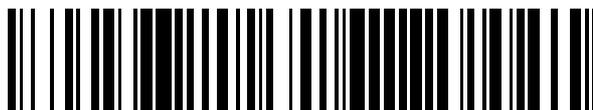


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 670 297**

51 Int. Cl.:

C22F 1/18 (2006.01)

C22C 14/00 (2006.01)

C21D 1/26 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **27.06.2011 PCT/US2011/041934**

87 Fecha y número de publicación internacional: **26.01.2012 WO12012102**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **27.06.2011 E 11731591 (1)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **28.02.2018 EP 2596143**

54 Título: **Procesamiento de aleaciones de titanio alfa/beta**

30 Prioridad:

19.07.2010 US 838674

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

29.05.2018

73 Titular/es:

**ATI PROPERTIES, INC. (100.0%)
1600 N.E. Old Salem Road
Albany, OR 97321, US**

72 Inventor/es:

BRYAN, DAVID, J.

74 Agente/Representante:

VALLEJO LÓPEZ, Juan Pedro

ES 2 670 297 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

Procesamiento de aleaciones de titanio alfa/beta

5 **Campo técnico**

Esta descripción se refiere a procesos para producir aleaciones de titanio alfa/beta ($\alpha + \beta$) de alta resistencia y a productos producidos por los procesos descritos.

10 **Antecedentes**

Las aleaciones de titanio y a base de titanio se utilizan en varias aplicaciones debido a la resistencia relativamente alta, baja densidad y buena resistencia a la corrosión de estos materiales. Por ejemplo, las aleaciones de titanio y a base de titanio se utilizan ampliamente en la industria aeroespacial debido a la alta relación resistencia-peso y la resistencia a la corrosión de los materiales. Un grupo de aleaciones de titanio conocido por ser ampliamente utilizado en varias aplicaciones son las aleaciones alfa/beta ($\alpha + \beta$) de Ti-6Al-4V, que comprenden una composición nominal del 6 por ciento de aluminio, 4 por ciento de vanadio, menos del 0,20 por ciento de oxígeno y titanio, en peso.

Las aleaciones de Ti-6Al-4V son uno de los materiales manufacturados a base de titanio más comunes, y se estima que representan más del 50 % de mercado total de materiales a base de titanio. Las aleaciones de Ti-6Al-4V se utilizan en una serie de aplicaciones que se benefician de la combinación de las aleaciones de una alta resistencia a temperaturas de bajas a moderadas, peso ligero y resistencia a la corrosión. Por ejemplo, las aleaciones de Ti-6Al-4V se utilizan para producir componentes de motores de aeronaves, componentes estructurales de aeronaves, fijaciones, componentes automotrices de alto rendimiento, componentes para dispositivos médicos, equipos deportivos, componentes para aplicaciones marinas y componentes para equipos de procesamiento químico.

Los productos de aleación de Ti-6Al-4V se usan generalmente en unas condiciones de recocido por molienda o en unas condiciones tratadas y envejecidas en solución (TES). Se pueden proporcionar productos de molienda de aleación de Ti-6Al-4V de resistencia relativamente inferior en unas condiciones de recocido por molienda. Como se usa en el presente documento, las "condiciones de recocido por molienda" se refieren a las condiciones de una aleación de titanio después de un tratamiento térmico de "recocido por molienda" en el que una pieza de trabajo se temple a una temperatura elevada (por ejemplo, 1200-1500 °F/649-816 °C) durante aproximadamente 1-8 horas y se enfría con aire inmóvil. Se realiza un tratamiento térmico de recocido por molienda después de que se trabaje en caliente una pieza de trabajo en el campo de fase $\alpha + \beta$. Las aleaciones de Ti-6Al-4V en unas condiciones de recocido por molienda tienen una resistencia a la tracción final mínima especificada de 130 ksi (896 MPa) y un límite elástico mínimo especificada de 120 ksi (827 MPa), a temperatura ambiente. Consulte, por ejemplo, Especificaciones de materiales aeroespaciales (AMS) 4928 y 6931A.

Para aumentar la resistencia de las aleaciones de Ti-6Al-4V, los materiales generalmente se someten a un tratamiento térmico TES. Los tratamientos térmicos TES generalmente se realizan después de que una pieza de trabajo se trabaje en caliente en el campo de fase $\alpha + \beta$. TES se refiere al tratamiento térmico de una pieza de trabajo a una temperatura elevada por debajo de la temperatura β -transus (por ejemplo, 1725-1775 °F/940-968 °C) durante un tiempo a la temperatura relativamente breve (por ejemplo, aproximadamente 1 hora) y a continuación enfriando rápidamente la pieza de trabajo con agua o un medio equivalente. La pieza de trabajo templada se envejece a una temperatura elevada (por ejemplo, 900-1200 °F/482-649 °C) durante aproximadamente 4-8 horas y se enfría en aire inmóvil. Las aleaciones de Ti-6Al-4V en condiciones TES tienen una resistencia a la tracción final mínima especificada de 150-165 ksi (1034-1138 MPa) y un límite elástico mínimo especificada de 140-155 ksi (965-1069 MPa), a temperatura ambiente, dependiendo del diámetro o la dimensión de espesor del artículo procesado TES. Consulte, por ejemplo, AMS 4965 y AMS 6930A.

Sin embargo, hay una serie de limitaciones en el uso de tratamientos térmicos TES para conseguir una alta resistencia en las aleaciones de Ti-6Al-4V. Por ejemplo, las propiedades físicas inherentes del material y el requerimiento de enfriamiento rápido durante el procesamiento TES limitan los tamaños y dimensiones de los artículos que pueden conseguir una alta resistencia y pueden exhibir tensiones térmicas, tensiones internas, alabeo y distorsión dimensional relativamente grandes. Esta descripción se refiere a métodos para procesar ciertas aleaciones de titanio $\alpha + \beta$ para proporcionar propiedades mecánicas que son comparables o superiores a las propiedades de las aleaciones de Ti-6Al-4V en condiciones TES, pero que no adolecen de las limitaciones del procesamiento TES.

60 **Sumario**

La invención proporciona un proceso para formar un artículo a partir de una aleación de titanio $\alpha + \beta$ de acuerdo con la reivindicación 1 de las reivindicaciones adjuntas.

65

Las realizaciones descritas en este documento se refieren a procesos para formar un artículo a partir de una aleación de titanio $\alpha + \beta$. Los procesos comprenden el trabajo en frío de la aleación de titanio $\alpha + \beta$ a una temperatura en el intervalo de temperatura ambiente a 500 °F (260 °C) y, después de la etapa de trabajo en frío, el envejecimiento de la aleación de titanio $\alpha + \beta$ a una temperatura en el intervalo de 700 °F a 1200 °F (371-649 °C). La aleación de titanio $\alpha + \beta$ comprende, en porcentajes en peso, del 3,50 % al 5,00 % de aluminio, del 2,00 % al 3,00 % de vanadio, del 1,00 % al 2,00 % de hierro, del 0,20 % al 0,30 % de oxígeno, impurezas accidentales y titanio.

Se entiende que la invención desvelada y descrita en este documento no está limitada a las realizaciones desveladas en este Sumario.

Breve descripción de los dibujos

Las características de diversas formas de realización no limitantes desveladas y descritas en este documento pueden entenderse mejor por referencia a las figuras adjuntas, en las que:

La Figura 1 es un gráfico de la resistencia a la tracción final promedio y el límite elástico promedio frente al trabajo en frío cuantificado como reducciones porcentuales en el área (% de RA) para barras de aleación de titanio $\alpha + \beta$ estiramiento en frío en unas condiciones de estiramiento;

La Figura 2 es un gráfico de la ductilidad promedio cuantificado como porcentaje de alargamiento a la tracción para barras de aleación de titanio $\alpha + \beta$ estiramiento en frío en condiciones de estiramiento;

La Figura 3 es un gráfico de la resistencia a la tracción final y límite elástico frente al porcentaje de alargamiento para barras de aleación de titanio $\alpha + \beta$ después de trabajadas en frío y envejecidas directamente de acuerdo con las realizaciones de la invención descrita en este documento;

La Figura 4 es un gráfico de la resistencia a la tracción final promedio y el límite elástico promedio frente al alargamiento medio para barras de aleación de titanio $\alpha + \beta$ después de trabajadas en frío y envejecidas directamente de acuerdo con las realizaciones de la invención descrita en este documento;

La Figura 5 es un gráfico de la resistencia a la tracción final promedio y el límite elástico promedio frente a la temperatura de envejecimiento para barras de aleación de titanio $\alpha + \beta$ trabajadas en frío hasta reducciones del 20 % en el área y envejecidas durante 1 hora u 8 horas a temperatura;

La Figura 6 es un gráfico de la resistencia a la tracción final promedio y el límite elástico promedio frente a la temperatura de envejecimiento para barras de aleación de titanio $\alpha + \beta$ trabajadas en frío hasta reducciones del 30 % en el área y envejecidas durante 1 hora u 8 horas a temperatura;

La Figura 7 es un gráfico de la resistencia a la tracción final promedio y el límite elástico promedio frente a la temperatura de envejecimiento para barras de aleación de titanio $\alpha + \beta$ trabajadas en frío hasta reducciones del 40 % en el área y envejecidas durante 1 hora u 8 horas a temperatura;

La Figura 8 es un gráfico del alargamiento promedio frente a la temperatura de envejecimiento para barras de aleación de titanio $\alpha + \beta$ trabajadas en frío hasta reducciones del 20 % en el área y envejecidas durante 1 hora u 8 horas a temperatura;

La Figura 9 es un gráfico del alargamiento promedio frente a la temperatura de envejecimiento para barras de aleación de titanio $\alpha + \beta$ trabajadas en frío hasta reducciones del 30 % en el área y envejecidas durante 1 hora u 8 horas a temperatura;

La Figura 10 es un gráfico del alargamiento promedio frente a la temperatura de envejecimiento para barras de aleación de titanio $\alpha + \beta$ trabajadas en frío hasta reducciones del 40 % en el área y envejecidas durante 1 hora u 8 horas a temperatura;

La Figura 11 es un gráfico de la resistencia a la tracción final promedio y el límite elástico promedio frente al tiempo de envejecimiento para barras de aleación de titanio $\alpha + \beta$ trabajadas en frío con reducciones del 20 % en el área y envejecidas a 850 °F (454 °C) o 1100 °F (593 °C); y

La Figura 12 es un gráfico del alargamiento promedio frente al tiempo de envejecimiento para barras de aleación de titanio $\alpha + \beta$ trabajadas en frío con reducciones del 20 % en el área y envejecidas a 850 °F (454 °C) o 1100 °F (593 °C).

El lector apreciará los detalles anteriores, así como otros, al considerar la siguiente descripción detallada de diversas realizaciones no limitantes de acuerdo con la presente descripción. El lector también puede comprender detalles adicionales tras la implementación o el uso de las realizaciones descritas en este documento.

Descripción detallada de realizaciones no limitantes

5 Debe entenderse que las descripciones de las realizaciones desveladas se han simplificado para ilustrar solo aquellos rasgos y características que son relevantes para una comprensión clara de las realizaciones descritas, al tiempo que se eliminan, por motivos de claridad, otros rasgos y características. Las personas que tienen experiencia en la técnica, al considerar esta descripción de las realizaciones descritas, reconocerán que pueden ser deseables otros rasgos y características en una implementación o aplicación particular de las realizaciones descritas. Sin embargo, debido a que dichos rasgos y características se pueden comprobar e implementar fácilmente por personas con experiencia en la técnica al considerar esta descripción de las realizaciones descritas, y por lo tanto, no son necesarias para una comprensión completa de las realizaciones descritas, en este documento no se proporciona una descripción de dichos rasgos, características y similares. Como tal, debe entenderse que la descripción expuesta en este documento es meramente a modo de ejemplo e ilustrativa de las realizaciones desveladas y no pretende limitar el alcance de la invención definida por las reivindicaciones.

15 En la presente divulgación, salvo que se indique lo contrario, todos los parámetros numéricos deben entenderse como precedidos y modificados en todos los casos por el término "aproximadamente", en el que los parámetros numéricos poseen la característica de variabilidad inherente de las técnicas de medición subyacentes utilizadas para determinar el valor numérico del parámetro. Como mínimo, y no como intento de limitar la aplicación de la doctrina de equivalentes al alcance de las reivindicaciones, cada parámetro numérico descrito en la presente descripción debe interpretarse al menos a la luz del número de dígitos significativos informados y aplicando técnicas de redondeo ordinarias.

