

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 927 839**

51 Int. Cl.:

C22C 14/00 (2006.01)

B33Y 10/00 (2015.01)

B33Y 70/00 (2010.01)

C22F 1/18 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **24.09.2019 PCT/GB2019/052688**

87 Fecha y número de publicación internacional: **02.04.2020 WO20065296**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **24.09.2019 E 19787350 (8)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **14.09.2022 EP 3856943**

54 Título: **Una aleación de titanio beta para fabricación aditiva**

30 Prioridad:

24.09.2018 GB 201815532

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

11.11.2022

73 Titular/es:

**ALLOYED LIMITED (100.0%)
Unit 15 Oxford Industrial Park, Yarnton
KidlingtonOX5 1QU, GB**

72 Inventor/es:

ALABORT MARTINEZ, ENRIQUE

74 Agente/Representante:

PONS ARIÑO, Ángel

ES 2 927 839 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

Una aleación de titanio beta para fabricación aditiva

5 La presente invención se refiere a composiciones de aleación basadas en titanio diseñadas para la fabricación aditiva mejorada durante los procesos de fusión selectiva por láser (SLM) de polvo que tienen propiedades comparables o mejoradas respecto a las aleaciones existentes. Asimismo, la aleación presenta deseablemente una ventana de formabilidad - en términos de susceptibilidad al agrietamiento, intervalo de solidificación y estabilidad de la microestructura, que es comparable o más amplia que las calidades de aleación equivalentes. Las prestaciones mecánicas en condiciones operativas también han sido ponderadas en el proceso de diseño de la nueva aleación. La solicitud internacional publicada WO 2018 157071 divulga una serie de aleaciones de titanio que se han identificado como adecuadas para su uso en aplicaciones de fabricación aditiva.

En la Tabla 1 se enumeran ejemplos de composiciones típicas de aleaciones de beta Ti.

Tabla 1: Composición nominal en % en peso de las aleaciones de titanio beta utilizadas comercialmente.

<i>Aleación</i>	<i>Al</i>	<i>V</i>	<i>Fe</i>	<i>Mo</i>	<i>Cr</i>	<i>Zr</i>	<i>Nb</i>	<i>Si</i>	<i>Sn</i>	<i>Ti</i>
<i>Ti-10V-2Fe-3Al</i>	3	10	2	-	-	-	-	-	-	Resto
<i>Ti-15Mo-2,7Nb-3Al-0,2Si</i>	3	-	-	15	-	-	2,7	0,2	-	Resto
<i>Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr</i>	3	8	-	4	6	4	-	-	-	Resto
<i>Ti-15V-3Al-3Sn-3Cr</i>	3	15	-	-	3	-	-	-	3	Resto
<i>Ti-13V-11Cr-3Al</i>	3	13	-	-	11	-	-	-	-	Resto
<i>Ti-8Mo-8V-2Fe-3Al</i>	3	8	2	8	-	-	-	-	-	Resto
<i>Ti-11Mo-6Zr-4,5Sn</i>	-	-	-	11	-	6	-	-	4,5	Resto
<i>Ti-10V-2Fe-3Al</i>	3	10	2	-	-	-	-	-	-	Resto
<i>Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr</i>	5	5	-	5	3	-	-	-	-	Resto
<i>Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr-0,5Fe</i>	5	5	0,5	5	3	-	-	-	-	Resto
<i>Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr-1Zr</i>	5	5	-	5	3	1	-	-	-	Resto
<i>Ti-15Mo-3Al-3Nb</i>	3	-	-	15	-	-	3	-	-	Resto
<i>Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr</i>	3	8	-	4	6	4	-	-	-	Resto
<i>Ti-5Al-5V-5Mo-1Cr-1Fe</i>	5	5	1	5	1	-	-	-	-	Resto

Es un objetivo de la invención proporcionar una aleación adecuada para la fabricación aditiva, que preferiblemente tenga una capacidad de fabricación aditiva mejorada en comparación con las aleaciones de titanio beta tradicionales enumeradas en la Tabla 1.

Preferiblemente, la aleación tendrá un comportamiento mecánico mejorado (al incluir elementos que endurecen las fases beta y alfa y ajustando la temperatura de inicio martensítico) y/o una capacidad de fabricación mejorada (en comparación con el comportamiento de solidificación transitoria y la arquitectura de fase durante los ciclos de temperatura).

La presente invención proporciona una composición de aleación basada en titanio que consiste en, en porcentaje en peso: de 3,0 a 7,0 % de aluminio, de 3,0 a 10,0 % de vanadio, de 3,0 a 10,0 % de molibdeno, de 2,0 a 7,0 % de estaño, de 0,0 a 6,0 % de circonio, de 0,0 a 5,0 % de niobio, de 0,0 a 0,5 % de hierro, de 0,0 a 4,0 % de cromo, de 0,0 a 2,0 de wolframio, de 0,0 a 0,5 % de níquel, de 0,0 a 0,5 % de tantalio, o entre 0,0 y 2,5 de tantalio cuando la suma de niobio y tantalio es 5,0 % o menos, de 0,0 a 0,5 % de cobalto, de 0,0 a 0,75 % de silicio, de 0,0 a 0,5 % de boro, de 0,0 a 0,5 % de carbono, de 0,0 a 0,5 % de oxígeno, de 0,0 a 0,5 % de hidrógeno, de 0,0 a 0,5 % de nitrógeno, de 0,0 a 0,5 % de paladio, de 0,0 a 0,5 % de lantano, de 0,0 a 0,5 % de manganeso o de 0,0 a 2,5 % de manganeso cuando la suma de cromo y manganeso es 4,0 % en peso o menos, de 0,0 a 1,0 % de hafnio, siendo el resto titanio e impurezas minoritarias que satisfacen la siguiente relación:

$$0,027V + 0,178Fe + 0,055(Mo+0,5W) + 0,016Zr + 0,044Cr + 0,033(Nb+Ta) + 0,053Sn > 1,0$$

donde Mo, W, V, Zr, Sn, Cr, Fe, Ta y Nb representan cantidades de molibdeno, wolframio, vanadio, circonio, estaño, cromo, hierro, tantalio y niobio en % en peso, respectivamente. Esta composición proporciona una aleación beta de Ti que ha mejorado la capacidad de fabricación en términos de baja susceptibilidad al agrietamiento en caliente y el intervalo óptimo de solidificación. La aleación también tiene una mayor tendencia a formar microestructuras deseables: granos finos equiaxiales a diferencia del crecimiento altamente columnar. Asimismo, la aleación tiene buenas propiedades de resistencia y la capacidad de retención de beta metaestable a temperatura ambiente.

En una realización de la invención, la aleación de titanio consiste en 9,0 % o menos de molibdeno, preferiblemente 8,5 % o menos de molibdeno. Esta aleación tiene propiedades mejoradas para la capacidad de fabricación aditiva

debido a un intervalo de solidificación más bajo y una temperatura de inicio martensítico reducida mientras mantiene la densidad dentro de límites razonables.

