

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 906 338**

51 Int. Cl.:

B21B 1/085	(2006.01)
C21D 9/04	(2006.01)
E01B 5/02	(2006.01)
C22C 38/02	(2006.01)
C22C 38/04	(2006.01)
C22C 38/18	(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- 86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **27.11.2018 PCT/IB2018/059349**
- 87 Fecha y número de publicación internacional: **31.05.2019 WO19102439**
- 96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **27.11.2018 E 18816252 (3)**
- 97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **29.12.2021 EP 3717142**

54 Título: **Procedimiento para fabricar un riel y riel correspondiente**

30 Prioridad:

27.11.2017 WO PCT/IB2017/057424

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
18.04.2022

73 Titular/es:

**ARCELORMITTAL (100.0%)
24-26 Boulevard d'Avranches
1160 Luxembourg, LU**

72 Inventor/es:

**ARANCON ALVAREZ, JOSÉ;
ALVAREZ DIEZ, DAVID;
ARTIMEZ ENCINA, JOSÉ MANUEL;
GARCIA CABALLERO, FRANCISCA y
POHU, BENJAMIN**

74 Agente/Representante:

PONTI & PARTNERS, S.L.P.

ES 2 906 338 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

Procedimiento para fabricar un riel y riel correspondiente

- 5 **[0001]** La presente invención se refiere a un procedimiento para producir un riel de acero que tiene excelentes propiedades mecánicas y resistencias al desgaste y a la fatiga por contacto de rodadura, así como un riel de acero correspondiente.
- 10 **[0002]** En los últimos años, la velocidad y la carga de los trenes se han incrementado para mejorar el transporte ferroviario y las tensiones de contacto pueden superar los 2000 MPa. Estas condiciones de servicio más severas requieren nuevos rieles con mayor resistencia al desgaste y a la fatiga por contacto de rodadura, especialmente para el tráfico ferroviario industrial pesado.
- 15 **[0003]** El desgaste y la fatiga por contacto de rodadura (RCF) son dos factores importantes que pueden causar un fallo retardado en la vía férrea. Mientras que los mecanismos de desgaste se han estudiado a fondo y se comprenden bien, y el desgaste se gestiona actualmente en el sistema ferroviario, el RFC aún no se entiende suficientemente para obtener soluciones eficientes para impedir la formación de defectos por RCF, lo que puede causar deterioro progresivo y un mantenimiento prematuro del riel.
- 20 **[0004]** La estrategia tradicional para el desarrollo de nuevos aceros de riel para abordar el desgaste y el RCF ha sido aumentar la dureza y la resistencia del acero. En el caso de los grados perlíticos convencionales para ferrocarriles, este aumento se ha logrado durante los últimos 40 años disminuyendo el espaciado interlaminar, añadiendo elementos de aleación costosos o a través del endurecimiento de la cabeza. Sin embargo, este aumento de la resistencia al desgaste generalmente va acompañado de una disminución de la tenacidad. Los retos mencionados anteriormente demuestran que, a pesar de toda la investigación que se ha llevado a cabo para desarrollar nuevas microestructuras con propiedades mecánicas mejoradas, las calidades del acero perlítico ya han alcanzado sus límites en cuanto a rendimiento de desgaste y de fatiga por contacto de rodadura, lo que significa que las calidades de ferrocarriles existentes no pueden hacer frente a las condiciones de servicio más exigentes.
- 25 **[0005]** Los aceros bainíticos, que comprenden, por ejemplo, microestructura de bainita inferior, se han considerado como la próxima generación de aceros avanzados de alta resistencia y materiales candidatos para rieles para servicio pesado y cruces ferroviarios debido a una buena combinación de dureza, resistencia y tenacidad.
- 30 **[0006]** Los aceros bainíticos que comprenden microestructura de bainita inferior proporcionan una buena resistencia al desgaste, pero no logran una resistencia RCF suficiente.
- 35 **[0007]** Especialmente, el documento WO1996022396A1 describe un procedimiento para producir un riel resistente al desgaste y a la fatiga por contacto de rodadura de alta resistencia. El riel se produce a partir de un acero que tiene una composición que comprende 0,05 % a 0,5 % de C, 1,00 % a 3,00 % de Si y/o Al, 0,50 % a 2,50 % de Mn y 0,25 % a 2,50 % de Cr. El riel se produce por enfriamiento por aire del acero desde la temperatura de laminado en caliente de acabado.
- 40 **[0008]** El documento EP1873262 describe un procedimiento para fabricar rieles guía de alta resistencia, a partir de un acero que comprende 0,3 % a 0,4 % de C, 0,7 % a 0,9 % de Si, 0,6 % a 0,8 % de Mn y 2,2 % a 3,0 % de Cr. El procedimiento de fabricación comprende enfriar con aire el acero después de la formación de una estructura bainítica. Sin embargo, el documento EP1873262 no enseña ninguna velocidad de enfriamiento específica.
- 45 **[0009]** Los documentos EP0612852, US2015218759 y US201514702188 describen procedimientos para producir rieles bainíticos mediante enfriamiento acelerado. Sin embargo, estos rieles no muestran una resistencia suficiente a la fatiga por contacto de rodadura.
- 50 **[0010]** Por lo tanto, sigue siendo deseable producir rieles de acero.
- 55 **[0011]** Un objetivo de esta invención es proporcionar un procedimiento de fabricación de riel de alto rendimiento que tenga excelente resistencia a la fatiga por contacto de rodadura y resistencia al desgaste.
- 60 **[0012]** Especialmente, es deseable producir un riel de acero donde la cabeza del riel tenga una resistencia a la tracción de al menos 1300 MPa, un límite elástico de al menos 1000 MPa, un alargamiento total de al menos 13 % y una dureza de al menos 420 HB y preferentemente de al menos 430 HB junto con excelente resistencia a la fatiga por contacto de rodadura y resistencia al desgaste.
- 65 **[0013]** Con este fin, la invención se refiere a un procedimiento para fabricar un riel que comprende una cabeza, comprendiendo el procedimiento las siguientes etapas sucesivas:
- 65 - colar un acero para obtener un semiproducto, teniendo dicho acero una composición que comprende, en porcentaje

en peso:

- 5 $0,20 \leq C \leq 0,60 \%$,
 $1,0 \% \leq Si \leq 2,0 \%$,
 $0,60 \% \leq Mn \leq 1,60 \%$,
 y $0,5 \leq Cr \leq 2,2 \%$,
 y opcionalmente uno o más elementos seleccionados de entre
 $0,01 \% < Mo < 0,3 \%$,
 $0,01 \% < V < 0,30 \%$;

10

siendo el resto Fe e impurezas inevitables resultantes de la fundición;