25 Además, cualquier intervalo numérico enumerado en este documento está previsto que incluya todos los subintervalos comprendidos dentro del intervalo enumerado. Por ejemplo, un intervalo de "1 a 10" está previsto que incluya todos los subintervalos entre (e incluido) el valor mínimo mencionado de 1 y el valor máximo indicado de 10, es decir, que tiene un valor mínimo igual o superior a 1 y un valor máximo igual o inferior a 10. Cualquier limitación numérica máxima indicada en este documento está previsto que incluya todas las limitaciones numéricas inferiores incluidas en la misma y cualquier limitación numérica mínima indicada en este documento está previsto que incluya todas las limitaciones numéricas superiores incluidas en la misma. En consecuencia, el Solicitante se reserva el derecho a enmendar la presente divulgación, incluidas las reivindicaciones, para recitar expresamente cualquier subintervalo comprendido dentro de los intervalos expresados mencionados expresamente en este documento.

35 Los artículos gramaticales "uno", "un", "una" y "el/la", tal como se usan en el presente documento, está previsto que incluyan "al menos uno" o "uno o más", a menos que se indique lo contrario. Por lo tanto, los artículos se usan en este documento para referirse a uno o más de uno (es decir, a "al menos uno") de los objetos gramaticales del artículo. A modo de ejemplo, "un componente" significa uno o más componentes, y así, posiblemente, se contempla más de un componente y pueden emplearse o usarse en una implementación de las realizaciones descritas.

40 La presente divulgación incluye descripciones de diversas realizaciones. Debe entenderse que las diversas realizaciones descritas en este documento son a modo de ejemplo, ilustrativas y no limitantes. Por lo tanto, la presente divulgación no está limitada por la descripción de las diversas realizaciones a modo de ejemplo, ilustrativas y no limitantes. Por el contrario, la invención está definida por las reivindicaciones, que pueden modificarse para recitar cualquier rasgo o característica descrito de forma expresa o inherente o soportado de otra manera de forma expresa o inherente por la presente divulgación. Además, el Solicitante se reserva el derecho a enmendar las reivindicaciones para renunciar de manera afirmativa a rasgos o características que puedan estar presentes en el estado de la técnica. Las diversas realizaciones desveladas y descritas en este documento pueden comprender, consistir en, o consistir esencialmente en los rasgos y características que se describen de diversas formas en este documento.

50 Las diversas realizaciones descritas en este documento están dirigidas a procesos termomecánicos para formar un artículo a partir de una aleación de titanio $\alpha + \beta$ que tiene una composición química diferente que las aleaciones de Ti-6Al-4V. En diversas realizaciones, la aleación de titanio $\alpha + \beta$ comprende, en porcentajes en peso, del 3,50 al 5,00 de aluminio, del 2,00 al 3,00 de vanadio, del 1,00 al 2,00 de hierro, del 0,20 al 0,30 de oxígeno, impurezas accidentales y titanio. Estas aleaciones de titanio $\alpha + \beta$ (que se denominan en este documento "aleaciones de Kosaka") se describen en la patente de EE.UU. n.º 5.980.655 de Kosaka. La composición comercial nominal de las aleaciones de Kosaka incluye, en porcentajes en peso, el 4,00 de aluminio, el 2,50 de vanadio, el 1,50 de hierro, el 0,25 de oxígeno, impurezas accidentales y titanio, y puede denominarse aleación de Ti-4Al-2,5V-1,5Fe-0,25O.

60 La patente de EE.UU. n.º 5.980.655 ("la patente '655") describe el uso del procesamiento termomecánico $\alpha + \beta$ para formar placas a partir de lingotes de aleación de Kosaka. Las aleaciones de Kosaka se desarrollaron como una alternativa de menor coste a las aleaciones de Ti-6Al-4V para aplicaciones de placas de armadura balística. El procesamiento termomecánico $\alpha + \beta$ descrito en la patente '655 incluye:

- 65 (a) formación de un lingote que tiene una composición de aleación de Kosaka;
 (b) forja β del lingote a una temperatura superior a la temperatura β -transus de la aleación (por ejemplo, a una temperatura superior a 1900 °F (1038 °C)) para formar una losa intermedia;

(c) forja $\alpha + \beta$ de la losa intermedia a una temperatura inferior a la temperatura β -transus de la aleación pero en el campo de fase $\alpha + \beta$, por ejemplo, a una temperatura de 1500-1775 °F (815-968 °C);

(d) laminado $\alpha + \beta$ de la losa al espesor final de la placa a una temperatura inferior a la temperatura β -transus de la aleación pero en el campo de fase $\alpha + \beta$, por ejemplo, a una temperatura de 1500-1775 °F (815-968 °C); y

5 (e) recocido por molienda a una temperatura de 1300-1500 °F (704-815 °C).

Las placas formadas de acuerdo con los procesos descritos en la patente '655 presentan propiedades balísticas comparables o superiores a las placas de Ti-6Al-4V. Sin embargo, las placas formadas de acuerdo con los procesos descritos en la patente '655 exhibieron resistencias a la tracción a temperatura ambiente menores que las altas resistencias logradas por las aleaciones de Ti-6Al-4V después del procesamiento TES.

Las aleaciones de Ti-6Al-4V en condiciones TES pueden exhibir una resistencia a la tracción final de aproximadamente 160-177 ksi (1103-1220 MPa) y un límite elástico de aproximadamente 150-164 ksi (1034-1131 MPa), a temperatura ambiente. Sin embargo, debido a ciertas propiedades físicas del Ti-6Al-4V, como una conductividad térmica relativamente baja, la resistencia a la tracción y el límite elástico que se puede conseguir con las aleaciones de Ti-6Al-4V a través del procesamiento TES depende del tamaño del artículo de aleación de Ti-6Al-4V sometido a procesamiento TES. A este respecto, la conductividad térmica relativamente baja de las aleaciones de Ti-6Al-4V limita el diámetro/espesor de los artículos que pueden endurecerse/reforzarse completamente utilizando el procesamiento TES porque las partes internas de los artículos de aleación de gran diámetro o sección gruesa no se enfrían a suficiente velocidad durante el enfriamiento para formar la fase alfa-prima (fase α'). De esta manera, el procesamiento TES de aleaciones de Ti-6Al-4V de gran diámetro o sección gruesa produce un artículo que tiene una carcasa reforzada por precipitación que rodea un núcleo relativamente más débil sin el mismo nivel de refuerzo de la de precipitación, que puede disminuir significativamente la resistencia global del artículo. Por ejemplo, la resistencia de los artículos de aleación de Ti-6Al-4V comienza a disminuir para artículos que tienen dimensiones pequeñas (por ejemplo, diámetros o espesores) superiores a aproximadamente 0,5 pulgadas (1,27 cm), y el procesamiento TES no proporciona ningún beneficio a artículos de aleación de Ti-6Al-4V que tienen dimensiones pequeñas superiores a aproximadamente 3 pulgadas (7,62 cm).

La dependencia del tamaño de la resistencia a la tracción de las aleaciones de Ti-6Al-4V en condiciones TES es evidente en los mínimos de resistencia decrecientes correspondientes al aumento del tamaño de artículos para especificaciones de materiales, como AMS 6930A, en los que los mínimos de resistencia más altos para las aleaciones de Ti-6Al-4V en condiciones TES corresponden a artículos que tienen un diámetro o un espesor inferior a 0,5 pulgadas (1,27 cm). Por ejemplo, AMS 6930A especifica una resistencia a la tracción final mínima de 165 ksi (1138 MPa) y un límite elástico mínimo de 155 ksi (1069 MPa) para artículos de aleación de Ti-6Al-4V en condiciones TES y con un diámetro o espesor inferior a 0,5 pulgadas (1,27 cm).

Además, el procesamiento TES puede inducir tensiones térmicas e internas relativamente grandes y causar deformación de artículos de aleación de titanio durante la etapa de enfriamiento. A pesar de sus limitaciones, el procesamiento TES es el método estándar para conseguir una alta resistencia en las aleaciones de Ti-6Al-4V porque las aleaciones de Ti-6Al-4V generalmente no son deformables en frío y, por lo tanto, no se pueden trabajar en frío para aumentar la resistencia. Sin pretender imponer ninguna teoría, generalmente se cree que la falta de deformabilidad/trabajabilidad en frío es atribuible a un fenómeno de bandas de deslizamiento en las aleaciones de Ti-6Al-4V.

La fase alfa (fase α) de las aleaciones de Ti-6Al-4V precipita partículas coherentes de Ti₃Al (alfa-dos). Estos precipitados alfa-dos (α_2) coherentes aumentan la resistencia de las aleaciones, pero debido a que los precipitados coherentes se cortan por dislocaciones móviles durante la deformación plástica, los precipitados dan como resultado la formación de pronunciadas bandas de deslizamiento planas dentro de la microestructura de las aleaciones. Además, se ha demostrado que los cristales de aleación de Ti-6Al-4V forman áreas localizadas de orden de corto alcance de átomos de aluminio y oxígeno, es decir, desviaciones localizadas de una distribución homogénea de átomos de aluminio y oxígeno dentro de la estructura cristalina. Se ha demostrado que estas áreas localizadas de menor entropía promueven la formación de bandas de deslizamiento planas pronunciadas dentro de la microestructura de las aleaciones de Ti-6Al-4V. La presencia de estas características microestructurales y termodinámicas dentro de las aleaciones de Ti-6Al-4V puede provocar el entrelazamiento de las dislocaciones por deslizamiento o evitar que las dislocaciones se deslicen durante la deformación. Cuando esto ocurre, el deslizamiento se localiza en regiones planas pronunciadas en la aleación denominadas bandas de deslizamiento. Las bandas de deslizamiento provocan una pérdida de ductilidad, nucleación de grietas y propagación de grietas, lo que da lugar a la falla de las aleaciones de Ti-6Al-4V durante el trabajo en frío.

Consecuentemente, las aleaciones de Ti-6Al-4V generalmente se trabajan (por ejemplo, forjadas, laminadas, estiradas, y similares) a temperaturas elevadas, generalmente por encima de la temperatura de soldaduras de α_2 . Las aleaciones de Ti-6Al-4V no se pueden trabajar en frío de manera efectiva para aumentar la resistencia debido a la alta incidencia de agrietamientos (es decir, falla de la pieza de trabajo) durante la deformación en frío. Sin embargo, inesperadamente se descubrió que las aleaciones de Kosaka tienen un grado sustancial de deformabilidad/trabajabilidad en frío, como se describe en la Publicación de Solicitud de Patente de Estados Unidos n.º 2004/0221929.

Se ha determinado que las aleaciones de Kosaka no presentan bandas de deslizamiento durante el trabajo en frío y, por lo tanto, exhiben significativamente menos agrietamiento durante el trabajo en frío que la aleación de Ti-6Al-4V. Sin pretender imponer ninguna teoría, se cree que la falta de bandas de deslizamiento en las aleaciones de Kosaka puede atribuirse a una minimización del orden de corto alcance del aluminio y el oxígeno. Además, la estabilidad de la fase α_2 es menor en aleaciones de Kosaka en relación con Ti-6Al-4V, por ejemplo, como demuestran los modelos de equilibrio para la temperatura de solvus de la fase α_2 (1305 °F/707 °C para Ti-6Al-4V (0,15 % en peso de oxígeno como máximo) y 1062°F/572°C para Ti-4Al-2,5V-1,5Fe-0,25O, determinada usando el software Pandat, CompuTherm LLC, Madison, Wisconsin, EE. UU.). Como resultado, las aleaciones de Kosaka pueden trabajar en frío para conseguir una alta resistencia y retener un nivel de ductilidad viable. Además, se ha descubierto que las aleaciones de Kosaka se pueden trabajar en frío y envejecer para conseguir una mayor resistencia y mejor ductilidad en comparación con el trabajo en frío solo. Como tales, las aleaciones de Kosaka pueden alcanzar una resistencia y ductilidad comparables o superiores a las de las aleaciones de Ti-6Al-4V en condiciones TES, pero sin la necesidad ni las limitaciones del procesamiento TES.

En general, "trabajo en frío" se refiere a trabajar una aleación a una temperatura por debajo de la cual la tensión de flujo del material disminuye significativamente. Como se usa en este documento en relación con los procesos descritos, "trabajo en frío", "trabajado en frío", "conformado en frío", y términos similares, o "frío" usados en relación con una técnica particular de trabajo o conformado, se refieren al funcionamiento o las características de haberse trabajado, según sea el caso, a una temperatura no superior a aproximadamente 500 °F (260 °C). Por lo tanto, por ejemplo, una operación de estiramiento realizada en una pieza de trabajo de aleación de Kosaka a una temperatura en el intervalo de temperatura ambiente a 500 °F (260 °C) en este documento se considera en frío. Además, los términos "trabajar", "formar" y "deformar" se usan generalmente de manera intercambiable en la presente memoria, como lo son los términos "trabajabilidad", "formabilidad", "deformabilidad" y términos similares. Se entenderá que el significado aplicado a "trabajo en frío", "trabajado en frío", "conformado en frío" y términos similares, en relación con la presente solicitud, no pretende limitar y no limita el significado de esos términos en otros contextos o en relación con otras invenciones.

