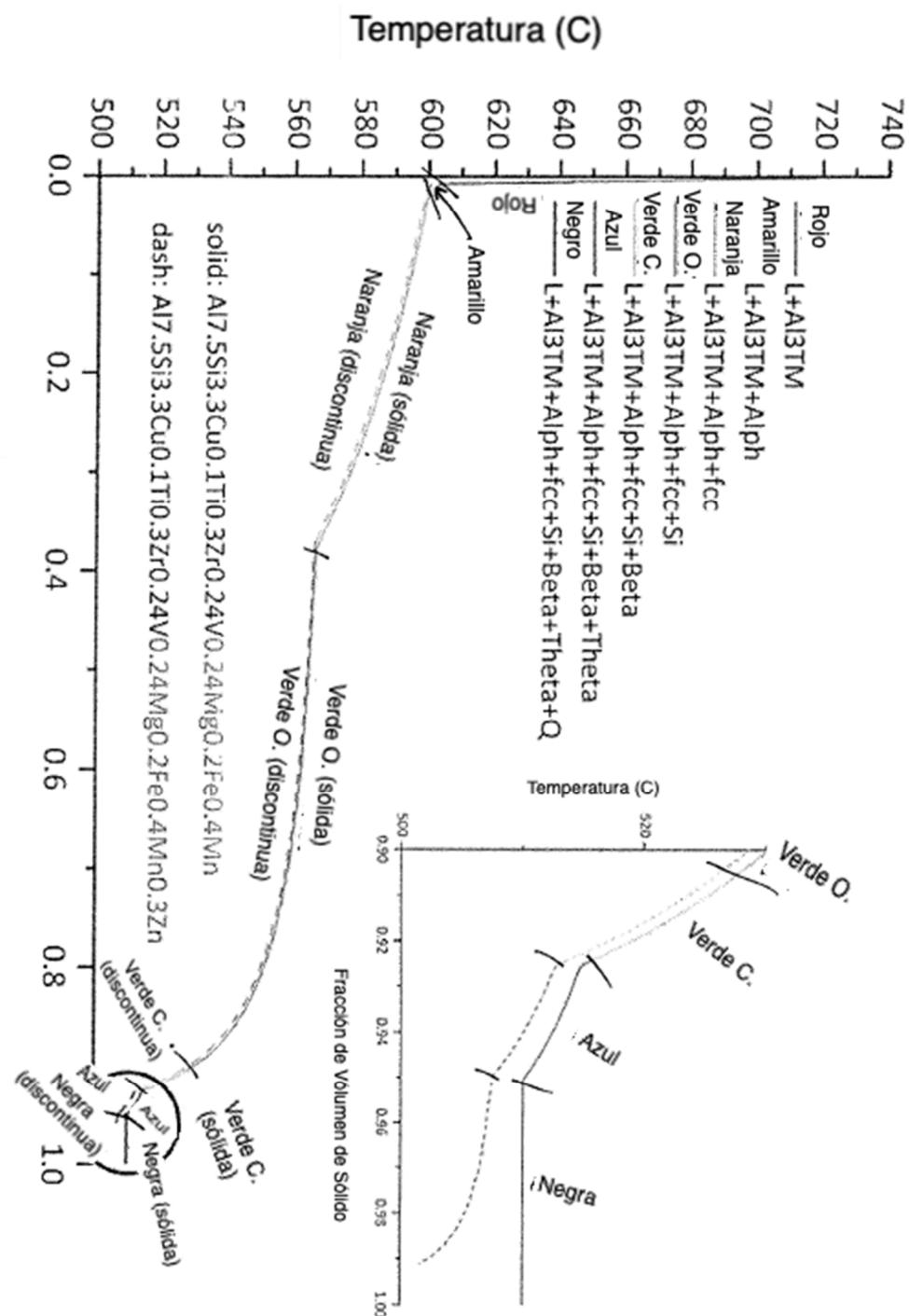


FIG. 5



Fracción de Volumen de Gélio