- 5 En una realización de la invención, la aleación de titanio consiste en 6,0 % o más de molibdeno, preferiblemente 6,5 % o más de molibdeno. El molibdeno es beneficioso debido a su mayor factor de restricción del crecimiento (y la microestructura más fina resultante). Esta cantidad de molibdeno también reduce la temperatura de inicio martensítico de la composición mientras se usa un pequeño % en peso de aleantes al tiempo que añade resistencia beta y reduce la difusividad.
- 10 En una realización de la invención, la aleación de titanio consiste en 9,5 % o menos de vanadio. Esta aleación tiene propiedades mejoradas para la capacidad de fabricación aditiva debido a un intervalo de solidificación más bajo y una temperatura de inicio martensítico reducida, manteniendo el coste dentro de límites razonables. Estas propiedades se optimizan aún más al limitar el contenido de vanadio al 9,0 % o incluso al 8,0 %
- 15 En una realización de la invención, la aleación de titanio consiste en 5,5 % o más, preferiblemente 6,0 % o más de vanadio, más preferiblemente 6,5 % o más de vanadio. El vanadio es beneficioso debido a su mayor factor de restricción del crecimiento (y la microestructura más fina resultante). Esta cantidad de vanadio también reduce la temperatura de inicio martensítico de la composición mientras se usa un pequeño % en peso de aleantes al tiempo que añade resistencia beta y reduce la difusividad.
- 20 En una realización de la invención, la aleación de titanio consiste en 3,5 % o más de estaño, preferiblemente 5,0 % o más de estaño. Esto logra un factor de susceptibilidad al agrietamiento más bajo y un gran factor de restricción del crecimiento, por lo que tiene excelentes propiedades de fabricación aditiva.
- 25 En una realización de la invención, la aleación de titanio consiste en 6,5 % o menos de estaño, preferiblemente 6,0 % o menos de estaño. La reducción de la cantidad de estaño mantiene el valor de equivalentes de aluminio en el nivel correcto al tiempo que aumenta en gran medida la capacidad de fabricación y la resistencia.
- 30 En una realización de la invención, la aleación de titanio consiste en 1,0 % o más de niobio, preferiblemente 1,5 % o más de niobio. Esto logra un factor de susceptibilidad al agrietamiento más bajo y un gran factor de restricción del crecimiento, por lo que tiene excelentes propiedades de fabricación aditiva. El niobio también aumenta la resistencia de la fase beta.
- 35 En una realización de la invención, la aleación de titanio consiste en 4,5 % o menos de niobio, preferiblemente 4,0 % o menos de niobio, más preferiblemente 3,0 % o menos de niobio.
- Reducir la cantidad de niobio reduce el coste de la aleación, la difusividad y la densidad al tiempo que aumenta la resistencia y la facilidad de fabricación del polvo.
- 40 En una realización de la invención, la aleación de titanio consiste en 0,25 % o menos de hierro. Esto limita el intervalo de solidificación de la aleación y evita un alto factor de susceptibilidad al agrietamiento.
- 45 En una realización de la invención, la aleación de titanio consiste en 0,1 % o más de hierro. Una aleación de este tipo tiene un alto factor de restricción del crecimiento mientras mantiene bajo el intervalo de solidificación y la susceptibilidad al agrietamiento. Asimismo, pequeñas cantidades de hierro permiten la reciclabilidad de otras aleaciones de titanio.
- 50 En una realización de la invención, la aleación de titanio consiste en 4,0 % o menos de cromo, preferiblemente 3,5 % o menos de cromo, más preferiblemente 3,0 % o menos de cromo. Esto limita el intervalo de solidificación de la aleación, evita un alto factor de susceptibilidad al agrietamiento, reduce la difusividad y mantiene bajo el coste. Se logran otras ventajas limitando el cromo a 2,0 % o menos.
- 55 En una realización de la invención, la aleación de titanio consiste en 0,5 % o más de cromo, preferiblemente 1,0 % o más, más preferiblemente 1,5 % o más o incluso 2,0 % o más. Una aleación de este tipo tiene un alto factor de restricción del crecimiento mientras mantiene bajo el intervalo de solidificación y la susceptibilidad al agrietamiento. Asimismo, el cromo aumenta en gran medida la resistencia beta. El Cr se puede sustituir por Mn hasta en un 2,5 % en peso.
- 60 En una realización de la invención, la aleación de titanio consiste en 4,5 % o menos, preferiblemente 4,0 % o menos de circonio. Esto reduce el coste y la densidad de la aleación y mantiene la susceptibilidad al agrietamiento dentro de los límites.
- 65 En una realización de la invención, la aleación de titanio consiste en 1,0 % o más de circonio, preferiblemente 1,5 % o más de circonio, más preferiblemente 2,0 % o más de circonio. Esto mejora la resistencia y la capacidad de fabricación (mediante la solución sólida y el afino del grano) sin afectar en gran medida al coste y la densidad.

En una realización de la invención, la aleación de titanio satisface la ecuación de flujo

$$300 \geq 883 - 150 \% \text{ en peso Fe} - 96 \% \text{ en peso Cr} - 49 \% \text{ en peso Mo} - 37 \% \text{ en peso V} - 17 \% \text{ en peso Nb} - 12 \% \text{ en peso Ta} - 7 \% \text{ en peso Zr} - 3 \% \text{ en peso Sn} + 15 \% \text{ en peso Al.}$$

5 en la que Fe, Cr, Mo, V, Nb, Ta, Zr, Sn y Al representan las cantidades de hierro, cromo, molibdeno, vanadio, niobio, tantalio, circonio, estaño y aluminio en % en peso, respectivamente. Es poco probable que dicha aleación comprometa el proceso de fabricación debido a la formación de una fase de martensita quebradiza durante el ciclo térmico que se produce durante la fabricación.

10 En una realización de la invención, la aleación de titanio satisface la ecuación de flujo

$$75 \leq 883 - 150 \% \text{ en peso Fe} - 96 \% \text{ en peso Cr} - 49 \% \text{ en peso Mo} - 37 \% \text{ en peso V} - 17 \% \text{ en peso Nb} - 12 \% \text{ en peso Ta} - 7 \% \text{ en peso Zr} - 3 \% \text{ en peso Sn} + 15 \% \text{ en peso Al} \leq 300$$

15 en la que Fe, Cr, Mo, V, Nb, Ta, Zr, Sn y Al representan las cantidades de hierro, cromo, molibdeno, vanadio, niobio, tantalio, circonio, estaño y aluminio en % en peso, respectivamente. Es poco probable que una aleación de este tipo comprometa el proceso de fabricación porque la transformación de la martensita se produce a bajas temperaturas. Asimismo, dado que tal aleación tiene fase martensítica a temperatura ambiente, ofrece una resistencia mejorada.

20 En una realización de la invención, la aleación de titanio consiste en 70,0 % en peso o más de titanio, preferiblemente 72,5 % en peso o más de titanio. Un polvo de tal aleación es más fácil de producir con buena homogeneidad química y segregación reducida.