En diversas realizaciones, los procesos descritos en este documento comprenden trabajar en frío una aleación de titanio $\alpha + \beta$ a una temperatura en el intervalo de temperatura ambiente hasta 500°F (260°C). Después de la operación de trabajo en frío, la aleación de titanio $\alpha + \beta$ se envejece a una temperatura en el intervalo de 700 °F a 1200 °F (371-649 °C).

Cuando en la presente invención se describe una operación mecánica, tal como, por ejemplo, un pase de estiramiento en frío, como llevada a cabo, realizada o similar, a una temperatura específica o dentro de un intervalo de temperatura específico, la operación mecánica se realiza en una pieza que está a la temperatura especificada o dentro del intervalo de temperatura especificado al inicio de la operación mecánica. Durante el transcurso de una operación mecánica, la temperatura de una pieza de trabajo puede oscilar desde la temperatura inicial de la pieza de trabajo al inicio de la operación mecánica. Por ejemplo, la temperatura de una pieza de trabajo puede aumentar debido al calentamiento adiabático o reducirse debido al enfriamiento conductivo, convectivo y/o radiativo durante una operación de trabajo. La magnitud y la dirección de la variación de temperatura desde la temperatura inicial al inicio de la operación mecánica pueden depender de varios parámetros, como, por ejemplo, el nivel de trabajo realizado en la pieza de trabajo, la tasa de tinción a la que se realiza el trabajo, la temperatura inicial de la pieza de trabajo al inicio de la operación mecánica y la temperatura del entorno circundante.

Cuando en este documento se describe una operación térmica tal como un tratamiento térmico de envejecimiento que se realiza a una temperatura específica y durante un periodo de tiempo específico o dentro de un intervalo de temperatura y un intervalo de tiempo específicos, la operación se realiza durante el tiempo especificado mientras se mantiene la pieza de trabajo a la temperatura. Los periodos de tiempo descritos en este documento para operaciones térmicas tales como tratamientos térmicos de envejecimiento no incluyen los tiempos de calentamiento y enfriamiento, que pueden depender, por ejemplo, del tamaño y la forma de la pieza de trabajo.

En diversas realizaciones, una aleación de titanio $\alpha + \beta$ se trabaja en frío a una temperatura en el intervalo de temperatura ambiente hasta 500 °F (260 °C), o cualquier subintervalo dentro del mismo, tal como, por ejemplo, de temperatura ambiente a 450 °F (232 °C), de temperatura ambiente a 400 °F (204 °C), de temperatura ambiente a 350 °F (177 °C), de temperatura ambiente a 300 °F (149 °C), de temperatura ambiente a 250 °F (121 °C), de temperatura ambiente a 200 °F (93 °C), o de temperatura ambiente a 150 °F (65 °C). En diversas realizaciones, una aleación de titanio $\alpha + \beta$ se trabaja en frío a temperatura ambiente.

En diversas realizaciones, el trabajo en frío de una aleación de titanio $\alpha + \beta$ puede realizarse usando técnicas de formación que incluyen, pero no necesariamente se limitan a, estiramiento, embutición profunda, laminación, laminado, forjado, extrusión, laminación en frío, oscilación, flujo de inflexión, hilatura por cizallamiento, hidroformación, formación de protuberancias, estampación, extrusión de impacto, conformación explosiva, formación de caucho, retroextrusión, perforación, hilatura, conformación por estirado, doblado a presión, conformación electromagnética, rúbrica, acuñación y combinaciones de cualquiera de estos. En términos de los procesos descritos en este documento, estas técnicas de formación confieren trabajo en frío a una aleación de titanio $\alpha + \beta$ cuando se

realizan a temperaturas no superiores a 500°F (260°C).

En diversas realizaciones, una aleación de titanio $\alpha + \beta$ se trabaja en frío hasta una reducción del área del 20 % al 60 %. Por ejemplo, una pieza de trabajo de aleación de titanio $\alpha + \beta$, tal como, por ejemplo, un lingote, un tocho, una barra, una varilla, un tubo, una losa, o una placa, puede deformarse plásticamente, por ejemplo, en una operación de estiramiento en frío, laminado en frío, extrusión en frío o forjado en frío, de modo que el área de la sección transversal de la pieza de trabajo se reduce en un porcentaje en el intervalo del 20 % al 60 %. Para piezas de trabajo cilíndricas, tales como, por ejemplo, lingotes redondos, tochos, barras, varillas y tubos, se mide la reducción de área para la sección transversal circular o anular de la pieza de trabajo, que generalmente es perpendicular a la dirección de movimiento de la pieza de trabajo a través de un molde de estiramiento, un molde de extrusión o similar. Asimismo, la reducción en el área de piezas de trabajo laminadas se mide para la sección transversal de la pieza de trabajo que generalmente es perpendicular a la dirección de movimiento de la pieza de trabajo a través de los rodillos de un aparato de laminación o similar.

En diversas realizaciones, una aleación de titanio $\alpha + \beta$ se trabaja en frío hasta una reducción del 20 % al 60 % en el área, o cualquier subintervalo en el mismo, tal como, por ejemplo, del 30 % al 60 %, del 40 % al 60 %, del 50 % al 60 %, del 20 % al 50 %, del 20 % al 40 %, del 20 % al 30 %, del 30 % al 50 %, del 30 % al 40 % o del 40 % al 50 %. Una aleación de titanio $\alpha + \beta$ se puede trabajar en frío hasta una reducción del 20 % al 60 % en el área sin fisuración observable del borde u otro agrietamiento en la superficie. El trabajo en frío puede realizarse sin ningún recocido de alivio de la tensión intermedio. De esta manera, diversas realizaciones de los procesos descritos en la presente memoria pueden conseguir reducciones en el área de hasta el 60 % sin ningún recocido de alivio de la tensión intermedio entre operaciones de trabajo en frío secuenciales tales como, por ejemplo, dos o más pasadas a través de un aparato de estiramiento en frío.

En diversas realizaciones, una operación de trabajo en frío puede comprender al menos dos ciclos de deformación, en el que cada ciclo de deformación comprende trabajar en frío una aleación de titanio $\alpha + \beta$ hasta una reducción de área de al menos un 10 %. En diversas realizaciones, una operación de trabajo en frío puede comprender al menos dos ciclos de deformación, en el que cada ciclo de deformación comprende trabajar en frío una aleación de titanio $\alpha + \beta$ hasta una reducción de área de al menos un 20 %. Los al menos dos ciclos de deformación pueden conseguir reducciones en el área de hasta el 60 % sin ningún recocido de alivio de la tensión intermedio.

Por ejemplo, en una operación de estiramiento en frío, una barra puede estirarse en frío en un primer pase de estiramiento a temperatura ambiente hasta una reducción de área superior al 20 %. La barra estirada en frío superior al 20 % se puede estirar en frío en un segundo pase de estiramiento a temperatura ambiente hasta una segunda reducción en el área de más del 20 %. Los dos pases de estiramiento en frío se pueden realizar sin ningún recocido de alivio de la tensión intermedio entre los dos pases. De esta manera, una aleación de titanio $\alpha + \beta$ se puede trabajar en frío utilizando al menos dos ciclos de deformación para conseguir reducciones globales más grandes en el área. En una implementación dada de una operación de trabajo en frío, las fuerzas requeridas para la deformación en frío de una aleación de titanio $\alpha + \beta$ dependerán de parámetros que incluyen, por ejemplo, el tamaño y la forma de la pieza de trabajo, el límite elástico del material de aleación, el grado de deformación (por ejemplo, reducción de área), y la técnica particular de trabajo en frío.

En diversas realizaciones, después de una operación de trabajo en frío, una aleación de titanio $\alpha + \beta$ trabajada en frío se envejece a una temperatura en el intervalo de 700 °F a 1200 °F (371-649 °C), o cualquier subintervalo en el mismo, como, por ejemplo, de 800 °F a 1150 °F, de 850 °F a 1150 °F, de 800 °F a 1100 °F, o de 850 °F a 1100 °F (es decir, de 427-621 °C, de 454-621 °C, de 427-593 °C o de 454-593 °C). El tratamiento térmico de envejecimiento puede realizarse a una temperatura y durante un tiempo suficiente para proporcionar una combinación especificada de propiedades mecánicas, tal como, por ejemplo, una resistencia a la tracción final especificada, un límite elástico especificado, y/o un alargamiento especificado. En diversas realizaciones, puede realizarse un tratamiento térmico de envejecimiento durante hasta 50 horas a temperatura, por ejemplo. En diversas realizaciones, se puede llevar a cabo un tratamiento térmico de envejecimiento durante 0,5 a 10 horas a temperatura, o cualquier subintervalo en el mismo, tal como, por ejemplo, de 1 a 8 horas a temperatura. El tratamiento térmico de envejecimiento puede realizarse en un horno de temperatura controlada, tal como, por ejemplo, un horno de gas al aire libre.

En diversas realizaciones, los procesos descritos en la presente memoria pueden comprender además una operación de trabajo en caliente realizada antes de la operación de trabajo en frío. Se puede realizar una operación de trabajo en caliente en el campo de fase $\alpha + \beta$. Por ejemplo, puede realizarse una operación de trabajo en caliente a una temperatura en el intervalo de 300 °F a 25 °F (167-15 °C) por debajo de la temperatura β -transus de la aleación de titanio $\alpha + \beta$. En general, las aleaciones de Kosaka tienen una temperatura β -transus de aproximadamente 1765 °F a 1800 °F (963-982 °C). En diversas realizaciones, una aleación de titanio $\alpha + \beta$ se puede trabajar en caliente a una temperatura en el intervalo de 1500 °F a 1775 °F (815-968 °C), o cualquier subintervalo en el mismo, tal como, por ejemplo, de 1600 °F a 1775 °F, de 1600 °F a 1750 °F, o de 1600 °F a 1700 °F (es decir, 871-968 °C, 871-954 °C o 871-927 °C).

En realizaciones que comprenden una operación de trabajo en caliente antes de la operación de trabajo en frío, los procesos descritos en la presente memoria pueden comprender además un tratamiento térmico opcional de recocido o alivio de la tensión entre la operación de trabajo en caliente y la operación de trabajo en frío. Una aleación de

titanio $\alpha + \beta$ trabajado en caliente se puede recocer a una temperatura en el intervalo de 1200 °F a 1500 °F (649-815 °C), o cualquier sub-intervalo en el mismo, como, por ejemplo, de 1200 °F a 1400 °F o de 1250 °F a 1300 °F (es decir, 649-760 °C o 677-704 °C).

5 En diversas realizaciones, los procesos descritos en este documento pueden comprender una operación de trabajo en caliente opcional realizada en el campo de fase β antes de una operación de trabajo en caliente realizada en el campo de fase $\alpha + \beta$. Por ejemplo, un lingote de aleación de titanio se puede trabajar en caliente en el campo de fase β para formar un artículo intermedio. El artículo intermedio se puede trabajar en caliente en el campo de fase $\alpha + \beta$ para desarrollar una microestructura de fase $\alpha + \beta$. Después del trabajo en caliente, el artículo intermedio se
10 puede recocer para aliviar la tensión y a continuación se puede trabajar en frío a una temperatura en el intervalo de temperatura ambiente a 500 °F (260 °C). El artículo trabajado en frío se puede envejecer a una temperatura en el intervalo de 700 °F a 1200 °F (371-649 °C). El trabajo en caliente opcional en el campo de fase β se realiza a una temperatura superior a la temperatura β -transus de la aleación, por ejemplo, a una temperatura en el intervalo de 1800 °F a 2300 °F (982-1260 °C), o cualquier sub-intervalo en el mismo, como, por ejemplo, de 1900 °F a 2300 °F o de 1900 °F a 2100 °F (es decir, 1038-1260 °C o 1038-1149 °C).

En diversas realizaciones, los procesos descritos en la presente memoria se pueden caracterizar por la formación de un artículo de aleación de titanio $\alpha + \beta$ que tiene una resistencia a la tracción final en el intervalo de 155 ksi a 200 ksi (1069-1379 MPa) y un alargamiento en el intervalo del 8 % al 20 %, a temperatura ambiente. Además, en diversas
20 realizaciones, los procesos descritos en la presente memoria se pueden caracterizar por la formación de un artículo de aleación de titanio $\alpha + \beta$ que tiene una resistencia a la tracción final en el intervalo de 160 ksi a 180 ksi (1103-1241 MPa) y un alargamiento en el intervalo del 8 % al 20 %, a temperatura ambiente. Además, en diversas realizaciones, los procesos descritos en la presente memoria se pueden caracterizar por la formación de un artículo de aleación de titanio $\alpha + \beta$ que tiene una resistencia a la tracción final en el intervalo de 165 ksi a 180 ksi (1138-1241 MPa) y un alargamiento en el intervalo del 8 % al 17 %, a temperatura ambiente.