FIG. 6

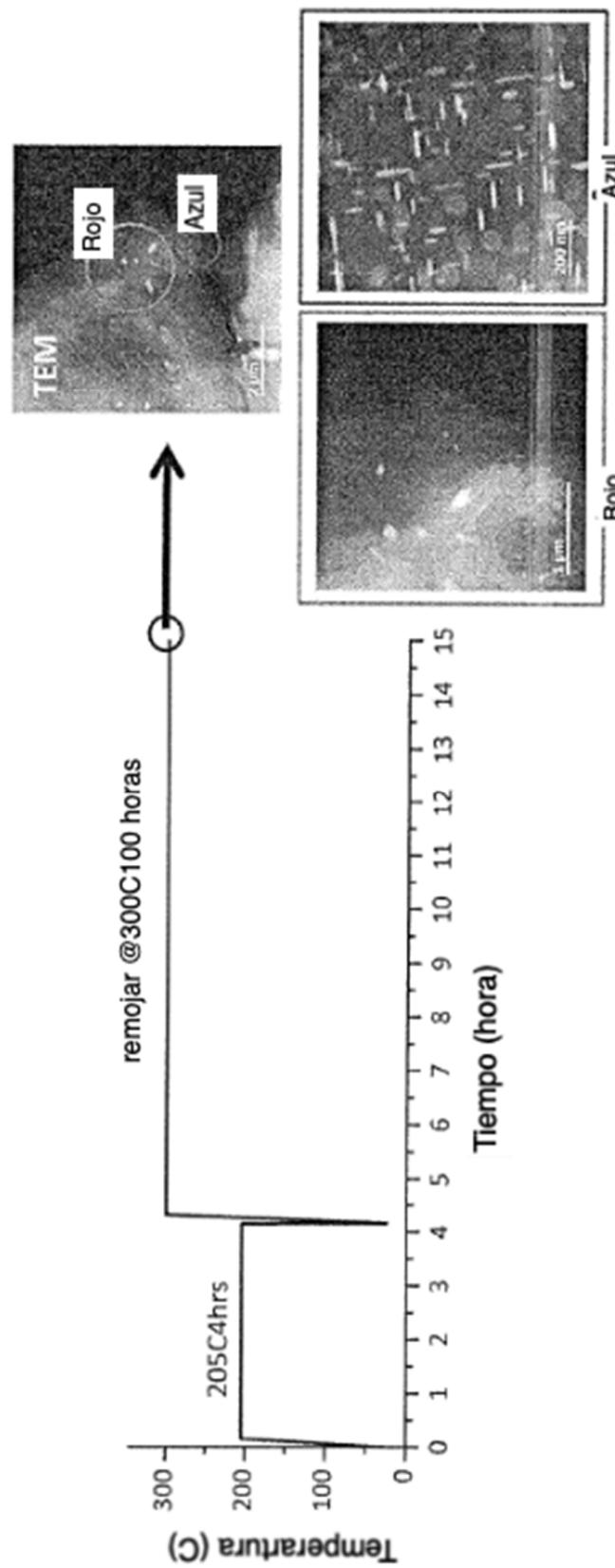


FIG. 7