25 En una realización de la invención, la aleación de titanio satisface la siguiente ecuación de equivalentes de Al

$$7,0 \leq \% \text{ en peso Al} + \frac{1}{3} \% \text{ en peso Sn} + \frac{1}{6} \% \text{ en peso Zr} \leq 8,0$$

30 Donde Al, Sn y Zr son las cantidades en % en peso de aluminio, estaño y circonio, respectivamente. Tal aleación tiene mayor resistencia.

35 El Al puede estar presente en una cantidad entre 4,0 y 6,0 % para promover la fase alfa endurecida. Se supone una cantidad óptima de 5,0 %. Sn y Zr pueden ser intercambiables y cuando se cumple la relación introducida, la aleación se fortalece de manera óptima mientras se evita la formación de fases frágiles estabilizadas en alfa. Una alta cantidad de Al también ayuda con la producción de aleaciones. Los elementos de alto punto de fusión, tales como Mo, se pueden alear con Al durante el proceso de producción del lingote.

40 En una realización de la invención, se añade boro como refinador de grano. La experiencia demuestra que los aditivos de hasta un 0,5 %, pero preferiblemente al menos el 0,05 % son beneficiosos.

En una realización de la invención, la aleación de titanio consiste en 0,1 % en peso o más de hafnio, preferiblemente 0,5 % en peso o más de hafnio, ya que esto aumenta la resistencia al desgaste al aumentar la dureza.

45 En una realización de la invención, la suma del % en peso de cada uno de cobalto, níquel y manganeso es 1,0 % en peso o menos, preferiblemente 0,5 % en peso o menos. Una aleación de este tipo tiene un bajo nivel de elementos que influirían excesivamente en la temperatura de inicio martensítico.

50 La expresión "que consiste en" se usa en el presente documento para indicar que se está haciendo referencia al 100 % de la composición y se excluye la presencia de componentes adicionales de modo que los porcentajes sumen 100 %. A menos que se indique lo contrario, todas las cantidades se dan en porcentaje en peso.

La invención se describirá con más detalle, solo a modo de ejemplo, haciendo referencia a los dibujos adjuntos, en los que:

55 La Figura 1 muestra el efecto de Zr y Sn sobre los mapas de contorno de los índices de calidad para el sistema Ti-5Al-5V-5Mo-YZr-XSn-0Fe-0Cr-0Nb.

La Figura 2 muestra el efecto de Mo y Cr sobre los mapas de contorno de los índices de calidad para el sistema Ti-5Al-5V-YMo-XCr-0Fe-0Sn-0Zr-0Nb.

60 La Figura 3 muestra el efecto de V y Fe sobre los mapas de contorno de los índices de calidad para el sistema Ti-5Al-5Mo-YV-XFe-0Zr-0Sn-0Cr-0Nb.

65 La Figura 4 muestra el efecto de Mo y Nb sobre los mapas de contorno de los índices de calidad para el sistema Ti-5Al-5V-YMo-XNb-0Fe-0Cr-0Zr-0Sn.

La Figura 5 muestra el efecto de Al y Sn sobre los mapas de contorno de los índices de calidad para el sistema Ti-4Mo-4V-YAl-XSn-0Fe-0Cr-4Zr-0Sn.

- 5 La Figura 6 ilustra el efecto de las adiciones de aleaciones sobre los índices de calidad.
- La Figura 7 muestra las restricciones del índice de calidad para aislar el espacio de aleación óptimo.
- 10 La Figura 8 muestra el mapa de contorno del intervalo de solidificación para el espacio de aleación preferido.
- La Figura 9 muestra el mapa de contorno de la susceptibilidad al agrietamiento para el espacio de aleación preferido.
- 15 La Figura 10 muestra el mapa de contorno del factor de restricción del crecimiento para el espacio de aleación preferido.
- La Figura 11 muestra el mapa de contorno de la temperatura de fusión para el espacio de aleación preferido.
- 20 La Figura 12 muestra el mapa de contorno de la temperatura de inicio martensítico para el espacio de aleación preferido.
- La Figura 13 muestra el mapa de contorno del coste de la materias primas para el espacio de aleación preferido.
- 25 La Figura 14 muestra el mapa de contorno de la difusividad normalizada para el espacio de aleación preferido.
- La Figura 15 muestra el mapa de contorno de la densidad para el espacio de aleación preferido.
- La Figura 16 muestra el mapa de contorno de la resistencia beta para el espacio de aleación preferido.
- 30 La Figura 17 muestra las aleaciones óptimas dentro del espacio de aleación preferido.
- La Figura 18 muestra las propiedades de calidad de las aleaciones de referencia.
- 35 La Figura 19 muestra las propiedades de calidad de las aleaciones de ejemplo propuestas.
- La Figura 20 muestra el intervalo químico del espacio de aleación óptimo.
- La Figura 21 muestra cómo funciona la relación de restricción para separar las aleaciones de referencia y las aleaciones de ejemplo.
- 40 La Figura 22 muestra un diagrama de dispersión del factor de susceptibilidad al agrietamiento frente al intervalo de solidificación.
- 45 La Figura 23 muestra un diagrama de dispersión del factor de susceptibilidad al agrietamiento frente al factor de restricción del crecimiento.
- La Figura 24 muestra un diagrama de dispersión del factor de restricción del crecimiento frente al intervalo de solidificación.
- 50 La Figura 25 muestra un diagrama de dispersión del factor de restricción del crecimiento frente a la temperatura de inicio de formación de martensita.
- La Figura 26 muestra un diagrama de dispersión del factor de restricción del crecimiento frente al valor de equivalentes de molibdeno.
- 55 La Figura 27 muestra un diagrama de dispersión del factor de restricción del crecimiento frente a la densidad.
- La Figura 28 muestra un diagrama de dispersión del factor de restricción del crecimiento frente al coste de la materias primas.
- 60 La Figura 29 muestra un diagrama de dispersión del factor de restricción del crecimiento frente a la resistencia beta.

65 Tradicionalmente, las aleaciones basadas en titanio se han diseñado a través del empirismo. Por tanto, sus composiciones químicas se han aislado utilizando un desarrollo experimental costoso y que requiere mucho tiempo, que implica el procesamiento a pequeña escala de cantidades limitadas de material y la posterior caracterización de

su comportamiento. La composición de la aleación adoptada es entonces la que muestra la mejor, o más deseable, combinación de propiedades. El gran número de posibles elementos de aleación indica que estas aleaciones no están completamente optimizadas y que es probable que existan aleaciones mejoradas.

5 En las aleaciones de titanio, generalmente se añaden adiciones de aluminio (Al), circonio (Zr) y estaño (Sn) como estabilizadores α para mejorar la resistencia mecánica. Sin embargo, el exceso de contenido de % en peso de equivalentes de Al conduce a problemas de estabilidad: se produce pérdida de ductilidad y corrosión por tensión debido a la reacción de reordenación de la formación de α_2 después de una exposición prolongada a alta temperatura.