En diversas realizaciones, los procesos descritos en la presente memoria se pueden caracterizar por la formación de un artículo de aleación de titanio $\alpha + \beta$ que tiene un límite elástico en el intervalo de 140 ksi a 165 ksi (965-1138 MPa) y un alargamiento en el intervalo del 8 % al 20 %, a temperatura ambiente. Además, en diversas realizaciones,
30 los procesos descritos en la presente memoria se pueden caracterizar por la formación de un artículo de aleación de titanio $\alpha + \beta$ que tiene un límite elástico en el intervalo de 155 ksi a 165 ksi (1069-1138 MPa) y un alargamiento en el intervalo del 8 % al 15 %, a temperatura ambiente.

En diversas realizaciones, los procesos descritos en la presente memoria se pueden caracterizar por la formación de un artículo de aleación de titanio $\alpha + \beta$ que tiene una resistencia a la tracción final en cualquier subintervalo comprendido dentro de 155 ksi a 200 ksi (1069-1379 MPa), un límite elástico en cualquier subintervalo comprendido dentro de 140 ksi a 165 ksi (965-1138 MPa), y un alargamiento en cualquier subintervalo comprendido dentro del
35 8 % al 20 %, a temperatura ambiente.

En diversas realizaciones, los procesos descritos en la presente memoria se pueden caracterizar por la formación de un artículo de aleación de titanio $\alpha + \beta$ que tiene una resistencia a la tracción final de más de 155 ksi (1069 MPa), un límite elástico de más de 140 ksi (965 MPa), y un alargamiento superior al 8 %, a temperatura ambiente. Un artículo de aleación de titanio $\alpha + \beta$ que se forma de acuerdo con diversas realizaciones puede tener una resistencia a la tracción final superior a 166 ksi (1145 MPa), superior a 175 ksi (1207 MPa), superior a 185 ksi (1276 MPa) o superior
45 a 195 ksi (1345 MPa), a temperatura ambiente. Un artículo de aleación de titanio $\alpha + \beta$ que se forma de acuerdo con diversas realizaciones puede tener un límite elástico superior a 145 ksi (1000 MPa), superior a 155 ksi (1069 MPa), o superior a 160 ksi (1103 MPa), a temperatura ambiente. Un artículo de aleación de titanio $\alpha + \beta$ que se forma de acuerdo con diversas realizaciones puede tener un alargamiento superior al 8 %, superior al 10 %, superior al 12 %, superior al 14 %, superior al 16 % o superior al 18 %, a temperatura ambiente.

En diversas realizaciones, los procesos descritos en la presente memoria se pueden caracterizar por la formación de un artículo de aleación de titanio $\alpha + \beta$ que tiene una resistencia a la tracción final, un límite elástico y un alargamiento, a temperatura ambiente, que son al menos tan grandes como la resistencia a la tracción final, límite elástico, y alargamiento, a temperatura ambiente, de un artículo por lo demás idéntico que consiste en una aleación de Ti-6Al-4V en condiciones tratadas y envejecidas en solución (TES).
50

En diversas realizaciones, los procesos descritos en la presente memoria se pueden usar para procesar termomecánicamente aleaciones de titanio $\alpha + \beta$ que comprenden, consisten en, o consisten esencialmente en, en porcentajes en peso, del 3,50 % al 5,00 % de aluminio, del 2,00 % al 3,00 % de vanadio, del 1,00 % al 2,00 % de hierro, del 0,20 % al 0,30 % de oxígeno, elementos accidentales y titanio.
60

La concentración de aluminio en las aleaciones de titanio $\alpha + \beta$ procesadas termomecánicamente de acuerdo con los procesos descritos en la presente memoria varía del 3,50 al 5,00 % en peso, o cualquier subintervalo en el mismo, como, por ejemplo, del 3,50 % al 4,50 %, del 3,70 % al 4,30 %, del 3,75 % al 4,25 %, o del 3,90 % al 4,50 %.
65 La concentración de vanadio en las aleaciones de titanio $\alpha + \beta$ procesadas termomecánicamente de acuerdo con los procesos descritos en la presente memoria varía del 2,00 al 3,00 por ciento en peso, o cualquier subintervalo en el

mismo, tal como, por ejemplo, del 2,20 % al 3,00 %, del 2,20 % al 2,80 %, o del 2,30 % al 2,70 %. La concentración de hierro en las aleaciones de titanio $\alpha + \beta$ procesadas termomecánicamente de acuerdo con los procesos descritos en la presente memoria varía del 1,00 al 2,00 por ciento en peso, o cualquier subintervalo en el mismo, tal como, por ejemplo, del 1,00 % al 2,00 %, del 1,20 % al 1,80 %, o del 1,30 % al 1,70 %. La concentración de oxígeno en las aleaciones de titanio $\alpha + \beta$ procesadas termomecánicamente de acuerdo con los procesos descritos en la presente memoria varía del 0,20 al 0,30 por ciento en peso, o cualquier subintervalo en el mismo, tal como, por ejemplo, del 0,20 % al 0,30 %, del 0,22 % al 0,28 %, del 0,24 % al 0,30 %, o del 0,23 % al 0,27 %.

En diversas realizaciones, los procesos descritos en este documento se pueden usar para procesar termomecánicamente una aleación de titanio $\alpha + \beta$ que comprende, consiste en, o consiste esencialmente en la composición nominal del 4,00 por ciento en peso de aluminio, el 2,50 por ciento en peso de vanadio, el 1,50 por ciento en peso de hierro y el 0,25 por ciento en peso de oxígeno, titanio e impurezas accidentales (Ti-4Al-2,5V-1,5Fe-0,25O). Una aleación de titanio $\alpha + \beta$ que tiene la composición nominal Ti-4Al-2,5V-1,5Fe-0,25O está disponible en el mercado como aleación ATI 425® de Allegheny Technologies Incorporated.

En diversas realizaciones, los procesos descritos en la presente memoria se pueden usar para procesar termomecánicamente aleaciones de titanio $\alpha + \beta$ que comprenden, consisten en, o consisten esencialmente en, titanio, aluminio, vanadio, hierro, oxígeno, impurezas accidentales, y menos del 0,50 de peso por ciento de cualquier otro elemento de aleación deliberado. En diversas realizaciones, los procesos descritos en este documento se pueden usar para procesar termomecánicamente aleaciones de titanio $\alpha + \beta$ que comprenden, que consisten en, o consisten esencialmente en, titanio, aluminio, vanadio, hierro, oxígeno y menos del 0,50 por ciento en peso de cualquier otro elemento, incluido elementos de aleación deliberados e impurezas accidentales. En diversas realizaciones, el nivel máximo de elementos totales (impurezas accidentales y/o adiciones aleantes deliberadas) distintos del titanio, aluminio, vanadio, hierro y oxígeno puede ser del 0,40 por ciento en peso, del 0,30 por ciento en peso, del 0,25 por ciento en peso, del 0,20 por ciento en peso, o del 0,10 por ciento en peso.

En diversas realizaciones, las aleaciones de titanio $\alpha + \beta$ procesadas como se describe en este documento pueden comprender, consistir esencialmente en, o consistir en una composición según AMS 6946A, sección 3,1, y que especifica la composición proporcionada en la Tabla 1 (porcentajes en peso)

Tabla 1

Elemento	Mínimo	Máximo
Aluminio	3,50	4,50
Vanadio	2,00	3,00
Hierro	1,20	1,80
Oxígeno	0,20	0,30
Carbón	--	0,08
Nitrógeno	--	0,03
Hidrógeno	--	0,015
Otros elementos (cada uno)	--	0,10
Otros elementos (total)	--	0,30
Titanio	Resto	

En diversas realizaciones, las aleaciones de titanio $\alpha + \beta$ procesadas como se describe en este documento pueden incluir diversos elementos distintos del titanio, aluminio, vanadio, hierro y oxígeno. Por ejemplo, dichos otros elementos, y sus porcentajes en peso, pueden incluir, pero no están necesariamente limitados a, uno o más de los siguientes: (a) cromo, 0,10 % como máximo, generalmente del 0,0001 % al 0,05 %, o hasta aproximadamente el 0,03 %; (b) níquel, 0,10 % como máximo, generalmente del 0,001 % al 0,05 %, o hasta aproximadamente el 0,02 %; (c) molibdeno, 0,10 % como máximo; (d) zirconio, 0,10 % como máximo; (e) estaño, 0,10 % como máximo; (f) carbono, 0,10 % como máximo, generalmente del 0,005 % al 0,03 %, o hasta aproximadamente el 0,01 %; y/o (g) nitrógeno, 0,10 % como máximo, generalmente del 0,001 % al 0,02 %, o hasta aproximadamente el 0,01 %.

Los procesos descritos en este documento se pueden usar para formar artículos tales como, por ejemplo, tochos, barras, varillas, alambres, tubos, tuberías, losas, placas, elementos estructurales, fijaciones, remaches y similares. En diversas realizaciones, los procesos descritos en la presente memoria producen artículos que tienen una resistencia a la tracción final en el intervalo de 155 ksi a 200 ksi (1069-1379 MPa), un límite elástico en el intervalo de 140 ksi a 165 ksi (965-1138 MPa), y un alargamiento en el intervalo del 8 % al 20 %, a temperatura ambiente, y que tienen una dimensión mínima (por ejemplo, diámetro o espesor) de más de 0,5 pulgadas, más de 1,0 pulgadas, más de 2,0 pulgadas, más de 3,0 pulgadas, más de 4,0 pulgadas, más de 5,0 pulgadas, o más de 10,0 pulgadas (es decir, más de 1,27 cm, 2,54 cm, 5,08 cm, 7,62 cm, 10,16 cm, 12,70 cm, o 25,40 cm).

Además, una de las diversas ventajas de las realizaciones de los procesos descritos en la presente memoria es que

se pueden formar artículos de aleación de titanio $\alpha + \beta$ de alta resistencia sin una limitación de tamaño, que es una limitación inherente del procesamiento TES. Como resultado, los procesos descritos en este documento pueden producir artículos que tienen una resistencia a la tracción final superior a 165 ksi (1138 MPa), un límite elástico superior a 155 ksi (1069 MPa), y un alargamiento superior al 8 %, a temperatura ambiente, sin limitación inherente en el valor máximo de la dimensión pequeña (por ejemplo, diámetro o espesor) del artículo. Por lo tanto, la limitación de tamaño máximo solo está determinada por las limitaciones de tamaño del equipo de trabajo en frío utilizado para realizar el trabajo en frío de acuerdo con las realizaciones descritas en este documento. Por el contrario, el procesamiento TES establece un límite inherente al valor máximo de la dimensión pequeña de un artículo que puede alcanzar una alta resistencia, por ejemplo, un máximo de 0,5 pulgadas (1,27 cm) para artículos de Ti-6Al-4V que exhiben una resistencia a la tracción final de al menos 165 ksi (1138 MPa) y un límite elástico de al menos 155 ksi (1069 MPa), a temperatura ambiente. Ver AMS 6930A.

Además, los procesos descritos en este documento pueden producir artículos de aleación de titanio $\alpha + \beta$ que tienen alta resistencia con tensiones térmicas bajas o nulas y mejores tolerancias dimensionales que los artículos de alta resistencia producidos usando procesamiento TES. El estiramiento en frío y el envejecimiento directo de acuerdo con los procesos descritos en este documento no confieren tensiones térmicas internas problemáticas, no provocan deformación de los artículos, y no causan distorsión dimensional de los artículos, que se sabe que ocurre con el procesamiento TES de artículos de aleación de titanio $\alpha + \beta$.

El proceso descrito en este documento también se puede usar para formar artículos de aleación de titanio $\alpha + \beta$ que tienen propiedades mecánicas que caen dentro de un amplio intervalo dependiendo del nivel de trabajo en frío y el tiempo/temperatura del tratamiento de envejecimiento. En diversas realizaciones, la resistencia a la tracción final puede oscilar de aproximadamente 155 ksi a más de 180 ksi (aproximadamente 1069 MPa a más de 1241 MPa), el límite elástico puede oscilar entre aproximadamente 140 ksi y aproximadamente 163 ksi (965-1124 MPa), y el alargamiento puede oscilar de aproximadamente el 8 % al más del 19 %. Se pueden conseguir diferentes propiedades mecánicas a través de diferentes combinaciones de tratamiento en frío y tratamiento de envejecimiento. En diversas realizaciones, niveles más altos de trabajo en frío (por ejemplo, reducciones) pueden correlacionarse con una mayor resistencia y una menor ductilidad, mientras que temperaturas de envejecimiento más altas pueden correlacionarse con una menor resistencia y una mayor ductilidad. De esta manera, se pueden especificar los ciclos de trabajo en frío y envejecimiento de acuerdo con las realizaciones descritas en este documento para conseguir niveles controlados y reproducibles de resistencia y ductilidad en artículos de aleación de titanio $\alpha + \beta$. Esto permite la producción de artículos de aleación de titanio $\alpha + \beta$ que tienen propiedades mecánicas adaptables.