- laminar en caliente el semiproducto en un semiproducto laminado en caliente que tiene la forma del riel y que comprende una cabeza, con una temperatura de laminado final T_{FRT} superior a Ar3;
- 15 - enfriar la cabeza del semiproducto laminado en caliente desde la temperatura de laminado final T_{FRT} hasta una temperatura de parada de enfriamiento T_{CS} comprendida entre 200 °C y 520 °C, de modo que la temperatura de la cabeza del semiproducto laminado en caliente a lo largo del tiempo está comprendido entre un límite superior y un límite inferior, teniendo el límite superior las coordenadas de tiempo y temperatura definidas por A1 (0 segundos, 780 °C), B1 (50 segundos, 600 °C) y C1 (110 segundos, 520 °C), teniendo el límite inferior las coordenadas de tiempo y temperatura definidas por A2 (segundo 0, 675 °C), B2 (50 segundos, 510 °C) y C2 (110 segundos, 300 °C);
- 20 - mantener la cabeza del semiproducto laminado en caliente en un intervalo de temperatura comprendido entre 300 °C y 520 °C durante un tiempo de mantenimiento t_{mant} de al menos 12 minutos, y;
- enfriar el semiproducto laminado en caliente a temperatura ambiente para obtener el riel. El procedimiento para fabricar un riel puede comprender además una o más de las siguientes características,
- 25 - la microestructura de la cabeza del riel consiste, en fracción de superficie, en:
 - 49 % a 67 % de bainita;
 - 14 % a 25 % de austenita retenida, teniendo la austenita retenida un contenido medio de carbono comprendido
 - 30 entre el 0,80 % y el 1,44 %;
 - 13 % a 34 % de martensita revenida;
- la fracción de superficie de bainita en la microestructura de la cabeza es superior o igual al 56 %;
- la fracción de superficie de austenita retenida en la microestructura de la cabeza está comprendida entre el 18 % y
- 35 el 23 %;
- la fracción de superficie de martensita revenida en la microestructura de la cabeza está comprendida entre el 14,5 % y el 22,5 %;
- el contenido medio de carbono en la austenita retenida es superior al 1,3 %;
- la temperatura de parada de enfriamiento T_{CS} está comprendida entre 300 °C y 520 °C;
- 40 - la temperatura de parada de enfriamiento T_{CS} está comprendida entre 200 °C y 300 °C, y el procedimiento comprende además, después de la etapa de enfriamiento de la cabeza del semiproducto laminado en caliente hasta la temperatura de parada de enfriamiento T_{CS} y antes de la etapa de mantenimiento de la cabeza en el intervalo de temperatura, una etapa de calentamiento de la cabeza del semiproducto laminado en caliente hasta una temperatura comprendida entre 300 °C y 520 °C;
- 45 - la etapa de enfriamiento de la cabeza del semiproducto laminado en caliente se realiza a través de chorros de agua;
- durante la etapa de enfriamiento de la cabeza del semiproducto laminado en caliente, todo el semiproducto laminado en caliente se enfría de modo que la temperatura del semiproducto laminado en caliente a lo largo del tiempo esté comprendida entre el límite superior y el límite inferior;
- durante la etapa de laminado en caliente del semiproducto, el semiproducto se lamina en caliente desde una
- 50 temperatura de inicio de laminado en caliente superior a 1080 °C, preferentemente superior a 1180 °C;
- la composición química del acero comprende, expresándose el contenido en porcentaje en peso: $0,30 \% < C < 50,60 \%$;
- la composición química del acero comprende, expresándose el contenido en porcentaje en peso: $1,25 \% < Si < 1,6 \%$;
- y
- 55 - la composición química del acero comprende, expresándose el contenido en porcentaje en peso: $1,09 \% < Mn < 1,5 \%$.

[0014] La invención también se refiere a una pieza de acero laminado en caliente que tiene una composición que comprende, en porcentaje en peso:

60

- $0,20 \leq C \leq 0,60 \%$,
 $1,0 \% \leq Si \leq 2,0 \%$,
 $0,60 \% \leq Mn \leq 1,60 \%$,
 y $0,5 < Cr < 2,2 \%$,

65

y opcionalmente uno o más elementos seleccionados de entre

0,01 % < Mo < 0,3 %,

0,01 % < V < 0,30 %;

siendo el resto Fe e impurezas inevitables resultantes de la fundición; comprendiendo el riel de acero una cabeza que tiene una microestructura que consiste, en fracción de superficie, en:

5

49 % a 67 % de bainita,

14 % a 25 % de austenita retenida, teniendo la austenita retenida un contenido medio de carbono comprendido entre el 0,80 % y el 1,44 %, y 13 % a 34 % de martensita revenida.

10 **[0015]** La pieza de acero laminado en caliente puede comprender además una o más de las siguientes características, tomadas junto con o según cualquier combinación técnicamente posible:

- la fracción de superficie de bainita en la microestructura de la cabeza del riel es superior al 56 % ;

15 - la fracción de superficie de austenita retenida en la microestructura de la cabeza del riel está comprendida entre el 18 % y el 23 %;

- la fracción de superficie de martensita revenida en la microestructura de la cabeza del riel está comprendida entre el 14,5 % y el 22,5 %;

- el contenido medio de carbono en la austenita retenida es superior al 1,3 %;

- la composición química del acero comprende, expresándose el contenido en porcentaje en peso: $0,30 \% \leq C \leq 0,6 \%$;

20 - la composición química del acero comprende, expresándose el contenido en porcentaje en peso: $1,25 \% \leq Si \leq 1,6 \%$;

- la composición química del acero comprende, expresándose el contenido en porcentaje en peso: $0,9 \% \leq Mn \leq 1,5 \%$;

- la cabeza del riel tiene una dureza comprendida entre 420 HB y 470 HB, preferentemente superior a 450 HB;

- la cabeza del riel tiene una resistencia a la tracción comprendida entre 1300 MPa y 1450 MPa;

- la cabeza del riel tiene un límite elástico comprendido entre 1000 MPa y 1150 MPa; y

25 - la cabeza del riel tiene un alargamiento total comprendido entre el 13 % y el 18 %.

[0016] Otros aspectos y ventajas de la invención se desprenderán después de leer la siguiente descripción, dada a modo de ejemplo y hecha en referencia a los dibujos adjuntos, en los que:

30 - La Figura 1 es una vista en sección del riel, y;

- La Figura 2 es un gráfico que muestra el límite superior y el límite inferior de la temperatura a lo largo del tiempo durante la etapa de enfriamiento de la cabeza;

- La Figura 3 es un gráfico de los coeficientes de dilatación térmica lineal de tres muestras coeficiente de función de dilatación térmica de la temperatura.

35

[0017] En la Figura 1 se representa una realización de un riel 10 según la invención.

[0018] El riel 10 comprende una cabeza 12 y un pie 14, estando el pie 14 y la cabeza 12 conectados entre sí a través de un soporte 16.

40

[0019] Como se representa en la Figura 1, el soporte 16 tiene una anchura máxima estrictamente inferior a la anchura máxima de la cabeza 12, notablemente al menos inferior al 50 % a la anchura máxima de la cabeza 12.

[0020] Asimismo, el soporte tiene una anchura máxima estrictamente inferior a la anchura máxima del pie, notablemente al menos inferior al 50 % a la anchura máxima del pie.

45

[0021] La cabeza 12, el pie 14 y el soporte 16 están hechos integralmente.

[0022] El riel 10, en particular la cabeza 12 del riel 10, se fabrica a partir de un acero que tiene una composición química que comprende, en porcentaje en peso:

50

0,20 % < C < 0,60 %, y más particularmente $0,30 \% < C < 0,60 \%$,

$1,0 \% < Si < 2,0 \%$, y preferentemente $1,25 \% < Si < 1,6 \%$.

$0,60 \% < Mn < 1,60 \%$, y preferentemente $1,09 \% < Mn < 1,5 \%$,

55

y $0,5 \leq Cr \leq 2,2 \%$,

y opcionalmente uno o más elementos seleccionados de entre

$0,01 \% < Mo < 0,3 \%$,

$0,01 \% < V < 0,30 \%$;

siendo el resto Fe e impurezas inevitables resultantes de la fundición.

60

[0023] En esta aleación, el carbono es el elemento de aleación que tiene el efecto principal de controlar y ajustar la microestructura deseada y las propiedades del acero. El carbono estabiliza la austenita y, por lo tanto, conduce a su retención incluso a temperatura ambiente. Además, el carbono permite lograr una buena resistencia mecánica combinada y la dureza deseada, combinadas con una buena ductilidad y resistencia al impacto.