10 Las adiciones generales de niobio (Nb), vanadio (V) y molibdeno (Mo) se añaden como estabilizador β para aumentar la resistencia mecánica sin formar compuestos intermetálicos quebradizos. El V forma una solución sólida con la fase β . El Mo también mejora en gran medida la resistencia a la corrosión de la aleación. Las cantidades altas de vanadio están restringidas porque se sabe que reducen la ductilidad de la aleación ($V < 10,0$ % en peso).

15 Las adiciones de níquel (Ni), cobalto (Co), hierro (Fe) y cromo (Cr) se pueden añadir como elementos estabilizadores β para reducir la temperatura beta transus, para metaestabilizar la fase beta, y para fortalecer la fase beta. El cobalto y el níquel pueden estar presentes cada uno en una cantidad del 0,5 % o menos, preferiblemente 0,25 % o menos para evitar la formación de intermetálicos que pueden tener efectos adversos sobre la ductilidad de la aleación. Los requisitos para el hierro y el cromo se tratan a continuación.

20 Se añaden pequeñas adiciones de silicio (Si) y estaño (Sn) para aumentar la resistencia y la resistencia a la fluencia. A altas temperaturas, el Si se disuelve en la fase α y precipita como siliciuros que impiden que las dislocaciones móviles suban y se deslicen. Asimismo, se cree que el Si es un refinador de granos, por lo que es una adición que puede ayudar durante el proceso de fabricación aditiva. El silicio no formaba parte de los cálculos que se describen a continuación en el presente documento, pero la experiencia demuestra que adiciones de hasta un 0,75 %, pero preferiblemente al menos un 0,15 % o un 0,25 % son beneficiosos para aumentar la resistencia y proporcionar resistencia a la fluencia a temperatura media y, por lo tanto, pueden incluirse en la aleación de la invención. Sin embargo, con cantidades elevadas, el Si puede influir negativamente en la trayectoria de solidificación e inducir el agrietamiento en caliente. Limitar el silicio al 0,5 % puede ofrecer ventajas en términos de capacidad de fabricación aditiva, siendo probable que un alto contenido de Si cambie sustancialmente las últimas etapas del proceso de solidificación y podría hacer que la aleación sea susceptible al agrietamiento en caliente.

35 El boro (B) se añade como refinador de granos. El boro no formaba parte de los cálculos que se describen a continuación en el presente documento, pero la experiencia demuestra que los aditivos de hasta un 0,5 % (preferiblemente un 0,25 % o menos), pero preferiblemente al menos un 0,05 % son beneficiosos y, por lo tanto, se incluyen en la aleación de la invención. Se ha demostrado que el boro crea microestructuras finas equiaxiales durante el proceso de solidificación experimentado en la fabricación aditiva; esto probablemente se deba a que el boro crea nuevos sitios de nucleación para múltiples frentes de solidificación.

40 Los presentes inventores no han modelado el efecto de niveles bajos de otros elementos de aleación de uso común tales como calcio, carbono, cobalto, silicio y manganeso.

45 El manganeso es un estabilizador β -eutectoide, por lo tanto, las adiciones adicionales de Mn promoverán la formación de fases no deseadas de manera similar a Cr, Ni y Fe. El Mn puede estar presente hasta un 0,5 % en peso. Sin embargo, debido a una densidad y coste muy similar al Cr, se puede sustituir una cantidad de Cr (hasta el 2,5 % en peso) por Mn. Es decir, la suma de Cr y Mn puede ser de hasta un 4,0 % en peso, estando presente el Mn hasta un 2,5 % en peso.

50 El calcio y el carbono pueden estar presentes en niveles de hasta 0,5 % cada uno y no se espera que cambien mucho el carácter de la aleación a este nivel.

55 Se describe aquí un enfoque basado en modelos utilizado para el aislamiento de nuevas calidades de aleaciones biocompatibles basadas en titanio, denominado método de "Aleaciones por diseño" (ABD). Este enfoque utiliza un marco de modelos de materiales computacionales para estimar las propiedades relevantes del diseño en un espacio composicional muy amplio. La Figura 2 ilustra las diversas etapas del método. En principio, esta herramienta de diseño de aleaciones permite resolver el llamado problema inverso; identificar composiciones de aleación óptimas que mejor satisfagan un conjunto específico de limitaciones de diseño.

60 La primera etapa en el proceso de diseño es la definición de una lista elemental junto con los límites composicionales superior e inferior asociados. Los límites composicionales para cada una de las adiciones elementales consideradas en esta invención, denominadas "espacio de diseño de aleación", se detallan en la Tabla 2.

Tabla 2: Espacio de diseño de aleaciones en % en peso buscado utilizando el método 'Aleación por diseño'.

	Al	V	Mo	Cr	Fe	Zr	Sn	Nb
Mín.	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Máx.	14,0	14,0	14,0	14,0	2,0	10,0	10,0	10,0

La segunda etapa se basa en los cálculos termodinámicos utilizados para calcular el diagrama de fases y las propiedades termodinámicas de una composición de aleación específica. A menudo, esto se conoce como el método CALPHAD (Diagrama de CALculate PHase (es decir, de cálculo de fase)). Estos cálculos se realizan para aquellas temperaturas en las que se encuentra una arquitectura de fase óptima de la nueva aleación.

Una tercera etapa consiste en aislar composiciones de aleación que tengan la arquitectura microestructural deseada para la fabricación aditiva y para fines biomédicos. En el caso de las aleaciones de titanio, la formabilidad a través de la fabricación aditiva está directamente relacionada con la soldabilidad de la aleación. En las aleaciones de titanio, la soldabilidad se puede correlacionar en primera instancia con la arquitectura microestructural en términos de proporciones de fase α y β . Para aleaciones casi α , la soldabilidad es buena, estas aleaciones generalmente se sueldan en estado recocido. Para las aleaciones α/β , la soldabilidad depende de la cantidad de fase β presente. Las aleaciones más estabilizadas en beta suelen fragilizarse durante la soldadura; las aleaciones con alto contenido en beta rara vez se sueldan. La excepción es Ti-6Al-4V que tiene buena soldabilidad y puede tener buenas propiedades mecánicas después del tratamiento térmico. Las aleaciones β metaestables tienen buena soldabilidad y conservan buenas propiedades mecánicas después de la soldadura, incluso sin necesidad de un tratamiento posterior al calor.

Por tanto, el modelo aísla todas las composiciones en el espacio de diseño que son las más aptas para la fabricación aditiva, que tienen tendencia a formar microestructuras β estables para una fabricación aditiva óptima, y que tienen la cantidad adecuada de ingredientes para añadir resistencia y tener una microestructura estable. Asimismo, los factores importantes, como la temperatura de fusión y la cantidad de aleantes, que son importantes para obtener una partícula de polvo uniforme y químicamente homogénea, también se ponderan en el proceso de diseño.