Los ejemplos ilustrativos y no limitantes que siguen están destinados a describir adicionalmente diversas realizaciones no limitantes sin restringir el alcance de las realizaciones. Los expertos en la técnica apreciarán que las variaciones de los Ejemplos son posibles dentro del alcance de la invención tal como se define en las reivindicaciones.

Ejemplos

Ejemplo 1 (comparativo)

Tochos cilíndricos de 5,0 pulgadas (12,7 cm) de diámetro de aleación de dos calores diferentes que tienen una composición química promedio presentada en la Tabla 2 (sin incluir impurezas accidentales) se laminaron en caliente en el campo de fase $\alpha + \beta$ a una temperatura de 1600 °F (871 °C) para formar barras redondas de 1,0 pulgada (2,54 cm) de diámetro.

Tabla 2

Calor	Al	V	Fe	O	N	C	Ti
X	4,36	2,48	1,28	0,272	0,005	0,010	Resto
Y	4,10	2,31	1,62	0,187	0,004	0,007	Resto

Las barras redondas de 1,0 pulgadas (2,54 cm) se recoció a una temperatura de 1275 °F (691 °C) durante una hora y se enfriaron a temperatura ambiente. Las barras recocidas se trabajaron en frío a temperatura ambiente usando operaciones de estiramiento para reducir los diámetros de las barras. La cantidad de trabajo en frío realizado en las barras durante las operaciones de estiramiento en frío se cuantificó como reducciones porcentuales en el área de la sección transversal circular para las barras redondas durante el estiramiento en frío. Los porcentajes de trabajo en frío logrados fueron del 20 %, 30 % o 40 % de reducción en el área (RA). Las operaciones de estiramiento se realizaron con un solo pase de estiramiento para reducciones del 20 % en el área y dos pases de estiramiento para reducciones del 30 % y 40 % en el área, sin recocido intermedio.

La resistencia a la tracción final (UTS), el límite elástico (YS) y el alargamiento (%) se midieron a temperatura ambiente para cada barra estirada en frío (20 %, 30 % y 40 % de RA) y para barras de 1 pulgada (2,54 cm) de diámetro que no se estiraron en frío (0 % de RA). Los resultados promediados se presentan en la Tabla 3 y las Figs. 1 y 2.

Tabla 3

Calor	Estiramiento en frío (% de RA)	UTS ksi (MPa)	YS (MPa)	Alargamiento (%)
X	0	144,7 (997,9)	132,1 (910,9)	18,1
	20	176,3 (1215,8)	156,0 (1075,8)	9,5
	30	183,5 (1265,4)	168,4 (1161,3)	8,2
	40	188,2 (1297,8)	166,2 (1146,1)	7,7
Y	0	145,5 (1003,3)	130,9 (902,7)	17,7
	20	173,0 (1193,0)	156,3 (1077,8)	9,7
	30	181,0 (1248,2)	163,9 (1130,3)	7,0
	40	182,8 (1260,6)	151,0 (1041,3)	8,3

La resistencia a la tracción final generalmente aumentó con el aumento de los niveles de trabajo en frío, mientras que el alargamiento generalmente disminuyó al aumentar los niveles de trabajo en frío hasta aproximadamente el 20-30 % de trabajo en frío. Las aleaciones en frío trabajadas hasta un 30 % y un 40 % retuvieron un 8 % de alargamiento con resistencias a la tracción finales superiores a 180 ksi (1241 MPa) y acercándose a 190 ksi (1310 MPa). Las aleaciones en frío trabajadas al 30 % y el 40 % también presentaron un límite elástico en el intervalo de 150 ksi (1034 MPa) a 170 ksi (1172 MPa).

Ejemplo 2

Tochos cilíndricos de 5 pulgadas (12,7 cm) de diámetro que tienen la composición química promedio de Calor X presentada en la Tabla 1 (temperatura β-transus de 990 °F) se procesaron termomecánicamente como se describe en el Ejemplo 1 para formar barras redondas que tienen porcentajes de trabajo en frío del 20 %, 30 % o 40 % de reducción en el área. Después del estiramiento en frío, las barras se envejecieron directamente usando uno de los ciclos de envejecimiento presentados en la Tabla 4, seguido de enfriamiento al aire a temperatura ambiente.

Tabla 4

Temperatura de envejecimiento °F (°C)	Tiempo de envejecimiento (horas)
850 (454)	1,00
850 (454)	8,00
925 (496)	4,50
975 (524)	2,75
975 (524)	4,50
975 (524)	6025
1100 (593)	1,00
1100 (593)	8,00

La resistencia a la tracción final, el límite elástico y el alargamiento se midieron a temperatura ambiente para cada barra estirada en frío y envejecida. Los datos en bruto se presentan en la Figura 3 y los datos promediados se presentan en la Figura 4 y la Tabla 5.

Tabla 5

Estiramiento en frío (% de RA)	Temperatura de envejecimiento °F (°C)	Tiempo de envejecimiento (hora)	UTS ksi (MPa)	YS (MPa)	Alargamiento (%)
20	850 (454)	1,00	170,4 (1175,1)	156,2 (1077,2)	14,0
30	850 (454)	1,00	174,6 (1204,0)	158,5 (1093,0)	13,5
40	850 (454)	1,00	180,6 (1245,4)	162,7 (1122,0)	12,9
20	850 (454)	8,00	168,7 (1163,4)	153,4 (1057,8)	13,7
30	850 (454)	8,00	175,2 (1208,2)	158,5 (1093,0)	12,6
40	850 (454)	8,00	179,5 (1237,8)	161,0 (1110,3)	11,5
20	925 (496)	4,50	163,4 (1126,8)	148,0 (1020,6)	15,2
30	925 (496)	4,50	168,8 (1164,0)	152,3 (1050,3)	14,0
40	925 (496)	4,50	174,5 (1203,4)	156,5 (1079,2)	13,7

ES 2 670 297 T3

20	975 (524)	2,75	161,7 (1115,1)	146,4 (1009,6)	14,8
30	975 (524)	2,75	167,4 (1154,4)	155,8 (1074,4)	15,5
40	975 (524)	2,75	173,0 (1193,0)	155,1 (1069,6)	13,0
20	975 (524)	4,50	160,9 (1109,6)	145,5 (1003,4)	14,4
30	975 (524)	4,50	169,3 (1167,5)	149,9 (1033,7)	13,2
40	975 (524)	4,50	174,4 (1202,7)	153,9 (1061,3)	12,9
20	975 (524)	6,25	163,5 (1127,5)	144,9 (999,2)	14,7
30	975 (524)	6,25	172,7 (1190,9)	150,3 (1036,5)	12,9
40	975 (524)	6,25	171,0 (1179,2)	153,4 (1057,8)	12,9
20	1100 (593)	1,00	155,7 (1073,7)	140,6 (969,6)	18,3
30	1100 (593)	1,00	163,0 (1124,0)	146,5 (1010,3)	15,2
40	1100 (593)	1,00	165,0 (1137,8)	147,8 (1019,2)	15,2
20	1100 (593)	8,00	156,8 (1081,3)	141,8 (977,9)	18,0
30	1100 (593)	8,00	162,1 (1117,8)	146,1 (1007,5)	17,2
40	1100 (593)	8,00	162,1 (1117,8)	145,7 (1004,7)	17,8

Las aleaciones estiradas en frío y envejecidas mostraron una gama de propiedades mecánicas según el nivel de trabajo en frío y tiempo/ciclo de temperatura del tratamiento de envejecimiento. La resistencia a la tracción final varió desde aproximadamente 155 ksi (1069 MPa) a más de 180 ksi (1241 MPa). El límite elástico varió de aproximadamente 140 ksi (965 MPa) a aproximadamente 163 ksi (1124 MPa). El alargamiento varió desde aproximadamente el 11 % hasta más del 19 %. En consecuencia, se pueden conseguir diferentes propiedades mecánicas a través de diferentes combinaciones de tratamiento de nivel de trabajo en frío y envejecimiento.

Los niveles más altos de trabajo en frío generalmente se correlacionan con una mayor resistencia y una menor ductilidad. Las temperaturas de envejecimiento más altas generalmente se correlacionan con una menor resistencia. Esto se muestra en las Figuras 5, 6 y 7, que son gráficos de resistencia (UTS promedio y YS promedio) frente a la temperatura para porcentajes de trabajo en frío del 20 %, 30 % y 40 % de reducción en el área, respectivamente. Las temperaturas más altas de envejecimiento generalmente se correlacionan con una mayor ductilidad. Esto se muestra en las Figuras 8, 9 y 10, que son gráficos de alargamiento promedio frente a la temperatura para porcentajes de trabajo en frío del 20 %, 30 % y 40 % de reducción en el área, respectivamente. La duración del tratamiento de envejecimiento no parece tener un efecto significativo sobre las propiedades mecánicas como se ilustra en las Figuras 11 y 12, que son gráficos de resistencia y alargamiento, respectivamente, frente al tiempo para el porcentaje de trabajo en frío del 20 % de reducción en el área.

20 Ejemplo 3

Se estiraron en frío barras redondas que tienen la composición química de Calor X presentada en la Tabla 1, diámetros de 0,75 pulgadas (1,91 cm) y procesadas como se describe en los Ejemplos 1 y 2 al 40 % de reducción en el área durante una operación de estiramiento probado de acuerdo con NASM 1312-13 (Asociación de Industrias Aeroespaciales, 1 de febrero de 2003). Las pruebas de doble cizallamiento proporcionan una evaluación de la aplicabilidad de esta combinación de procesamiento de la aleación química y termomecánico para la producción de material de fijación de alta resistencia. Se probó un primer conjunto de barras redondas en condiciones según se estiraron (para su comparación) y se probó un segundo conjunto de barras redondas después de envejecer a 850 °F (454 °C) durante 1 hora y se enfrió al aire a temperatura ambiente (850/1/AC (454/1/AC)). Los resultados de la resistencia al doble cizallamiento se presentan en la Tabla 5 junto con los valores promedio de resistencia a la tracción final, límite elástico y alargamiento. Con fines comparativos, en la Tabla 6 también se presentan los valores mínimos especificados para estas propiedades mecánicas para el material de fijación Ti-6Al-4V.

Tabla 6

Condición	Tamaño en pulgadas (cm)	Estiramiento en frío (% de RA)	UTS ksi (MPa)	YS (MPa)	Alargamiento (%)	Resistencia al doble cizallamiento ksi (MPa)
según se estiraron	0,75 (1,91)	40	188,2 (1297,8)	166,2 (1146,1)	7,7	100,6 (693,7)
						102 (703,4)
850/1/AC	0,75 (1,91)	40	180,6 (1245,4)	162,7 (1122,0)	12,9	103,2 (711,7)
						102,4 (706,2)
Objetivo Ti-6-4	0,75 (1,91)	N/D	165 (1138)	155 (1069)	10	102 (703,4)

Las aleaciones estiradas en frío y envejecidas exhibieron propiedades mecánicas superiores a los valores mínimos especificados para aplicaciones de material de fijación de Ti-6Al-4V. Como tal, los procesos descritos en este documento pueden ofrecer una alternativa más eficiente a la producción de artículos de Ti-6Al-4V usando procesamiento TES.

Las aleaciones de titanio $\alpha + \beta$ estiradas en frío y envejecidas que comprenden, en porcentajes en peso, del 3,50 al 5,00 de aluminio, del 2,00 al 3,00 de vanadio, del 1,00 al 2,00 de hierro, del 0,20 al 0,30 de oxígeno y titanio, según las diversas realizaciones descritas en este documento, producen artículos de aleación que tienen propiedades mecánicas que exceden las propiedades mecánicas mínimas especificadas de las aleaciones de Ti-6Al-4V para diversas aplicaciones, que incluyen, por ejemplo, aplicaciones aeroespaciales generales y aplicaciones de fijaciones. Como se ha indicado anteriormente, las aleaciones de Ti-6Al-4V requieren que el procesamiento TES alcance la resistencia necesaria requerida para aplicaciones críticas, tales como, por ejemplo, aplicaciones aeroespaciales. Como tales, las aleaciones de Ti-6Al-4V de alta resistencia están limitadas por el tamaño de los artículos debido a las propiedades físicas inherentes del material y al requisito de enfriamiento rápido durante el procesamiento TES. Por el contrario, las aleaciones de titanio $\alpha + \beta$ trabajadas en frío y envejecidas de alta resistencia, como se describe en este documento, no están limitadas en términos de tamaño y dimensiones del artículo. Además, las aleaciones de titanio $\alpha + \beta$ trabajadas en frío y envejecidas de alta resistencia, como se describe en este documento, no experimentan grandes tensiones térmicas e internas o deformación, que pueden ser características de los artículos de aleación de Ti-6Al-4V de sección más gruesa durante el procesamiento TES.