65

- 5 **[0024]** Un contenido de carbono inferior al 0,20 % en peso conduce a la formación de una austenita retenida no suficientemente estable, insuficiente dureza y resistencia a la tracción e insuficientes resistencias a la fatiga por contacto de rodadura y al desgaste. Con contenidos de carbono superiores al 0,60 %, la ductilidad y la resistencia al impacto del acero se deterioran por la aparición de segregación central. Por lo tanto, el contenido de carbono está comprendido entre el 0,20 % y el 0,60 % en peso.
- [0025]** El contenido de carbono está comprendido preferentemente entre el 0,30 % y el 0,60 % en porcentaje en peso.
- 10 **[0026]** El contenido de silicio está comprendido entre el 1,0 % y el 2,0 % en peso. El Si, que es un elemento que no es soluble en la cementita, impide o al menos retrasa la precipitación de carburo, en particular durante la formación de bainita, y permite la difusión de carbono en la austenita retenida, favoreciendo así la estabilización de la austenita retenida. El Si aumenta aún más la resistencia del acero por endurecimiento de la solución sólida. Por debajo del 1,0 % en peso de silicio, estos efectos no son lo suficientemente marcados. Con un contenido de silicio superior al
- 15 2,0 % en peso, la resistencia al impacto podría verse afectada negativamente por la formación de óxidos de gran tamaño. Además, un contenido de Si superior al 2,0 % en peso podría conducir a una mala calidad de la superficie del acero.
- [0027]** Preferentemente, el contenido de Si está comprendido entre el 1,25 % y el 1,6 % en peso.
- 20 **[0028]** El contenido de manganeso está comprendido entre el 0,60 % y el 1,60 % en peso, y preferentemente entre el 1,09 % y el 1,5 %. El Mn tiene un papel importante para controlar la microestructura y estabilizar la austenita. Como elemento gammágeno, el Mn reduce la temperatura de transformación de la austenita, mejora la posibilidad de enriquecimiento del carbono al aumentar la solubilidad de carbono en austenita y amplía el intervalo aplicable de
- 25 velocidades de enfriamiento ya que retrasa la formación de perlita. El Mn aumenta aún más la resistencia del material por endurecimiento de la solución sólida, y refina la estructura. Por debajo del 0,6 % en peso, estos efectos no son lo suficientemente marcados. Con contenidos superiores al 1,6 %, el Mn favorece la formación de una fracción demasiado grande de martensita, lo que es perjudicial para la ductilidad del producto.
- 30 **[0029]** El contenido de cromo está comprendido entre el 0,5 % y el 2,2 % en peso. El Cr es eficaz para estabilizar la austenita retenida, asegurando una cantidad predeterminada de la misma. También es útil para fortalecer el acero. Sin embargo, el Cr se añade principalmente por su efecto endurecedor. El Cr promueve el crecimiento de las fases transformadas a baja temperatura y permite obtener la microestructura objetivo en un amplio intervalo de
- 35 velocidades de enfriamiento. Con contenidos inferiores al 0,5 %, estos efectos no son lo suficientemente marcados. Con contenidos superiores al 2,2 %, el Mn favorece la formación de una fracción demasiado grande de martensita, lo que es perjudicial para la ductilidad del producto. Además, con contenidos superiores al 2,2 % en peso, la adición de Cr se vuelve innecesariamente cara.
- [0030]** Cuando está presente, el contenido de molibdeno está comprendido entre el 0,01 % y el 0,3 % en peso.
- 40 En el acero de la invención, el Mo puede estar presente como una impureza, en un contenido que es generalmente de al menos el 0,01 %, o añadido como una adición voluntaria. Cuando se añade, el contenido de Mo es preferentemente de al menos el 0,10 %. Cuando se añade, el Mo mejora la templabilidad del acero y además facilita la formación de bainita inferior al disminuir la temperatura a la que aparece esta estructura, resultando la bainita inferior en una buena resistencia al impacto del acero. Con contenidos superiores al 0,3 % en peso, el Mo puede tener, sin
- 45 embargo, un efecto negativo sobre esta misma resistencia al impacto. Además, por encima del 0,3 %, la adición de Mo se vuelve innecesariamente cara.
- [0031]** Cuando está presente, el contenido de vanadio está comprendido entre el 0,01 % y el 0,30 %. El vanadio se añade opcionalmente como elemento de fortalecimiento y refinamiento. Cuando se añade, el contenido de V es
- 50 preferentemente de al menos el 0,10 %. Por debajo del 0,10 %, no se observa ningún efecto significativo sobre las propiedades mecánicas. Por encima del 0,30 %, en las condiciones de fabricación según la invención, se observa una saturación del efecto sobre las propiedades mecánicas. Cuando no se añade V, el V está generalmente presente como una impureza en un contenido de al menos el 0,01 %.
- 55 **[0032]** El resto de la composición es hierro e impurezas inevitables. A este respecto, el níquel, el fósforo, el azufre, el nitrógeno, el oxígeno y el hidrógeno se consideran elementos residuales que son impurezas inevitables. Por lo tanto, su contenido es como máximo 0,05 % de Ni, como máximo 0,025 % de P, como máximo 0,020 % de S, como máximo 0,009 % de N, como máximo 0,003 % de O y como máximo 0,0003 % de H.
- 60 **[0033]** El riel 10, en particular la cabeza 12 del riel 10, tiene una microestructura que consiste, en fracciones superficiales, en:
- 49 % a 67 % de bainita,
 - 14 % a 25 % de austenita retenida, y
- 65 - 13 % a 34 % de martensita revenida.

- [0034]** La bainita puede incluir bainita granular y bainita libre de carburo tipo listón. En el marco de la invención, la bainita libre de carburo designará la bainita que contiene menos de 100 carburos por unidad de superficie de 100 micrómetros cuadrados.
- 5 **[0035]** Preferentemente, la fracción de superficie de bainita en la microestructura de la cabeza 12 es superior o igual al 56 %.
- [0036]** La austenita retenida y la martensita revenida están generalmente presentes como constituyentes M/A, ubicados entre los listones o placas de bainita.
- 10 **[0037]** La austenita también está contenida en la bainita entre los listones o placas de bainita.
- [0038]** La austenita retenida tiene un contenido medio de carbono comprendido entre el 0,83 % y el 1,44 %, preferentemente superior al 1,3 %.
- 15 **[0039]** Preferentemente, la fracción de superficie de austenita retenida en la microestructura de la cabeza 12 está comprendida entre el 18 % y el 23 %.
- [0040]** La martensita revenida está contenida en la bainita entre los listones o placas de bainita, y en los componentes M/A.
- 20 **[0041]** La martensita es martensita revenida y preferentemente martensita autorrevenida. Generalmente, la martensita revenida tiene un bajo contenido de carbono, es decir, un contenido medio de C estrictamente inferior al contenido medio de C en el acero.
- 25 **[0042]** Preferentemente, la fracción de superficie de martensita revenida en la microestructura de la cabeza 12 está comprendida entre el 14,5 % y el 22,5 %.
- [0043]** La cabeza 12 del riel 10 tiene una dureza de al menos 420 HB, generalmente comprendida entre 430 HB y 470 HB, una resistencia a la tracción de al menos 1300 MPa, generalmente comprendida entre 1300 MPa y 1450 MPa, un límite elástico de al menos 1000 MPa, generalmente comprendido entre 1000 MPa y 1150 MPa, y un alargamiento total de al menos el 13 %, generalmente comprendido entre el 13 % y el 18 %.
- 30 **[0044]** La fabricación del riel 10 según la invención se puede realizar mediante cualquier procedimiento adecuado.
- 35 **[0045]** Un procedimiento preferido para producir tal riel comprende una etapa de colada de un acero para obtener un semiproducto, teniendo dicho acero la composición química anterior.
- 40 **[0046]** El procedimiento comprende además una etapa de laminado en caliente del semiproducto en un semiproducto laminado en caliente que tiene la forma del riel 10 y comprende una cabeza 12, con una temperatura de laminado final T_{FRT} superior a Ar3.
- [0047]** Preferentemente, durante la etapa de laminado en caliente del semiproducto, el semiproducto se lamina en caliente desde una temperatura de inicio de laminado en caliente superior a 1080 °C, preferentemente superior a 1180 °C.
- 45 **[0048]** Por ejemplo, antes del laminado en caliente, el semiproducto se recalienta a una temperatura comprendida entre 1150 °C y 1270 °C y a continuación se lamina en caliente.
- 50 **[0049]** Después de terminar el laminado en caliente, el riel 10 se hace pasar preferentemente a través de un horno de inducción. Esto permite evitar la descomposición de la austenita.
- [0050]** El procedimiento para fabricar un riel 10 comprende a continuación el enfriamiento de la cabeza 12 del semiproducto laminado en caliente desde la temperatura de laminado final T_{FRT} hasta una temperatura de parada de enfriamiento T_{CS} comprendida entre 200 °C y 520 °C, de modo que la temperatura de la cabeza 12 del semiproducto laminado en caliente a lo largo del tiempo esté comprendida entre un límite superior y un límite inferior, representados en la Figura 2, teniendo el límite superior las coordenadas de tiempo y temperatura definidas por A1 (0 segundos, 780 °C), B1 (50 segundos, 600 °C) y C1 (110 segundos, 520 °C), teniendo el límite inferior las coordenadas de tiempo y temperatura definidas por A2 (0 segundos, 675 °C), B2 (50 segundos, 510 °C) y C2 (110 segundos, 300 °C).
- 60 **[0051]** La temperatura de parada de enfriamiento T_{CS} es la temperatura a la que se detiene el enfriamiento.
- [0052]** En una primera realización, la temperatura de parada de enfriamiento T_{CS} está comprendida entre 300 °C y 520 °C.
- 65