En la cuarta etapa, los índices de calidad se estiman para las composiciones de aleación aisladas restantes en el conjunto de datos. Los ejemplos de estas incluyen: índice de calidad de transformación martensítica (que describe la temperatura a la que comienza la transformación), capacidad de fabricación (que está relacionada con el intervalo de congelación y la susceptibilidad de la aleación al agrietamiento, que es una función del comportamiento de solidificación transitoria y las proporciones de fase de la aleación), y procesabilidad del polvo (que está relacionada con la temperatura de fusión y la cantidad de titanio en la aleación).

El primer índice de calidad está relacionado con la susceptibilidad de la aleación para formar la fase martensítica. Este índice de calidad utiliza el modelo de temperatura de inicio de martensita como se divulga en Suresh Neelakantana, *Prediction of the martensite start temperature for β titanium alloys as a function of composition*, 60 Scripta Materialia 611 (2009). La temperatura de inicio martensítico (en °C) se calcula en función de la composición de la aleación siguiendo

$$M_s = 883 - 150 \% \text{ en peso Fe} - 96 \% \text{ en peso Cr} - 49 \% \text{ en peso Mo} - 37 \% \text{ en peso V} - 17 \% \text{ en peso Nb} - 12 \% \text{ en peso Ta} - 7 \% \text{ en peso Zr} - 3 \% \text{ en peso Sn} + 15 \% \text{ en peso Al}$$

Si la temperatura de inicio martensítico está por debajo de la temperatura ambiente, la fase martensítica no estará presente a nivel de microestructura. La fase martensítica es dura y quebradiza y podría afectar a la susceptibilidad al agrietamiento de la aleación si las deformaciones térmicas durante el proceso de fabricación son lo suficientemente altas como para agrietar esta fase frágil. Se puede definir un límite superior de la temperatura de inicio martensítico para que la transformación de fase no comprometa el proceso de fabricación ($\sim <300$ °C). Por tanto, es deseable que se satisfaga la siguiente ecuación

$$300 \geq 883 - 150 \% \text{ en peso Fe} - 96 \% \text{ en peso Cr} - 49 \% \text{ en peso Mo} - 37 \% \text{ en peso V} - 17 \% \text{ en peso Nb} - 12 \% \text{ en peso Ta} - 7 \% \text{ en peso Zr} - 3 \% \text{ en peso Sn} + 15 \% \text{ en peso Al.}$$

en la que Fe, Cr, Mo, V, Nb, Ta, Zr, Sn y Al representan las cantidades de hierro, cromo, molibdeno, vanadio, niobio, tantalio, circonio, estaño y aluminio en % en peso, respectivamente.

En una realización de la invención, la aleación de titanio satisface la ecuación de flujo

$$75 \leq 883 - 150 \% \text{ en peso Fe} - 96 \% \text{ en peso Cr} - 49 \% \text{ en peso Mo} - 37 \% \text{ en peso V} - 17 \% \text{ en peso Nb} - 12 \% \text{ en peso Ta} - 7 \% \text{ en peso Zr} - 3 \% \text{ en peso Sn} + 15 \% \text{ en peso Al.} \leq 300$$

en la que Fe, Cr, Mo, V, Nb, Ta, Zr, Sn y Al representan las cantidades de hierro, cromo, molibdeno, vanadio, niobio, tantalio, circonio, estaño y aluminio en % en peso, respectivamente. Es poco probable que una aleación de este tipo comprometa el proceso de fabricación porque la transformación de la martensita se produce a bajas temperaturas. Asimismo, dado que tal aleación tiene fase martensítica a temperatura ambiente, ofrece una resistencia mejorada.

La Figura 12 muestra que la temperatura de inicio martensítico en el intervalo de la invención puede caer dentro del intervalo preferido. El límite inferior se representa en la Figura 17 como Ms.

5 El segundo índice de calidad es el intervalo de congelación. El intervalo de congelación es efectivamente el intervalo de temperatura de la fase líquida bifásica + región de la fase β . Este índice de calidad se calcula utilizando el cálculo termodinámico de Scheil en ThermoCalc y proporciona la ruta de solidificación transitoria de la aleación. Un intervalo de solidificación ampliado tiene el potencial de aumentar el desgarro en caliente y la refundición excesiva de las capas inferiores durante la fabricación con láser. Sin embargo, un intervalo de congelación estrecho corre el riesgo de evitar la refundición parcial de las capas inferiores durante el proceso AM, lo que da como resultado una mala adhesión de la capa y bajas propiedades mecánicas. Por tanto, es deseable monitorear el intervalo de temperatura en el cual ocurre la transición de líquido a sólido. Aunque no es el factor más crítico, es deseable mantener el intervalo de congelación dentro de un valor razonable. En este caso, se supone que un intervalo de congelación entre 100 y 275 °C es óptimo. La Figura 8 muestra que la aleación cumple este requisito deseable cuando se cumple el requisito de GRF.

15 El tercer índice de calidad es el factor de susceptibilidad al agrietamiento (CSF), se calcula en función del tiempo necesario para solidificar el último 10 % del líquido frente al tiempo necesario para pasar de un 40 % de fracción sólida a un 90 % de fracción sólida. Se supone que la solidificación ocurre a una velocidad constante de disminución de la temperatura para facilitar la estimación del tiempo de solidificación. Se supone que el riesgo de desgarro en caliente es mayor durante los últimos instantes de la solidificación, por tanto, el objetivo es minimizar el tiempo de esa parte del proceso de solidificación. El CSF se calcula de la siguiente manera

$$CSF = \frac{\text{tiempo}(f_{\text{sólido}} = 0,9) - \text{tiempo}(f_{\text{sólido}} = 1,0)}{\text{tiempo}(f_{\text{sólido}} = 0,4) - \text{tiempo}(f_{\text{sólido}} = 0,9)}$$

25 donde el tiempo ($f_{\text{sólido}}$) es el tiempo requerido para alcanzar una fracción de volumen particular de sólido.

El cuarto índice de calidad es el factor de restricción del crecimiento (GRF). La metodología para obtenerlo se describe en T. E. Quested, A. T. Dinsdale y A. L. Greer, *Thermodynamic Modeling of Growth-Restriction Effects in Aluminum Alloys*, 53 Acta Materialia 1323 (2005). En general, se acepta que una aleación con un factor de restricción del crecimiento grande tiende a rechazar átomos de soluto durante la solidificación, lo que se traduce en microestructuras de tamaño de grano más fino que son beneficiosas. El GRF se calcula como la derivada de la fracción de sólido con respecto al subenfriamiento de la siguiente manera

$$GFR = \left(\frac{\partial(\Delta T_s)}{\partial f_s} \right)_{f_s \rightarrow 0}$$

35 donde f_s es la fracción de sólido y ΔT_s es el subenfriamiento del soluto. Esto se puede derivar utilizando el análisis de Scheil. Se pueden encontrar más detalles en la referencia científica antes mencionada.