Esta divulgación se ha escrito con referencia a diversas realizaciones a modo de ejemplo, ilustrativas y no limitantes. Sin embargo, los expertos en la técnica reconocerán que pueden realizarse diversas sustituciones, modificaciones o combinaciones de cualquiera de las realizaciones descritas (o partes de las mismas) sin apartarse del alcance de las reivindicaciones. Por lo tanto, se contempla y se entiende que la presente divulgación abarca realizaciones adicionales no expuestas expresamente en este documento. Dichas realizaciones se pueden obtener, por ejemplo, combinando, modificando o reorganizando cualquiera de los pasos, componentes, elementos, rasgos, aspectos, características, limitaciones y similares descritos de las realizaciones descritas en este documento. A este respecto, el Solicitante se reserva el derecho a enmendar las reivindicaciones durante la acción judicial para añadir características como se describe de diversas formas en este documento.

REIVINDICACIONES

1. Un proceso para formar un artículo de una aleación de titanio $\alpha + \beta$ que comprende en porcentajes en peso, del 3,50 al 5,00 aluminio,
 5 del 2,00 al 3,00 de vanadio,
 del 1,00 al 2,00 de hierro,
 del 0,20 al 0,30 de oxígeno,
 hasta un total del 0,5 de otros elementos, en donde hasta un total del 0,5 de otros elementos puede incluir uno o
 10 más de:
 no más del 0,1 cada uno de cromo, níquel, molibdeno, zirconio, estaño, carbono y nitrógeno, y no más del
 0,015 de hidrógeno, y
 el resto titanio e impurezas accidentales,
- 15 comprendiendo el proceso:
 trabajar en frío la aleación de titanio $\alpha + \beta$ a una temperatura en el intervalo de temperatura ambiente a 260 °C
 (500 °F) a una reducción del área del 20 % al 60 %; y
 20 envejecer la aleación de titanio $\alpha + \beta$ a una temperatura en el intervalo de 371 °C a 649 °C (700 °F a 1200 °F)
 después del trabajo en frío;
 en donde el proceso no comprende un tratamiento de solución entre el trabajo en frío y el envejecimiento.
2. El proceso de la reivindicación 1, en el que el envejecimiento se realiza directamente después del trabajo en frío.
- 25 3. El proceso de la reivindicación 1, que comprende trabajar en frío la aleación de titanio $\alpha + \beta$ a una reducción del
 área del 20 % al 40 %.
4. El proceso de la reivindicación 1, en el que el trabajo en frío de la aleación de titanio $\alpha + \beta$ comprende al menos
 30 dos ciclos de deformación, en donde cada ciclo comprende trabajar en frío la aleación de titanio $\alpha + \beta$ hasta una
 reducción de área de al menos un 10 %.
5. El proceso de la reivindicación 1, en el que el trabajo en frío de la aleación de titanio $\alpha + \beta$ comprende al menos
 dos ciclos de deformación, en donde cada ciclo comprende trabajar en frío la aleación de titanio $\alpha + \beta$ a una
 35 reducción de área de al menos el 20 %.
6. El proceso de la reivindicación 1, que comprende trabajar en frío la aleación de titanio $\alpha + \beta$ a una temperatura en
 el intervalo de temperatura ambiente a 204°C (400°F).
7. El proceso de la reivindicación 1, que comprende trabajar en frío la aleación de titanio $\alpha + \beta$ a temperatura
 40 ambiente.
8. El proceso de la reivindicación 1, que comprende envejecer la aleación de titanio $\alpha + \beta$ a una temperatura en el
 intervalo de 427 °C a 593 °C (800 °F a 1150 °F) después del trabajo en frío.
- 45 9. El proceso de la reivindicación 1, que comprende envejecer la aleación de titanio $\alpha + \beta$ a una temperatura en el
 intervalo de 454 °C a 593 °C (850 °F a 1100 °F) después del trabajo en frío.
10. El proceso de la reivindicación 1, que comprende envejecer la aleación de titanio $\alpha + \beta$ durante hasta 50 horas.
- 50 11. El proceso de la reivindicación 10, que comprende envejecer la aleación de titanio $\alpha + \beta$ durante 0,5 a 10 horas.
12. El proceso de la reivindicación 1, que comprende además trabajar en caliente la aleación de titanio $\alpha + \beta$ a una
 temperatura en el intervalo de 137 °C a 14 °C (300 °F a 25 °F) por debajo de la temperatura β -transus de la aleación
 de titanio $\alpha + \beta$, en donde el trabajo en caliente se realiza antes del trabajo en frío.
- 55 13. El proceso de la reivindicación 12, que comprende además recocer la aleación de titanio $\alpha + \beta$ a una temperatura
 en el intervalo de 649 °C a 816 °C (1200 °F a 1500 °F), en donde el recocido se realiza entre el trabajo en caliente y
 el trabajo en frío.
- 60 14. El proceso de la reivindicación 12, que comprende trabajar en caliente la aleación de titanio $\alpha + \beta$ a una
 temperatura en el intervalo de 816 °C a 968 °C (1500 °F a 1775 °F).
- 65 15. El proceso de la reivindicación 1, en el que la aleación de titanio $\alpha + \beta$ comprende, en porcentajes en peso, del
 3,50 al 4,50 aluminio, del 2,00 al 3,00 de vanadio, del 1,20 al 1,80 de hierro, del 0,20 al 0,30 de oxígeno, hasta el
 0,08 de carbono, hasta el 0,03 de nitrógeno, hasta el 0,015 de hidrógeno, hasta un total del 0,3 de otros elementos y
 el resto titanio y las impurezas accidentales.

16. El proceso de la reivindicación 1, en el que el trabajo en frío de la aleación de titanio $\alpha + \beta$ comprende el trabajo en frío mediante al menos una operación seleccionada del grupo que consiste en laminación, forjado, extrusión, laminación en frío, oscilación y estiramiento.
- 5 17. El proceso de la reivindicación 1, en el que la aleación de titanio $\alpha + \beta$ trabajada en frío comprende el estiramiento en frío de la aleación de titanio $\alpha + \beta$.