[0053] En esta realización, la cabeza puede alcanzar la temperatura de parada de enfriamiento T_{CS} antes o después de alcanzar un punto comprendido entre los puntos C1 y C2 definidos anteriormente.

[0054] En una segunda realización, la temperatura de parada de enfriamiento T_{CS} está comprendida entre 200 °C y 300 °C. En esta realización, durante el enfriamiento, después de alcanzar un punto comprendido entre los puntos C1 y C2, la cabeza 12 se enfría adicionalmente a la temperatura de parada de enfriamiento T_{CS} . Durante el enfriamiento a la temperatura de parada de enfriamiento T_{CS} , se produce una transformación parcial de la austenita a bainita y martensita.

[0055] Si la cabeza 12 del semiproducto laminado en caliente se enfría de modo que su temperatura a lo largo del tiempo sea superior al límite superior, se formarán ferrita y perlita y precipitarán carburos tras el enfriamiento, de modo que no se obtendrá la estructura deseada.

[0056] Si la cabeza 12 del semiproducto laminado en caliente se enfría de modo que su temperatura a lo largo del tiempo sea inferior al límite inferior, se obtendrá una fracción de martensita demasiado alta y una fracción insuficiente de bainita.

[0057] Más específicamente, durante esta etapa de enfriamiento de la cabeza 12 del semiproducto laminado en caliente, todo el semiproducto laminado en caliente se enfría de modo que la temperatura del semiproducto laminado en caliente a lo largo del tiempo esté comprendida entre el límite superior y el límite inferior.

[0058] La etapa de enfriamiento de la cabeza 12 del semiproducto laminado en caliente se realiza preferentemente a través de chorros de agua. Tales chorros de agua permiten lograr velocidades de enfriamiento rápidas y temperaturas de liberación y recuperación de calor controladas.

[0059] Después de esta etapa de enfriamiento, el procedimiento comprende una etapa de mantenimiento de la cabeza 12 del semiproducto laminado en caliente en un intervalo de temperatura comprendido entre 300 °C y 520 °C durante un tiempo de mantenimiento t_{mant} de al menos 12 minutos, estando comprendido ventajosamente el tiempo de mantenimiento t_{mant} entre 15 min y 23 min.

[0060] Preferentemente, todo el semiproducto laminado en caliente se mantiene en un intervalo de temperatura comprendido entre 300 °C y 520 °C durante dicho tiempo de mantenimiento t_{mant} .

[0061] Durante esta etapa de mantenimiento, se completa la transformación de la austenita en bainita.

[0062] Además, el carbono se divide de la martensita a la austenita, estabilizando así la austenita y reviniendo la martensita.

[0063] Si el tiempo de mantenimiento t_{mant} en el intervalo de temperatura comprendido entre 300 °C y 520 °C es inferior a 12 minutos, se forma una fracción insuficiente de bainita, de modo que se producirá una transformación demasiado importante de la austenita en martensita durante el enfriamiento posterior a temperatura ambiente.

[0064] Por ejemplo, la cabeza 12 se mantiene a una temperatura de mantenimiento T_{mant} comprendida entre 300 °C y 520 °C.

[0065] Si la temperatura de parada de enfriamiento está comprendida entre 300 °C y 520 °C, la etapa de mantenimiento de la cabeza 12 en el intervalo de temperatura comprendido entre 300 °C y 520 °C durante el tiempo de mantenimiento t_{mant} se realiza, por ejemplo, inmediatamente después del enfriamiento a la temperatura de parada de enfriamiento T_{CS} . Además, la temperatura de mantenimiento T_{mant} es superior o igual a la temperatura de parada de enfriamiento T_{CS} .

[0066] Si la temperatura de parada de enfriamiento está comprendida entre 200 °C y 300 °C, el procedimiento comprende además, después del enfriamiento de la cabeza a la temperatura de parada de enfriamiento T_{CS} y antes de la etapa de mantenimiento de la cabeza en el intervalo de temperatura, una etapa de calentamiento de la cabeza del semiproducto laminado en caliente hasta una temperatura comprendida entre 300 °C y 520 °C. En tal caso, la temperatura de mantenimiento T_{mant} es superior a la temperatura de parada de enfriamiento T_{CS} .

[0067] Después del mantenimiento de la cabeza 12 en el intervalo de temperatura comprendido entre 300 °C y 520 °C, el semiproducto laminado en caliente se enfría hasta temperatura ambiente para obtener el riel 10. El semiproducto laminado en caliente se enfría a temperatura ambiente, preferentemente mediante enfriamiento por aire, y en particular mediante enfriamiento por aire natural.

[0068] Ventajosamente, después del enfriamiento, el riel 10 tiene una microestructura que consiste, en fracciones superficiales, en:

65

- 49 % a 67 % de bainita,
- 14 % a 25 % de austenita retenida, y
- 13 % a 34 % de martensita revenida.

5 **[0069]** La bainita puede incluir bainita granular y bainita libre de carburo. Preferentemente, la fracción de superficie de bainita en la microestructura de la cabeza 12 es superior o igual al 56 %.

[0070] La austenita retenida y la martensita revenida están generalmente presentes como constituyentes M/A, ubicados entre los listones o placas de bainita.

10

[0071] La austenita también está contenida en la bainita entre los listones o placas de bainita.

[0072] La austenita retenida tiene un contenido medio de carbono comprendido entre el 0,80 % y el 1,44 %, preferentemente superior al 1,3 %.

15

[0073] Preferentemente, la fracción de superficie de austenita retenida en la microestructura de la cabeza 12 está comprendida entre el 18 % y el 23 %.