40 El quinto índice de calidad es la procesabilidad del polvo. Para facilitar el proceso de producción de polvo y obtener una homogeneización elemental óptima, la temperatura de fusión y la cantidad de aleantes deben minimizarse. Por tanto, para el quinto índice, se calcula la temperatura del punto de fusión, este está deseablemente por debajo de 1800 °C. La Figura 11 muestra que esto se puede lograr con la presente aleación.

45 El quinto índice de calidad también limita la cantidad de aleantes. Preferiblemente, el titanio puro tiene al menos un 70 % en peso de la composición final para facilitar el procesamiento del polvo. Si hay muy poco titanio presente, se cree que puede dificultar el procesamiento del polvo (producido por atomización de un lingote). Es decir, cuando se atomiza el lingote de la composición correcta, si hay muy poco titanio presente, esto puede causar una segregación cuya aparición también está relacionada con el punto de fusión. Luego, el polvo atomizado se alimenta a una máquina de fusión selectiva por láser (SLM) para la fabricación aditiva. Incluso más preferiblemente, la aleación tiene un 72,5 % en peso o más de titanio aún más para facilitar el procesamiento del polvo.

50 El sexto índice de calidad es la difusividad de la fase β , que aquí se correlaciona con la difusividad de liquidus. Esto está ligado a la procesabilidad por fabricación aditiva. Una difusividad más lenta de β se traduce en una microestructura más fina que no crece de forma columnar durante la solidificación. En este caso, la difusividad está controlada por las especies de difusión más rápida, consistente con

$$D_{ef} = \sum_i x_i D_i$$

donde x_i es la concentración del elemento i y D_i es su difusividad del trazador como se muestra en la Tabla 3. El índice

de calidad de resistencia a la formación está relacionado directamente con esta difusividad, por claridad, el índice de calidad de difusividad se escribe de forma adimensional para la autodifusividad del titanio; véase la Tabla 3.

Tabla 3: difusividad (D) de los elementos estabilizadores beta a 870°C

Difusividad (D) de los elementos estabilizadores β a 870 °C		
Elemento	D (cm ² s)	D del elemento / D de V
Ni	220 x 10 ⁻¹⁰	63,7
Co	190 x 10 ⁻¹⁰	55,3
Fe	78 x 10 ⁻¹⁰	22,6
Cr	11 x 10 ⁻¹⁰	3,22
HI	3,36 x 10 ⁻¹⁰	1,0
V	2,4 x 10 ⁻¹⁰	0,69
Nb	1,7 x 10 ⁻¹⁰	0,49
Al	1,44 x 10 ⁻¹⁰	0,43
Mo	0,6 x 10 ⁻¹⁰	0,173
W	0,2 x 10 ⁻¹⁰	0,063

5 Las Figuras 14 y 19 muestran que en la presente aleación se logra una difusividad adecuada que es comparable a la difusividad de las aleaciones de referencia de la Figura 18.

10 El séptimo índice de calidad es la densidad. La densidad, ρ, se calculó usando una regla simple de mezclas y un factor de corrección del 5 %, como se ha demostrado en la práctica, para dar una predicción más precisa, donde, ρ_i es la densidad para un elemento dado y X_i es la fracción atómica del elemento de aleación.

$$\rho = 1,05 \left[\sum_i x_i \rho_i \right]$$

15 Deseablemente, la densidad de la aleación se mantiene dentro de límites razonables. La Figura 18 muestra la densidad de las aleaciones de referencia que oscila entre 4,7 y 5,2 g/cm³. La densidad de la aleación no es el factor más importante, pero deseablemente la densidad es comparable a las aleaciones de referencia, es decir, por debajo de 5,3 o 5,2 g/cm³. Por otra parte, como se muestra en los ejemplos de la Figura 19, la presente aleación puede tener una densidad de menos de 5,1 o incluso 5,0 g/cm³. La siguiente ecuación da un valor para la densidad de la aleación:

$$1,05 \left(\frac{4,43Ti}{4786} + \frac{2,7Al}{2698} + \frac{7,85Fe}{5584} + \frac{5,49V}{5094} + \frac{10,18Mo}{9594} + \frac{6,49Zr}{9122} + \frac{7,85Cr}{5199} + \frac{8,6Nb}{9290} + \frac{7,31Sn}{11871} + \frac{16,65Ta}{18094} + \frac{13,07Hf}{17849} + \frac{8,9Ni}{5869} + \frac{7,3Mn}{5493} + \frac{8,86Co}{5893} + \frac{2,37B}{1081} + \frac{2,57Si}{2808} \right)$$

20 El octavo índice de calidad es el coste. Para estimar el coste de cada aleación se aplicó una regla simple de mezclas, donde la fracción en peso del elemento de aleación, x_i, se multiplicó por el coste actual (2018) de la materia prima para el elemento de aleación, c_i.

$$\text{Coste} = \sum_i x_i c_i$$

30 Las estimaciones asumen que los costes de procesamiento son idénticos para todas las aleaciones, es decir, que el rendimiento del producto no se ve afectado por la composición. Las Figuras 13 y 19 muestran que para las aleaciones de la presente invención, las propiedades mejoradas se obtienen a expensas de un mayor coste, pero el coste del material sigue siendo aceptable.

35 El noveno índice de calidad es la resistencia de la fase β. Esto es descrito por Sadeghpour et. Alabama. *A new multi-element beta titanium alloy with a high yield strength exhibiting transformation and twinning induced plasticity effects* Scripta Materialia (2018). Una relación que mide cualitativamente la resistencia de la fase beta se expresa como

$$40 \Delta\sigma - 1,5n (\% \text{ en peso Fe} + \text{Mn peso en \%}) + 1,3n (\% \text{ en peso Cr}) + n (\% \text{ en peso Al} + \% \text{ en peso Mo}) + 0,7n (\% \text{ en peso V}) + 0,5n (\% \text{ en peso Sn}) + 0,4n (\% \text{ en peso Zr}) + 0,3n (\% \text{ en peso Nb})$$

donde n es un parámetro material (supuesto n=50). De forma ideal, se quiere maximizar el índice de calidad de resistencia. Preferiblemente, delta sigma es 1110 o mayor, y esto es más alto que el logrado por muchas de las aleaciones de referencia de la Figura 18, lo que significa que la fase β presente será más fuerte que en esas

aleaciones. La Figura 16 muestra que este nivel de resistencia beta se puede lograr con la presente aleación.

Se usó el método ABD descrito anteriormente para aislar la composición de aleación inventiva. La intención del diseño de esta aleación era aislar la composición de una nueva aleación de titanio beta que presenta una combinación de rigidez, resistencia, capacidad de fabricación, procesabilidad, densidad, coste y estabilidad, que es comparable o mejor que los grados equivalentes de aleaciones. Deseablemente, la microestructura está entre el 50 y el 100 % de fase beta según se mide por microscopía óptica.