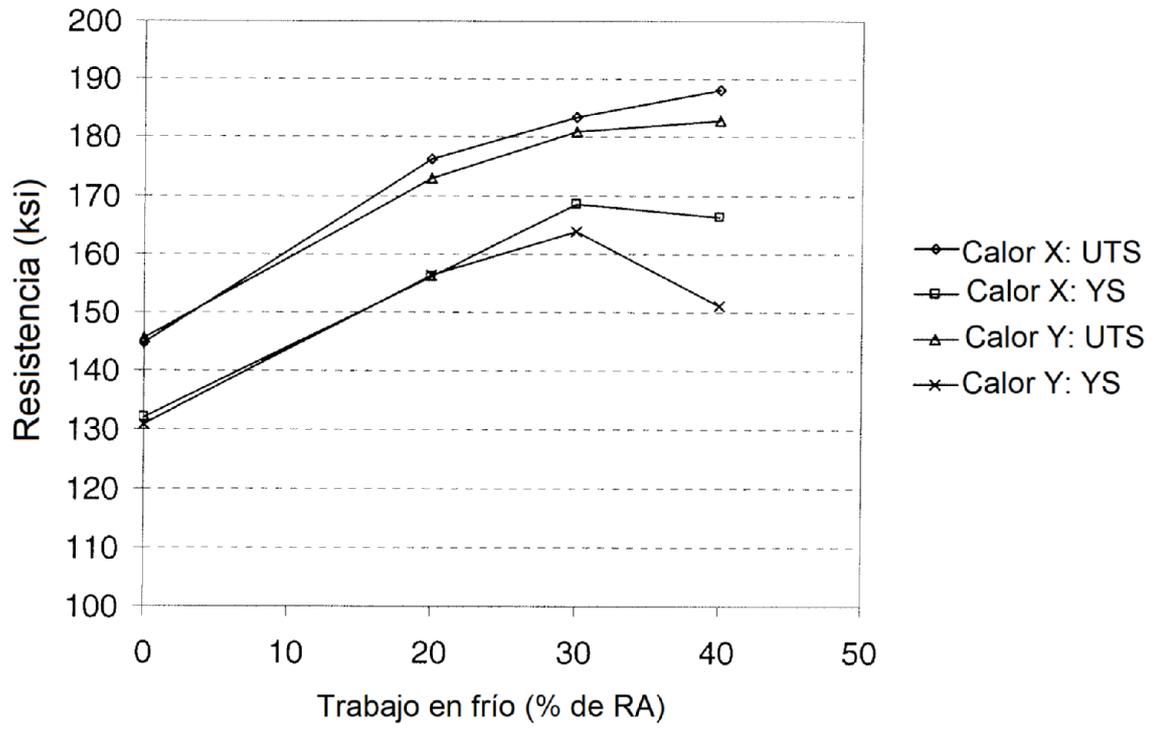


Figura 1

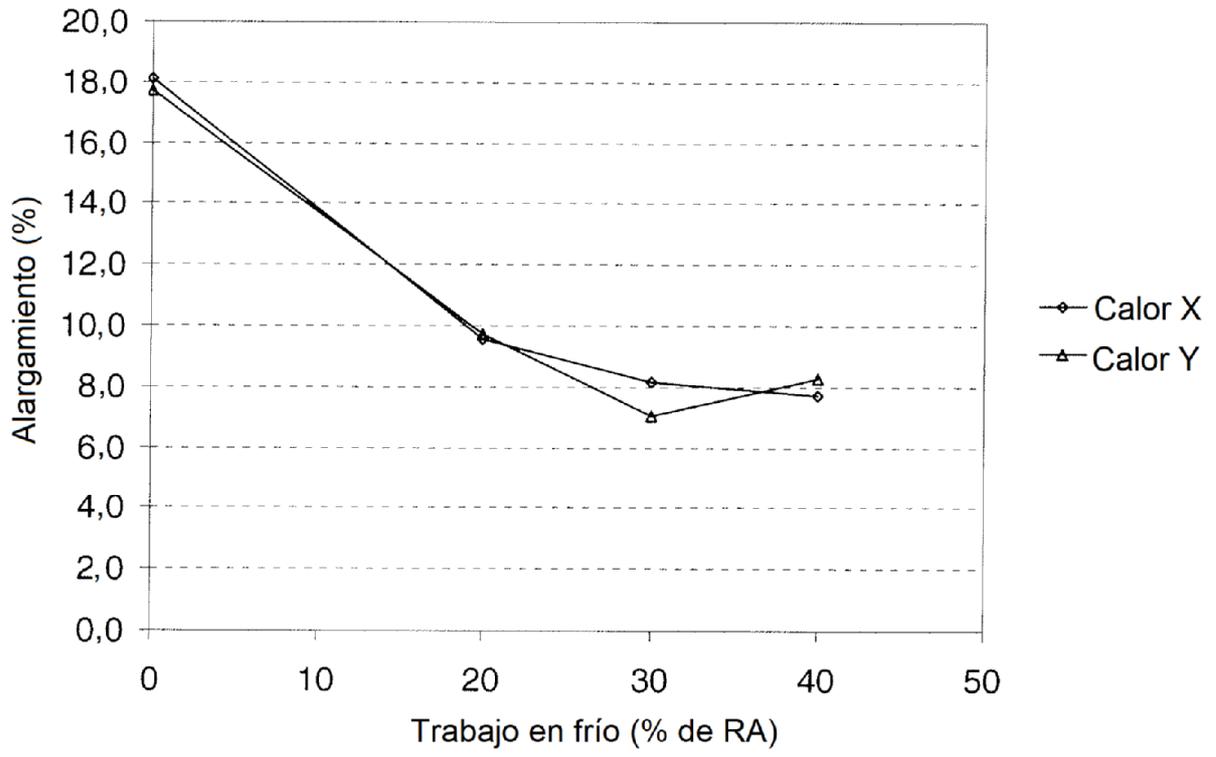


Figura 2

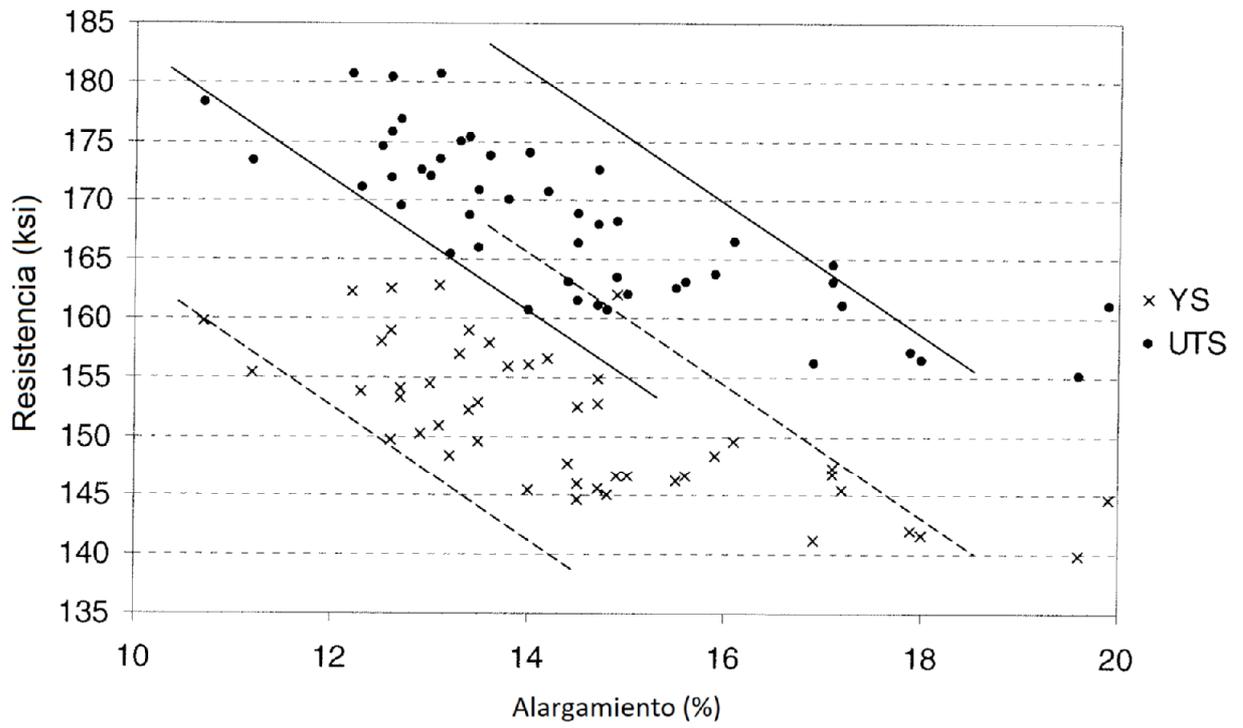


Figura 3

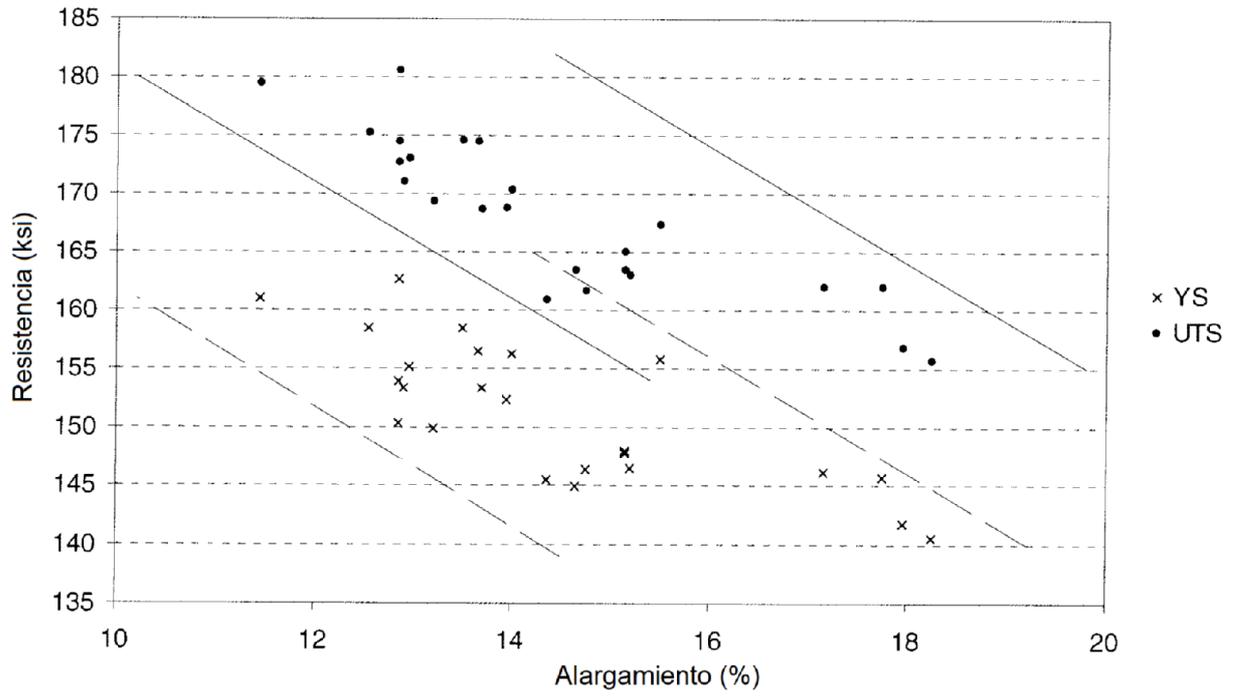


Figura 4

Trabajo en frío (20 % de RA)

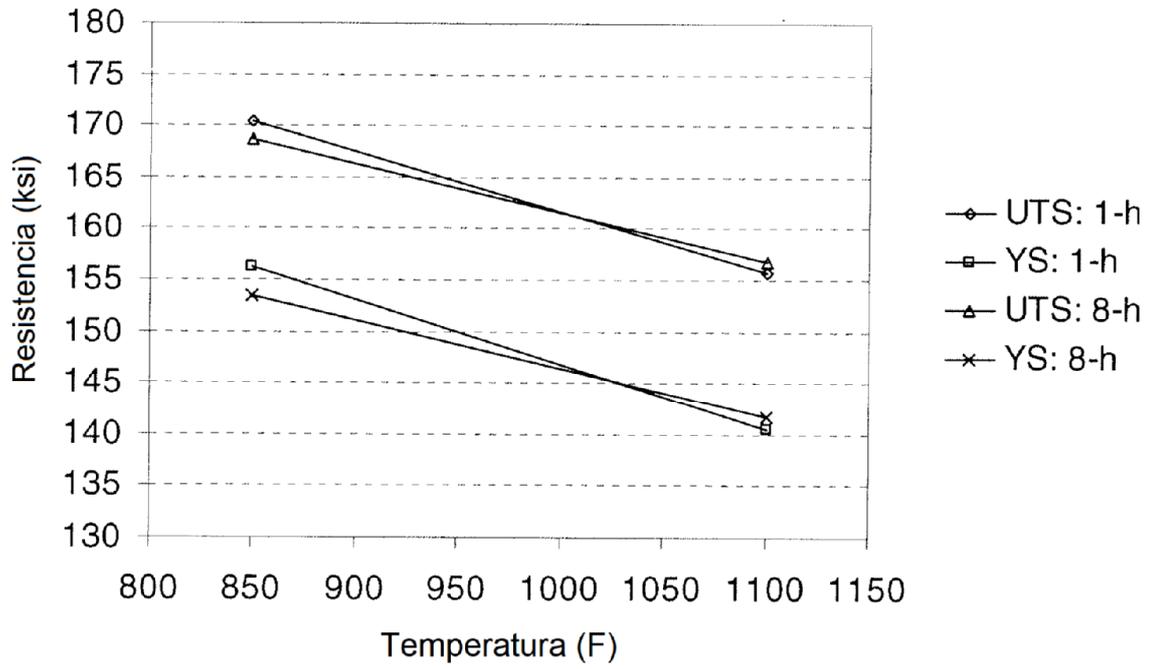


Figura 5

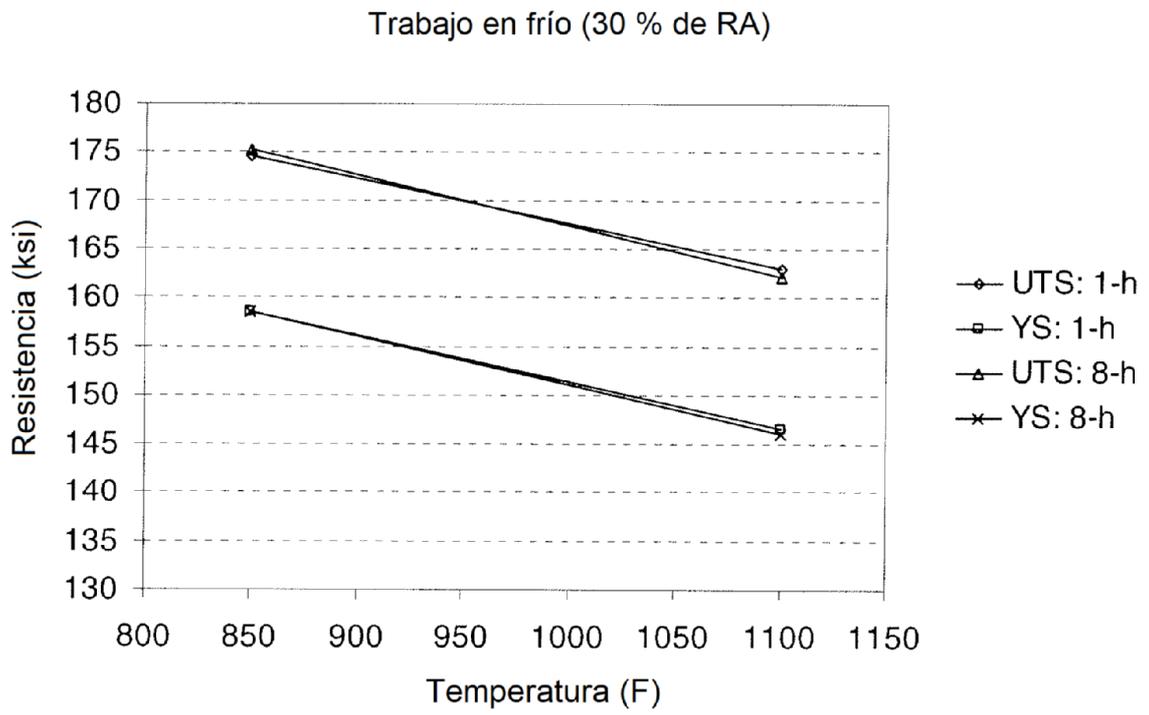


Figura 6

Trabajo en frío (40 % de RA)

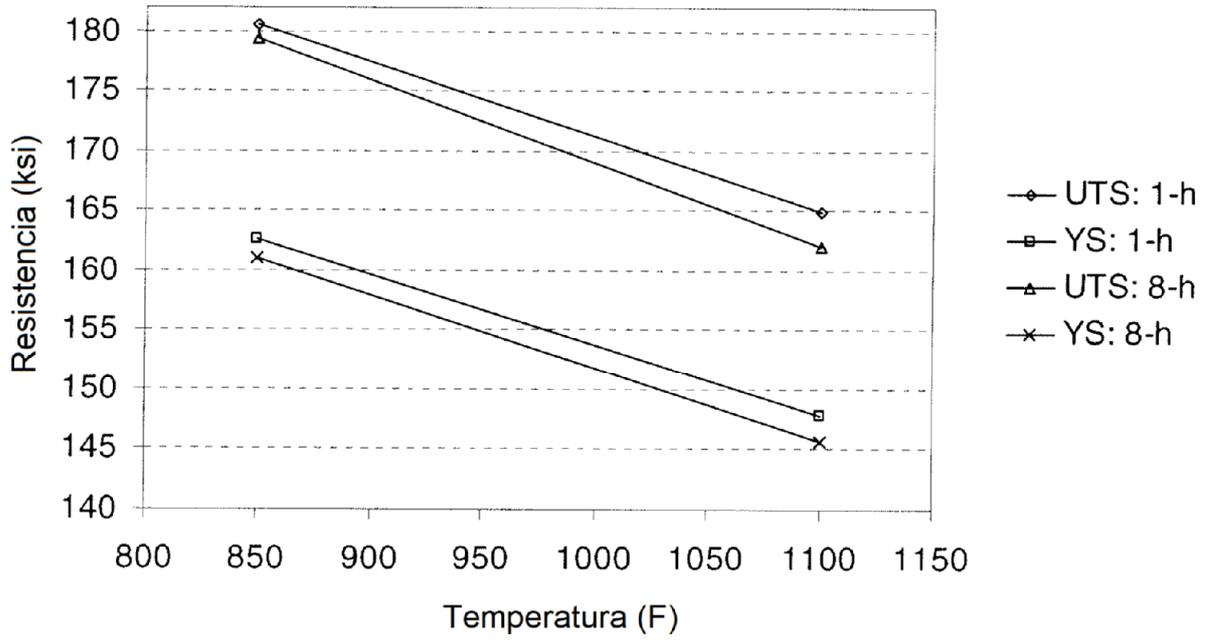


Figura 7

Trabajo en frío (20 % de RA)