20 **[0074]** La martensita revenida está contenida en la bainita entre los listones o placas de bainita, y en los componentes M/A.

[0075] La martensita es martensita revenida y preferentemente martensita autorrevenida. Generalmente, la martensita tiene un bajo contenido de carbono, es decir, un contenido medio de C estrictamente inferior al contenido medio de C en el acero.

25

[0076] Preferentemente, la fracción de superficie de martensita revenida en la microestructura de la cabeza 12 está comprendida entre el 14,5 % y el 22,5 %.

30 **[0077]** La cabeza 12 del riel 10 tiene una dureza comprendida entre 430 HB y 470 HB, una resistencia a la tracción comprendida entre 1300 MPa y 1450 MPa, un límite elástico comprendido entre 1000 MPa y 1150 MPa, y un alargamiento total comprendido entre el 13 % y el 18 %.

35 **[0078]** Opcionalmente, el procedimiento puede comprender además etapas de acabado, y en particular etapas de mecanizado o tratamiento de superficie, realizadas, por ejemplo, después de enfriar el semiproducto laminado en caliente a temperatura ambiente. Las etapas de tratamiento de superficie pueden ser, en particular, un tratamiento de granallado.

Ejemplos

40 **[0079]** Los inventores de la presente invención han llevado a cabo los siguientes experimentos.

[0080] Se proporcionaron en forma de semiproducto aceros con composición según la Tabla 1, expresada en peso.

Tabla 1

Acero	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Cr (%)	Mo (%)	N (ppm)	O (ppm)	H (ppm)
523513-L*	0,300	1,50	1,10	0,017	0,009	1,99	0,12	50	-	1,5
523514-L	0,318	1,52	1,11	0,017	0,011	1,97	0,02	56	-	1,6

45

[0081] Los semiproductos se laminaron en caliente en semiproductos laminados en caliente que tienen la forma del riel, con una temperatura de laminado final T_{FRT} superior a Ar3, a continuación se enfriaron desde la temperatura de laminado final T_{FRT} hasta una temperatura de parada de enfriamiento T_{CS} , con una velocidad de enfriamiento tal que, desde una temperatura T_0 en un tiempo de enfriamiento inicial $t_0=0$ s, los semiproductos laminados en caliente alcanzaron una temperatura T_{50} después de 50 s de enfriamiento, y a continuación una temperatura T_{110} después de 110 s de enfriamiento.

50

[0082] Las cabezas de los rieles se mantuvieron entonces en un intervalo de temperatura comprendido entre 300 °C y 520 °C, a una temperatura T_{mant} igual a la temperatura de parada de enfriamiento T_{CS} durante un tiempo de mantenimiento t_{mant} .

55

[0083] Los rieles finalmente se enfriaron hasta la temperatura ambiente.

[0084] Las condiciones de fabricación de los rieles se resumen en la Tabla 2 a continuación.

Tabla 2

	Acero	T _{FRT} (°C)	T ₀ (°C)	T ₅₀ (°C)	Velocidad media de enfriamiento entre T ₀ y T ₁ (°C/s)	T ₁₁₀ (°C)	Velocidad media de enfriamiento entre T ₁ y T _{CS} (°C/s)	T _{CS} (°C)	t _{mant} (min)
523513-Y208	52351 3-L*	998	750	592	3,2	481	1,9	434	18
523513-Y308	52351 3-L*	1012	754	572	3,6	446	2,1	429	20
523514-A208	52351 4-L	1003	751	563	3,8	467	1,6	423	23

Composición química:

5

[0085] Las muestras para el análisis químico se obtuvieron de la ubicación de la muestra de prueba de tracción como se indica en 9.1.3 en la norma EN 13674-1:2011, y a continuación se pulieron y analizaron mediante espectroscopía de emisión de chispa para determinar el porcentaje de peso promedio (% en peso). Además, se extrajeron varias puntas de 1 g, se desengrasaron y se sometieron a un análisis elemental de trazas de combustión para averiguar el porcentaje de N, O, S y C en un analizador de C/S LECO y de N/O LECO. También se analizó el hidrógeno por absorción de IR. La composición química de los aceros se muestra a continuación en la Tabla 3.

10

Tabla 3

Muestra	% en peso							ppm		
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	N	O	H
523513-Y208	0,34	1,59	1,09	0,020	0,014	2,07	0,05	65,8	29,1	1,8
523514-A208	0,34	1,58	1,09	0,019	0,016	2,04	0,01	63,9	10,6	1,5
523513-Y308	0,3	1,59	1,1	0,017	0,011	2,05	0,06	NA	NA	NA

Prueba de fatiga:

15

[0086] Las muestras de fatiga se extrajeron de la cabeza del riel y se mecanizaron según la norma ASTM E606-12.

20

[0087] Las pruebas de fatiga se realizaron a temperatura ambiente en una máquina de prueba universal hidráulica INSTRON 8801, en control de deformación con amplitud «pico a pico» de 0,00135 mm. La forma de onda utilizada fue una onda sinusoidal, con una deformación simétrica de +0,000675 mm en tensión y una deformación de -0,000675 mm en compresión. La ejecución fue de 5 millones de ciclos, deteniendo la prueba en este valor.

25

[0088] Se probaron tres réplicas en cada muestra.

[0089] La ejecución fue de 5 millones de ciclos, deteniendo la prueba en ese valor.

Tabla 4

Muestra	Reps	Ciclos (Prueba detenida en)
523513Y208	1	Ejecución (5.10 ⁶ ciclos)
	2	
	3	
523514A208	1	Ejecución (5.10 ⁶ ciclos)
	2	
	3	

(continuación)

Muestra	Reps	Ciclos (Prueba detenida en
523513Y308	1	Ejecución (5.10 ⁶ ciclos)
	2	
	3	

Microestructura - Microscopía óptica:

5

[0090] Se obtuvieron muestras metalográficas de la cabeza del riel según la Cláusula 9.1.4 de la norma EN 13674-1:2011.

10 **[0091]** Las muestras metalográficas se rectificaron, pulieron y atacaron químicamente con Nital al 2 % para revelar la microestructura de las muestras del riel. La observación microscópica se llevó a cabo utilizando un microscopio Leica DMi4000.

15 **[0092]** La apariencia general de la microestructura en toda la cabeza del riel es completamente bainítica, es decir, consiste en listones o placas de bainita, y martensita y austenita dispersas entre los listones o placas de bainita, para todas las muestras. La naturaleza de la microestructura se analizó con más detalle mediante microscopía electrónica de barrido de alta resolución y difracción de rayos X.

Caracterización de la microestructura mediante difracción de rayos X y microscopía electrónica de barrido de alta resolución:

20

[0093] Se realizó un análisis detallado en la muestra 523513Y208. El análisis de microscopía electrónica se hizo por medio de un microscopio electrónico de cañón de emisión de campo de alta resolución (FEG-SEM) Zeiss Ultra Plus. Se realizaron pruebas de difracción en el difractómetro de rayos X Bruker D8 Advance utilizando radiación CuK α .

25

[0094] El contenido de austenita y su contenido de carbono se midieron mediante difracción de rayos X (XRD) siguiendo las recomendaciones de la norma ASTM E975.

30 **[0095]** El contenido del constituyente M/A se obtuvo mediante el procedimiento de recuento manual de puntos en imágenes SEM según la norma ASTM E562. El contenido de martensita se determina a continuación restando del contenido del constituyente M/A el contenido de austenita retenida medido por XRD. El resto hasta el 100 % consiste en bainita.

35 **[0096]** La microestructura comprende 61,3 % de bainita, 20,20 % de austenita retenida con un contenido de carbono del 1,38 % y 18,5 % de martensita.