Las propiedades del material, determinadas mediante el método ABD, para las aleaciones de titanio de referencia de la literatura se enumeran en la Figura 18. El diseño de la nueva aleación se consideró en relación con las propiedades previstas enumeradas para estas aleaciones de referencia. El método se utilizó para proponer composiciones de aleaciones optimizadas con diferentes niveles de resistencia prevista y parámetros de fabricación. También se dan las propiedades del material calculadas para 8 aleaciones optimizadas con composiciones nominales de acuerdo con la Figura 19 y de conformidad con la presente invención.

La Figura 6 muestra el efecto de cada aleación en varias propiedades, La Figura 7 muestra las propiedades deseadas de la aleación y las Figuras 8 a 16 muestran variaciones de los índices de calidad en el espacio de la aleación preferida. Se utilizó un análisis de regresión lineal para determinar las relaciones que permiten que una aleación logre un cierto índice de calidad y se representan en la Figura 17. La Figura 18 muestra las propiedades determinadas para las aleaciones de referencia y la Figura 19 muestra lo mismo para 8 aleaciones de ejemplo de la invención. La Figura 21 compara las aleaciones de referencia y de ejemplo con los resultados del análisis de regresión lineal. Esas 8 aleaciones de ejemplo (puntos oscuros) y las aleaciones de referencia (puntos claros) se representan luego en las Figuras 22-29 a partir de las cuales se puede ver claramente la mejora en las propiedades.

Una característica importante para mejorar las propiedades de fabricación aditiva de las aleaciones de titanio es un bajo factor de susceptibilidad al agrietamiento (CSF), en concreto, el cuarto índice de calidad. Las Figuras 1-5 ilustran los efectos de cantidades variables de molibdeno, vanadio, niobio, estaño, cromo, hierro y circonio sobre el factor de susceptibilidad al agrietamiento. El efecto del vanadio, estaño, niobio y molibdeno es positivo, pero el efecto del niobio y el estaño es el más fuerte.

Como puede verse, generalmente se alcanza un factor mínimo de susceptibilidad al agrietamiento para una cantidad de estaño de alrededor del 4-6 % (más limitado por la cantidad equivalente de aluminio, el intervalo de solidificación y la densidad) y para altas cantidades de niobio (esto está limitado por la densidad y el intervalo de solidificación). Por el contrario, como se puede ver en los mapas de contorno de las Figuras 1-5, mayores cantidades de estaño y niobio pueden conducir perjudicialmente a un mayor intervalo de solidificación (congelación). Esto, junto con la densidad (Figuras 1-5), significa que el mejor equilibrio de propiedades se logra cuando la aleación contiene 5,0 % en peso o menos de niobio y 7,0 % o menos de estaño. Sin embargo, es necesaria una cantidad mínima de 2,0 % en peso de estaño para lograr un valor de CSF suficientemente bajo y para añadir resistencia a la fase alfa. Aún más estaño, por ejemplo un 3,5 % o más, preferiblemente 4,0 % o más o incluso 4,5 o 5,0 % o más aún más reduce el CSF y aumenta la resistencia. La siguiente ecuación derivada por análisis de regresión de los resultados del tercer índice de calidad válido dentro del intervalo elemental de la aleación (Al 3,0-7,0, V 0,0-10,0, Mo 3,0-10,0, Sn 2,0-7,0, Zr 0,0-6,0, Nb 0,0-5,0, Fe 0,0-0,5, Cr 0,0-4,0) da una relación elemental entre los aleantes y un umbral donde es más probable una baja susceptibilidad al agrietamiento dentro del espacio óptimo preferido:

$$0,041 \text{ Al} - 0,03\text{V} + 4\text{Fe} - 0,015\text{Mo} + 0,037\text{Zr} + 0,24\text{Cr} - 0,02\text{Nb} - 0,112\text{Sn} < 0$$

donde Mo, V, Zr, Sn, Cr, Fe y Nb representan cantidades de molibdeno, vanadio, circonio, estaño, cromo, hierro y niobio en % en peso, respectivamente. Esta línea se traza en la Figura 17 y se etiqueta como CSF.

Otro índice de calidad importante es el factor de restricción del crecimiento (GRF). Sn, Mo, V, Nb, Zr, Cr y Fe aumentan el GRF. El efecto de Sn, Cr y Fe es el más fuerte. Sin embargo, Cr y Fe aumentan en gran medida el intervalo de solidificación y aumentan la susceptibilidad al agrietamiento. Por tanto, la cantidad de Cr está restringida a cantidades de 4,0 % o menos, preferiblemente de 3,5 % o menos, más preferiblemente de 3,0 % o menos y el Fe está restringido a valores de 0,5 % en peso o menos. La cantidad de Sn está restringida al 7,0 % (como se ha mencionado anteriormente) y esto mantiene los equivalentes de aluminio a niveles en los que no se forman las fases α_2 . Mo, V, Nb y Zr no aumentan el CSF y sus cantidades están determinadas por la temperatura de inicio martensítico adecuada para metaestabilizar la fase beta. La siguiente ecuación derivada por análisis de regresión de los resultados del cuarto índice de calidad da una relación elemental válida dentro del intervalo elemental de la aleación (Al 3,0-7,0, V 0,0-10,0, Mo 3,0-10,0, Sn 2,0-7,0, Zr 0,0-6,0, Nb 0,0-5,0, Fe 0,0-0,5, Cr 0,0-4,0) entre aleantes y una alta restricción de crecimiento:

$$0,027\text{V} + 0,178\text{Fe} + 0,055(\text{Mo}+0,5\text{W}) + 0,016\text{Zr} + 0,044\text{Cr} + 0,033(\text{Nb}+\text{Ta}) + 0,053\text{Sn} > 1,0$$

donde Mo, W, V, Zr, Sn, Cr, Fe, Ta y Nb representan cantidades de molibdeno, wolframio, vanadio, circonio, estaño, cromo, hierro, tantalio y niobio en % en peso, respectivamente. Esta línea se traza en la Figura 17 y se etiqueta como GRF. Esto restringe la cantidad mínima de cada elemento para lograr un GRF lo suficientemente alto (es decir, un

GRF de al menos 45, que es más alto que el GRF logrado por cualquiera de las aleaciones de referencia; véase la Figura 19).