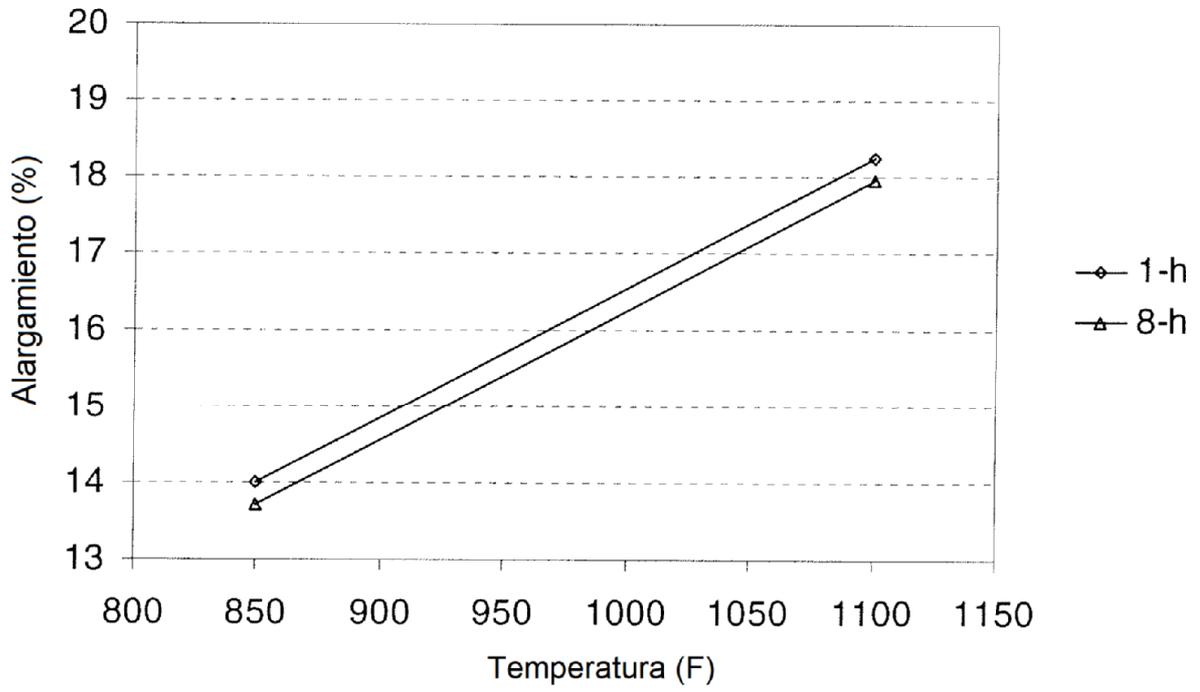


Figura 8

Trabajo en frío (30 % de RA)

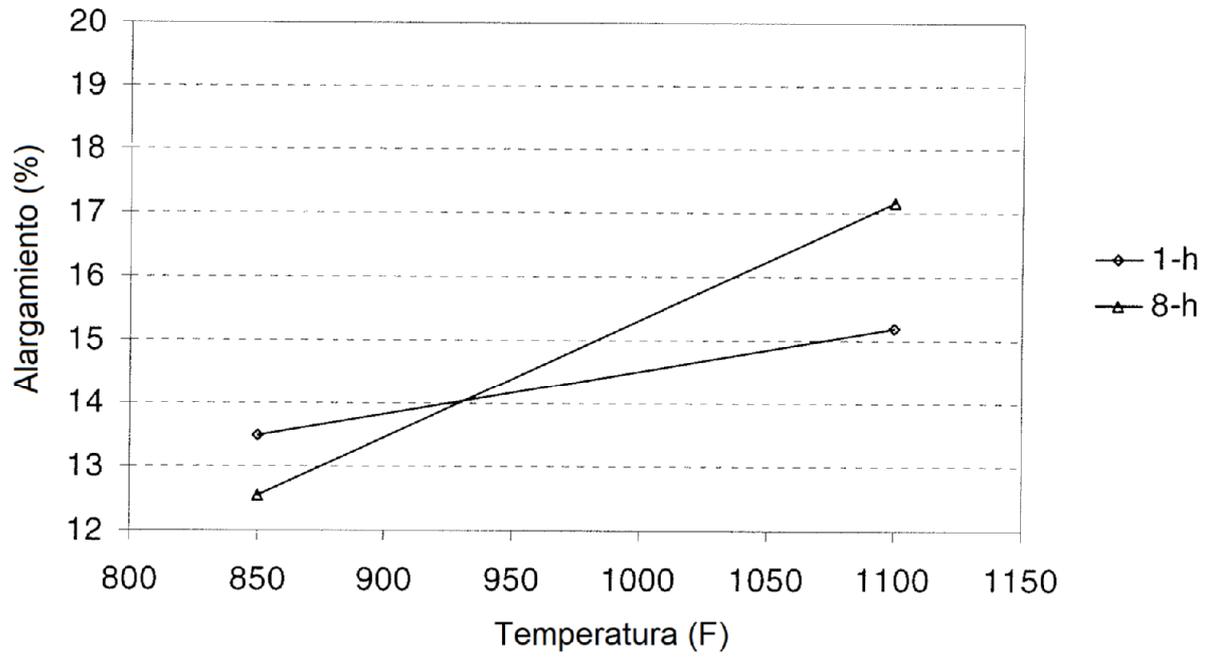


Figura 9

Trabajo en frío (40 % de RA)

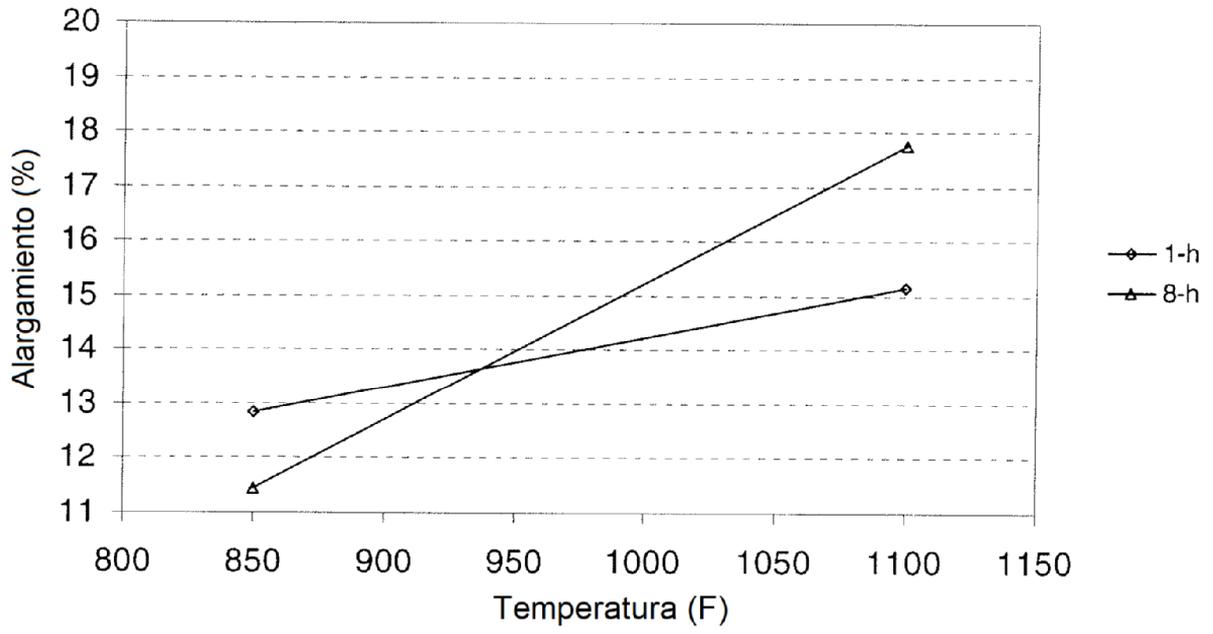


Figura 10

Trabajo en frío (20 % de RA)

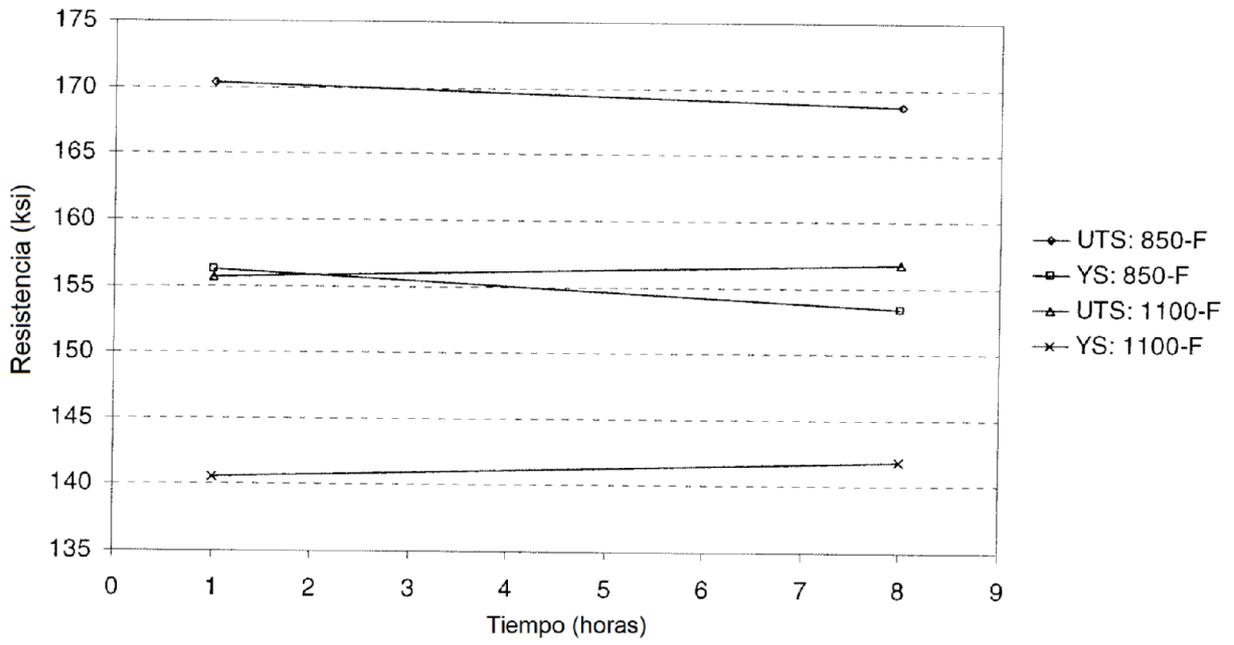


Figura 11

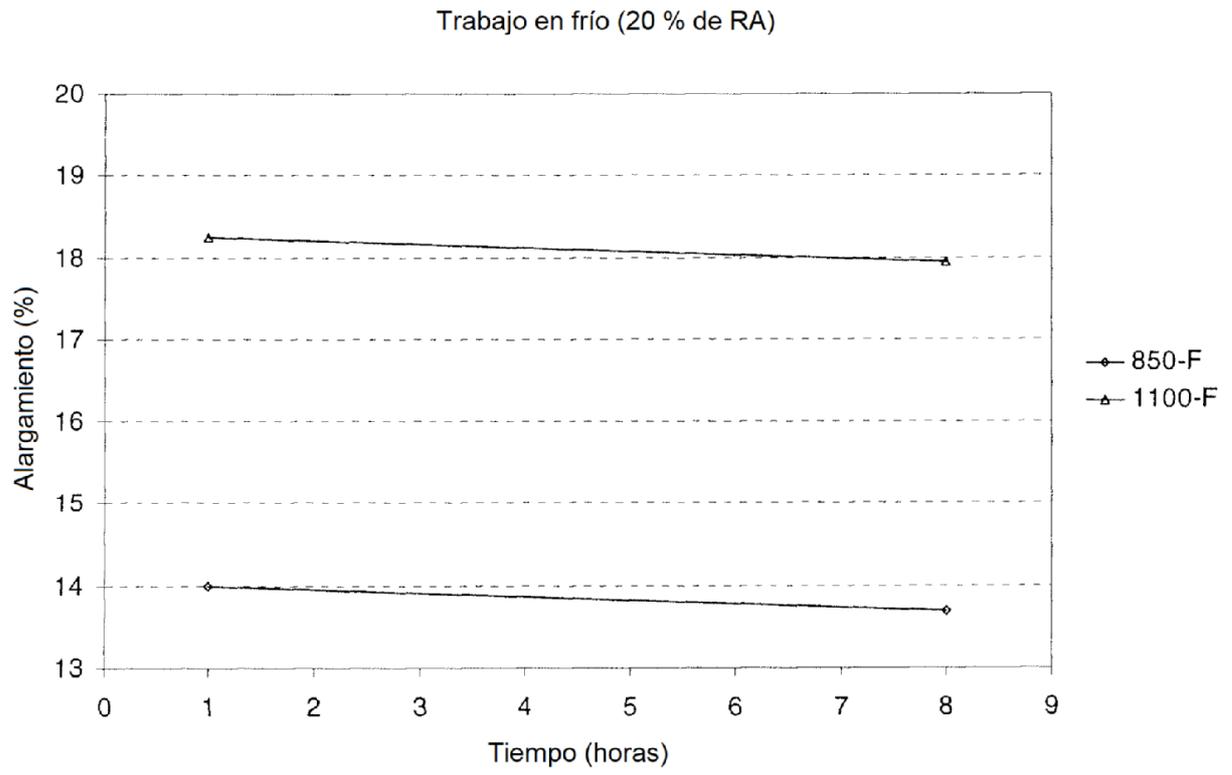


Figura 12