Dureza:

40 **[0097]** Por un lado, se evaluó la dureza Brinell en la superficie de rodadura de la cabeza del riel de conformidad con la Cláusula 9.1.8 de la norma EN 13674-1:2011 (valor medio de tres mediciones).

[0098] Por otro lado, se evaluó la dureza Brinell en la sección transversal del riel y utilizando un durómetro automático Leco LV700AT.

45 **[0099]** La Tabla 5 muestra los valores medios del ensayo de dureza en la superficie de rodadura (RS) y en diferentes puntos de la sección transversal.

Tabla 5

Muestra	RS	Punto 1			Punto 2		Punto 3	Punto 4	
		Izquierda	Centro	Derecha	Izquierda	Derecha	Centro	Izquierda	Derecha
523513/208	430	417	438	426	429	432	420	412	420
523514/208	431	429	432	420	426	420	426	426	420
523513/308	434	461	443	441	440	442	435	433	461

Prueba de tracción:

[0100] Según la Cláusula 9.1.9 de la norma EN 13674-1:2011, la prueba de tracción se llevó a cabo según la norma ISO 6892-1 utilizando probetas circulares proporcionales de 10 mm de diámetro. Las muestras de prueba ($D_0=10$ mm, $L_0=50$ mm) se extrajeron y probaron utilizando una máquina de prueba mecánica universal Instron 600DX.

[0101] Se probaron tres réplicas para cada muestra.

10 **[0102]** La Tabla 6 muestra los resultados para el límite elástico (YS), la resistencia a la tracción (TS) y el alargamiento (A_{50}).

Tabla 6

Muestra	YS (MPa)	TS (MPa)	A50 (%)
523513/Y208	1089	1440	14
523514/A208	1098	1452	14
523514/Y308	1052	1442	14

Coefficiente de dilatación térmica lineal (LTEC):

15

[0103] El LTEC se midió en la dirección de rodadura del riel. Las muestras de prueba (4 mm de diámetro y 10 mm de longitud) se extrajeron de la ubicación de la ubicación central de la muestra de tracción y el coeficiente de dilatación térmica se evaluó desde -70 °C hasta 70 °C a 2 °C/min por dilatometría de alta resolución (BAHR 805A/D).

20 **[0104]** El cambio relativo de longitud (dL/L_0) y el coeficiente de dilatación térmica (CTE) para una de las tres pasadas de calentamiento realizadas se representan en la Figura 3.

[0105] A continuación, el LTEC técnico, utilizando 25 °C como temperatura de referencia, se muestra en la Tabla 7.

25

Tabla 7

Grado / Calor / Riel	LTEC _{25/50}	LTEC _{25/0}	LTEC _{25/-25}	LTEC _{25/-50}
BAM 60E2/523513/Y208	15,1	14,5	11,3	12,0
BAM 60E2 / 523514 / A208	14,6	14,4	11,2	11,9

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento para fabricar un riel que comprende una cabeza, comprendiendo el procedimiento las siguientes etapas sucesivas:
- 5 - colar un acero para obtener un semiproducto, teniendo dicho acero una composición química que comprende, en porcentaje en peso:
- 10 $0,20 \leq C \leq 0,60 \%$,
 $1,0 \% \leq Si \leq 2,0 \%$,
 $0,60 \% \leq Mn \leq 1,60 \%$,
y $0,5 \leq Cr \leq 2,2 \%$,
y opcionalmente uno o más elementos seleccionados de entre
- 15 $0,01 \% < Mo < 0,3 \%$,
 $0,01 \% < V < 0,30 \%$;
- siendo el resto Fe e impurezas inevitables resultantes de la fundición;
- laminar en caliente el semiproducto en un semiproducto laminado en caliente que tiene la forma del riel y que comprende una cabeza, con una temperatura de laminado final T_{FRT} superior a Ar3;
- 20 - enfriar la cabeza del semiproducto laminado en caliente desde la temperatura de laminado final T_{FRT} hasta una temperatura de parada de enfriamiento T_{CS} comprendida entre 200 °C y 520 °C, de modo que la temperatura de la cabeza del semiproducto laminado en caliente a lo largo del tiempo esté comprendida entre un límite superior y un límite inferior, teniendo el límite superior las coordenadas de tiempo y temperatura definidas por A1 (0 segundos, 780 °C), B1 (50 segundos, 600 °C) y C1 (110 segundos, 520 °C), teniendo el límite inferior las coordenadas de
- 25 tiempo y temperatura definidas por A2 (0 segundos, 675 °C), B2 (50 segundos, 510 °C) y C2 (110 segundos, 300 °C);
- mantener la cabeza del semiproducto laminado en caliente en un intervalo de temperatura comprendido entre 300 °C y 520 °C durante un tiempo de mantenimiento t_{mant} de al menos 12 minutos, y;
- 30 - enfriar el semiproducto laminado en caliente a temperatura ambiente para obtener el riel.
2. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que la microestructura de la cabeza del riel consiste, en fracción de superficie, en:
- 35 - 49 % a 67 % de bainita;
- 14 % a 25 % de austenita retenida, teniendo la austenita retenida un contenido medio de carbono comprendido entre el 0,80 % y el 1,44 %;
- 13 % a 34 % de martensita revenida.
3. Procedimiento según la reivindicación 2, en el que la fracción de superficie de bainita en la
- 40 microestructura de la cabeza es superior o igual al 56 %.
4. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 2 o 3, en el que la fracción de superficie de austenita retenida en la microestructura de la cabeza está comprendida entre el 18 % y el 23 %.
- 45 5. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 2 a 4, en el que la fracción de superficie de martensita revenida en la microestructura de la cabeza está comprendida entre el 14,5 % y el 22,5 %.
6. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 2 a 5, en el que el contenido medio de carbono en la austenita retenida es superior al 1,3 %.
- 50 7. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6, en el que la temperatura de parada de enfriamiento T_{CS} está comprendida entre 300 °C y 520 °C.
8. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6, en el que la temperatura de parada de
- 55 enfriamiento T_{CS} está comprendida entre 200 °C y 300 °C, y el procedimiento comprende además, después de la etapa de enfriamiento de la cabeza del semiproducto laminado en caliente hasta la temperatura de parada de enfriamiento T_{CS} y antes de la etapa de mantenimiento de la cabeza en el intervalo de temperatura, una etapa de calentamiento de la cabeza del semiproducto laminado en caliente hasta una temperatura comprendida entre 300 °C y 520 °C.
- 60 9. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8, en el que la etapa de enfriamiento de la cabeza del semiproducto laminado en caliente se realiza a través de chorros de agua.
10. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 9, en el que, durante la etapa de enfriamiento de la cabeza del semiproducto laminado en caliente, todo el semiproducto laminado en caliente se enfría de modo que
- 65 la temperatura del semiproducto laminado en caliente a lo largo del tiempo está comprendida entre el límite superior y

el límite inferior.

11. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 10, en el que, durante la etapa de laminado en caliente del semiproducto, el semiproducto es laminado en caliente desde una temperatura de inicio de laminado en caliente superior a 1080 °C, preferentemente superior a 1180 °C.
12. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 11, en el que la composición química del acero comprende, expresándose el contenido en porcentaje en peso: $0,30 \% < C < 0,60 \%$.
- 10 13. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 12, en el que la composición química del acero comprende, expresándose el contenido en porcentaje en peso: $1,25 \% < Si < 1,6 \%$.
14. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 13, en el que la composición química del acero comprende, expresándose el contenido en porcentaje en peso: $1,09 \% < Mn < 1,5 \%$.
- 15 15. Riel de acero, hecho de un acero que tiene una composición química que comprende, en porcentaje en peso:
- 20 $0,20 \leq C \leq 0,60 \%$,
 $1,0 \% \leq Si \leq 2,0 \%$,
 $0,60 \% \leq Mn \leq 1,60 \%$,
y $0,5 \leq Cr \leq 2,2 \%$,
y opcionalmente uno o más elementos seleccionados de entre
 $0,01 \% < Mo < 0,3 \%$,
- 25 $0,01 \% < V < 0,30 \%$;
- siendo el resto Fe e impurezas inevitables resultantes de la fundición;
comprendiendo el riel de acero una cabeza que tiene una microestructura que consiste, en fracción de superficie, en:
- 30 49 % a 67 % de bainita,
14 % a 25 % de austenita retenida, teniendo la austenita retenida un contenido medio de carbono comprendido entre el 0,80 % y el 1,44 %,
13 % a 34 % de martensita revenida.
- 35 16. Riel de acero según la reivindicación 15, en el que la fracción de superficie de bainita en la microestructura de la cabeza del riel es superior al 56 %.
17. Riel de acero según cualquiera de las reivindicaciones 15 o 16, en el que la fracción de superficie de austenita retenida en la microestructura de la cabeza del riel está comprendida entre el 18 % y el 23 %.
- 40 18. Riel de acero según cualquiera de las reivindicaciones 15 a 17, en el que la fracción de superficie de martensita revenida en la microestructura de la cabeza del riel está comprendida entre el 14,5 % y el 22,5 %.
19. Riel de acero según cualquiera de las reivindicaciones 15 a 18, en el que el contenido medio de carbono en la austenita retenida es superior al 1,3 %.
- 45 20. Riel de acero según cualquiera de las reivindicaciones 15 a 19, en el que la composición química del acero comprende, expresándose el contenido en porcentaje en peso: $0,30 \% < C < 0,6 \%$.
- 50 21. Riel de acero según cualquiera de las reivindicaciones 15 a 20, en el que la composición química del acero comprende, expresándose el contenido en porcentaje en peso: $1,25 \% < Si < 1,6 \%$.
22. Riel de acero según cualquiera de las reivindicaciones 15 a 21, en el que la composición química del acero comprende, expresándose el contenido en porcentaje en peso: $0,9 \% < Mn < 1,5 \%$.
- 55 23. Riel de acero según cualquiera de las reivindicaciones 15 a 22, en el que la cabeza del riel tiene una dureza comprendida entre 420 HB y 470 HB, preferentemente superior a 450 HB.
24. Riel de acero según cualquiera de las reivindicaciones 15 a 23, en el que la cabeza del riel tiene una resistencia a la tracción comprendida entre 1300 MPa y 1450 MPa.
- 60 25. Riel de acero según cualquiera de las reivindicaciones 15 a 24, en el que la cabeza del riel tiene un límite elástico comprendido entre 1000 MPa y 1150 MPa.
- 65 26. Riel de acero según cualquiera de las reivindicaciones 15 a 25, en el que la cabeza del riel tiene un

alargamiento total comprendido entre el 13 % y el 18 %.