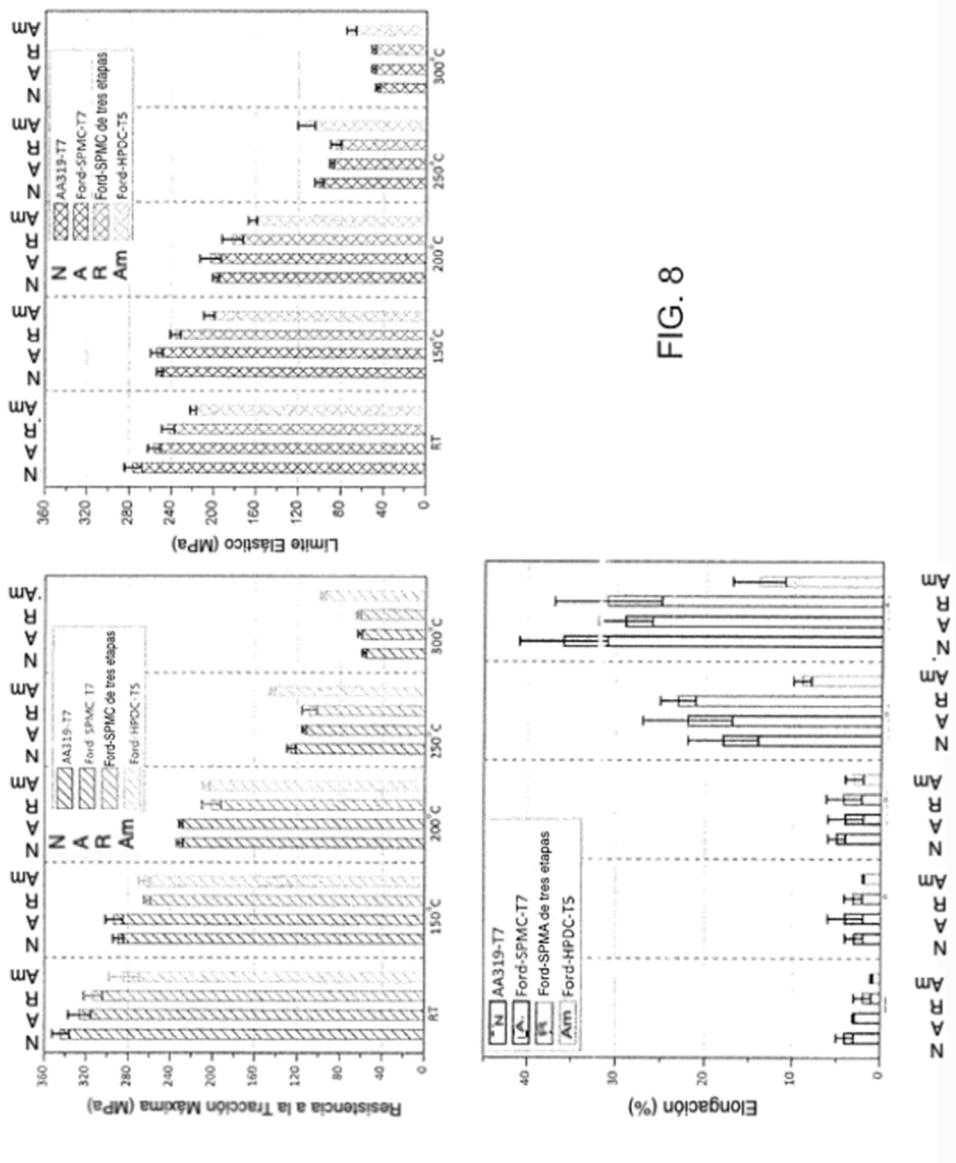


FIG. 8

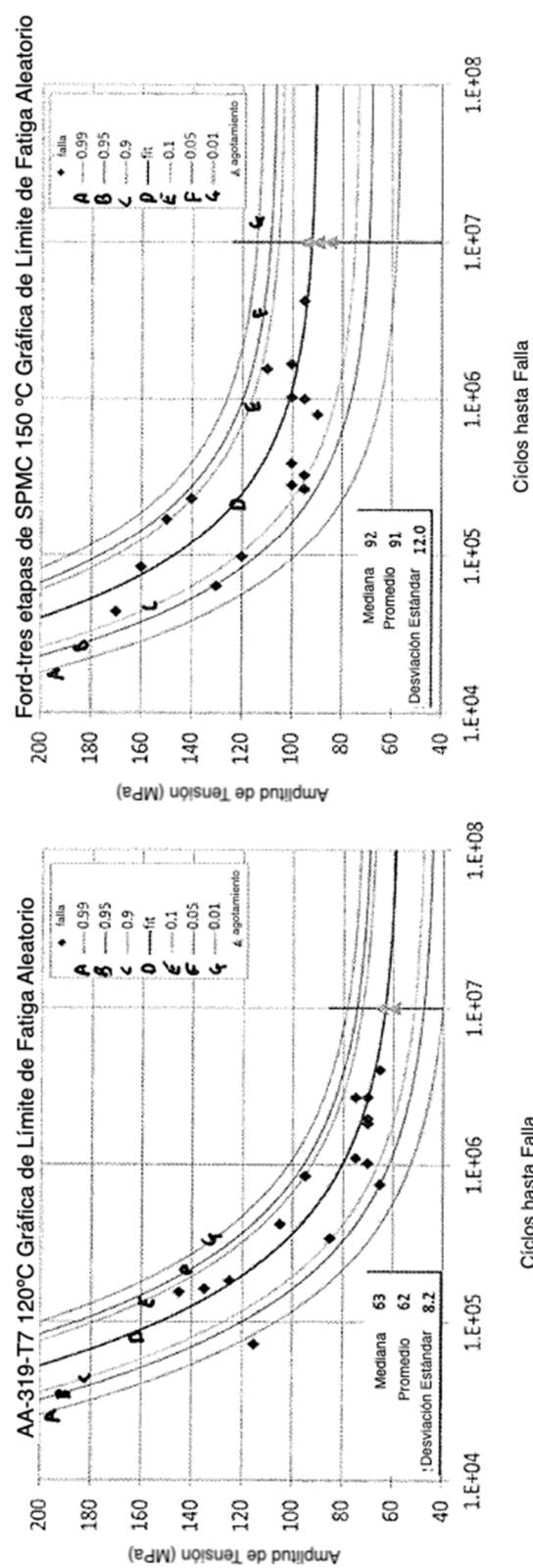


FIG. 9