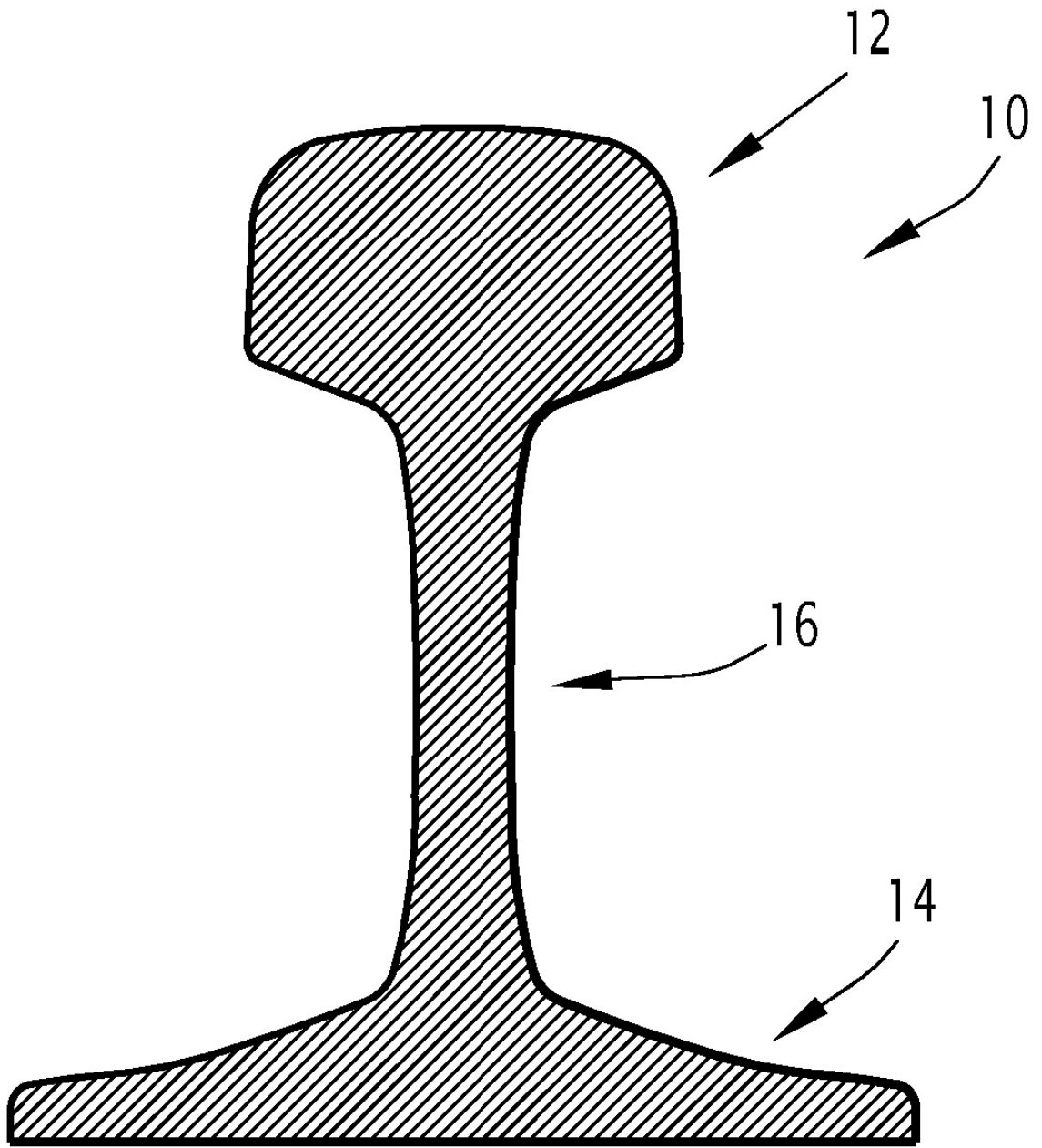


FIG.1

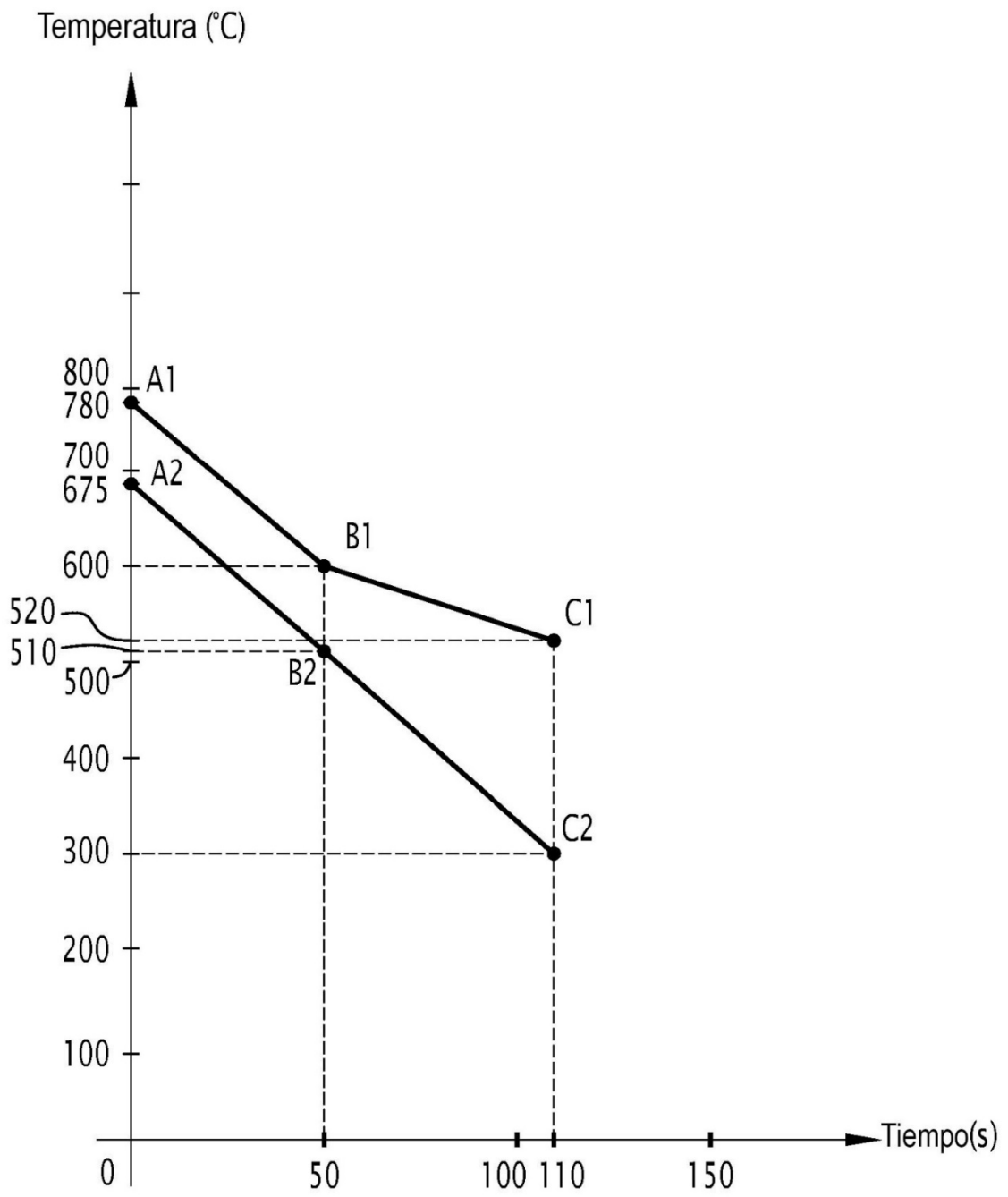


FIG.2

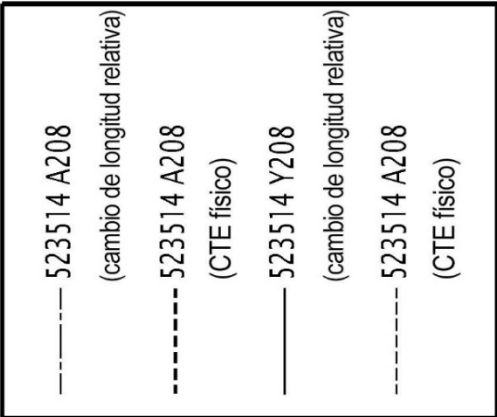
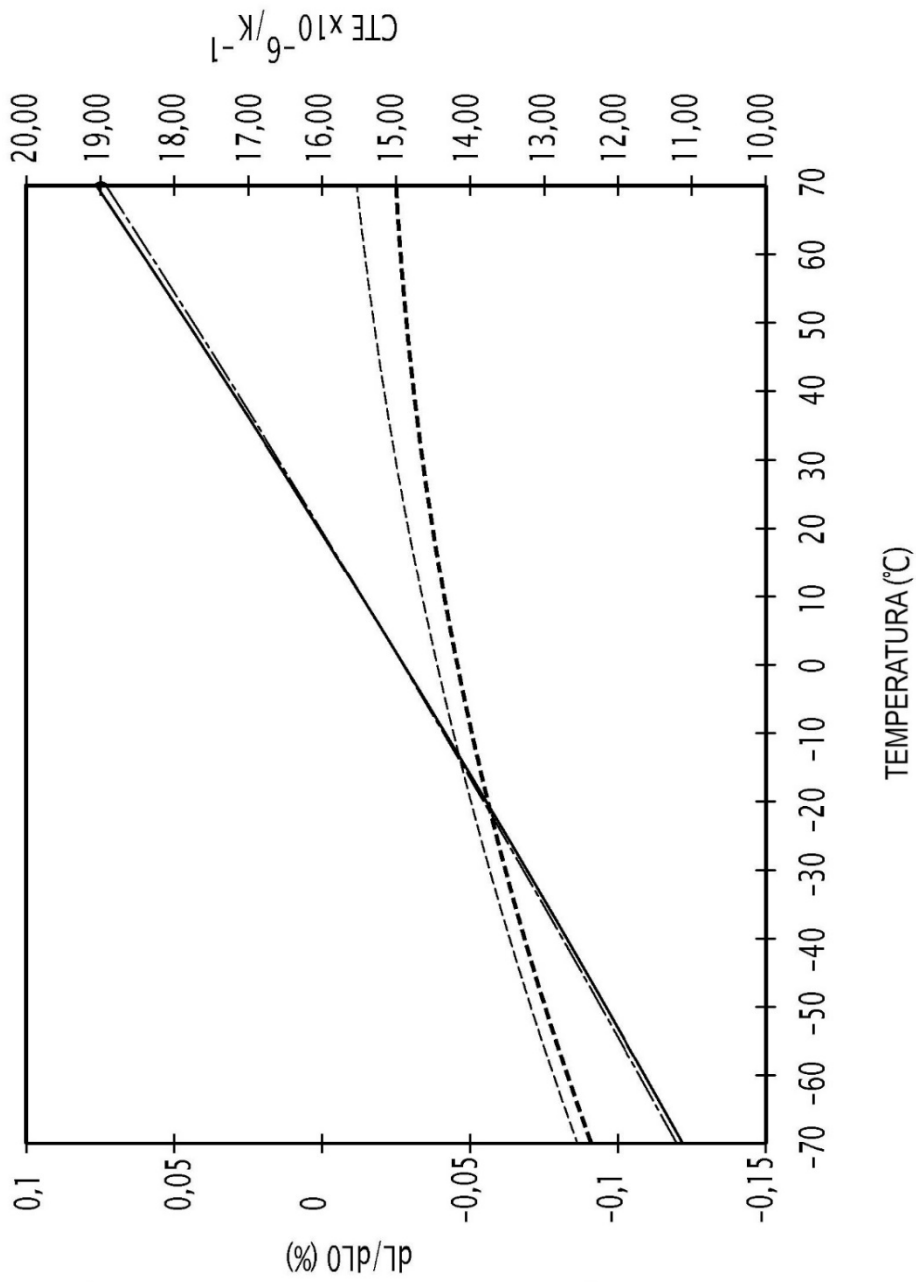


FIG.3