5 El molibdeno tiene un fuerte efecto en la reducción de la temperatura de inicio martensítico y, por tanto, en la estabilización β de la aleación (Figura 2), al tiempo que mantiene alto el contenido de titanio puro. El molibdeno también es importante para aumentar el factor de restricción del crecimiento (Figura 2) y, hasta cierto punto, para reducir el factor de susceptibilidad al agrietamiento (Figura 2). Sin embargo, el molibdeno tiene el efecto de aumentar el intervalo de solidificación general (Figura 2). No obstante, el molibdeno es un refinador de grano conocido y un fuerte estabilizador β , por tanto, permite producir una aleación con un alto contenido de titanio (lo que aumenta la facilidad de procesamiento del polvo y su homogeneidad química). Junto con el niobio y el vanadio, el molibdeno aumenta indeseablemente la temperatura de fusión (Figura 2). Por lo tanto, se ha encontrado que para mantener alta la cantidad de titanio y evitar una alta densidad, un nivel adecuado de molibdeno es del 10,0 % en peso o menos. Debido a su efecto beneficioso sobre el GRF, en la reducción de la temperatura martensítica, y su efecto positivo en la resistencia, el molibdeno está presente en una cantidad de al menos 3,0 % en peso o más. Deseablemente, el molibdeno está presente en una cantidad de 9,0 % en peso o menos, preferiblemente 8,5 % en peso o menos para reducir su efecto sobre el aumento del intervalo de solidificación, para asegurar que el intervalo de temperatura de inicio de formación de martensita permanezca dentro del intervalo deseado y para mantener baja la densidad. Por otra parte, una cantidad de molibdeno de 6,0 % en peso o más, preferiblemente 6,5 % en peso o más es ventajosa, ya que esto asegura que el GRF permanezca alto y la temperatura martensítica permanezca baja sin necesidad de aumentar más la cantidad de otros estabilizadores beta menos efectivos.

25 El W puede desempeñar un papel similar al Mo en aleaciones de titanio: (i) es un estabilizador isomorfo beta, (ii) fortalece la fase beta, y (iii) aumenta el factor de restricción del crecimiento y refina el tamaño de grano. El W suele ser menos popular que el Mo porque: (i) es más denso, casi el doble que el Mo, (ii) es difícil de pre-aleaar, difícil de obtener en forma de aleación maestra, y (iii) corre el riesgo de formar partículas quebradizas. Aun así, el W tiene una difusividad aún más baja que el Mo y podría usarse en lugar del Mo, a pesar de las dificultades asociadas. El W está limitado al 2,0 % o menos por estos motivos. Debido a la densidad añadida, en la presente patente, el Mo puede estar sustituido en una realización por Mo siguiendo $Mo = 2W$.

30 El vanadio también tiene un fuerte efecto en la reducción de la temperatura de inicio martensítico y, por tanto, en la estabilización β de la aleación (Figura 3), al tiempo que mantiene alto el contenido de titanio puro. El vanadio también es importante para aumentar el factor de restricción del crecimiento (Figura 3) sin aumentar el factor de susceptibilidad al agrietamiento (Figura 3). El vanadio también disminuye la difusividad efectiva, lo que ayuda al afino del grano durante la fabricación. Sin embargo, el vanadio tiene el efecto de aumentar el intervalo de solidificación general (Figura 3) y el coste (Figura 3). No obstante, el vanadio es un refinador de grano conocido y un fuerte estabilizador β , por tanto, permite producir una aleación con un alto contenido de titanio (lo que aumenta la facilidad de procesamiento del polvo y su homogeneidad química). Junto con el niobio y el molibdeno, el vanadio aumenta indeseablemente la temperatura de fusión (Figura 3). Por lo tanto, se ha encontrado que un nivel adecuado de vanadio es de 10,0 % en peso o menos para mantener bajos el coste y la densidad. Asimismo, se sabe que cantidades de V superiores al 10,0 % en peso tienen un efecto negativo sobre la ductilidad de la aleación. Debido a su efecto beneficioso sobre el GRF, la difusividad, la resistencia beta y la estabilización beta, el vanadio está presente en una cantidad de al menos 3,0 % en peso o más, deseablemente 5,5 % en peso o más, más deseablemente 6,0 o incluso 6,5 % en peso o más. Deseablemente, el vanadio está presente en una cantidad de 9,5 % en peso o incluso de 9,0 % en peso o menos para reducir su efecto sobre el aumento del intervalo de solidificación, para asegurar que el intervalo de temperatura de inicio de formación de martensita permanezca dentro del intervalo deseado, para mantener alta la ductilidad y para mantener bajo el coste de la materias primas. Mantener el vanadio al 8,0 % o menos es aún más deseable.

50 Se introducen estaño (Sn) y circonio (Zr) para añadir resistencia. Asimismo, el Sn ofrece una buena capacidad de fabricación aditiva, ya que reduce la probabilidad de agrietamiento y refina la microestructura. El Sn es uno de los elementos más fuertes para mejorar la restricción del crecimiento y reducir la susceptibilidad al agrietamiento. Desde el punto de vista del GRF, se quiere maximizar la cantidad de Sn en la aleación. En cuanto al CSF, se encuentra un valor óptimo de Sn = 4,0 % en peso. Después de eso, la susceptibilidad al agrietamiento aumenta de nuevo - hasta 7,0 % en peso de Sn, los valores de susceptibilidad al agrietamiento están dentro de límites aceptables. Tanto Zr como Sn pueden actuar como estabilizadores α , la cantidad de Sn está limitada a $Sn \leq 7,0$ % en peso, preferiblemente de 6,5 % o menos, más preferiblemente de 6,0 % o menos para evitar fases alfa inestables y promover un CSF más bajo. En una realización, se añade al menos un 5,0 % o más de Sn para aumentar la capacidad de fabricación (disminuyendo la susceptibilidad al agrietamiento y aumentando la restricción del crecimiento) y para aumentar la resistencia. El Zr no tiene un efecto negativo sustancial en la capacidad de fabricación (CSF y GRF) u otros fenómenos microestructurales tales como la temperatura de formación de martensita. Se puede añadir Zr a la aleación para aumentar la resistencia.

La siguiente ecuación relativa a los equivalentes de aluminio, cuando se satisface, da como resultado un aumento en la resistencia:

$$65 \quad 7,0 \leq \% \text{ en peso Al} + \frac{1}{3} \% \text{ en peso Sn} + \frac{1}{6} \% \text{ en peso Zr} \leq 8,0$$

Una cantidad máxima de 6,0 % de circonio garantiza que la cantidad de aleaciones secundarias no interfiera con los beneficios de fortalecimiento de Al y Sn (si Al y Sn están presentes al 5,0 y 6,0 % en peso, respectivamente, se prefieren respecto a Zr). Sin embargo, se puede tolerar una cantidad de circonio de hasta el 6,0 % o menos para cualquier cantidad permitida de Al y Sn, y dicha aleación tiene una resistencia y capacidad de fabricación razonables, así como un coste, una densidad y un buen factor de susceptibilidad al agrietamiento. El Zr también aumenta ligeramente el CSF, no es uno de los promotores más óptimos de GRF y es uno de los elementos menos fortalecedores en la fase beta. Por lo tanto, dada la cantidad de Al y Sn presente en la aleación, el Zr es deseable en una cantidad de 5,0 o menos, preferiblemente de 4,5 % o menos, más preferiblemente de 4,0 % o menos, incluso más preferiblemente de 3,0 % o menos. El Zr añade algo de resistencia sin estabilizar en gran medida la fase beta, por lo tanto, es deseable en una cantidad de 1,0 % o más, preferiblemente 1,5 % o más, más preferiblemente 2,0 % o más.

El aluminio (Al) actúa como un fuerte fortalecedor alfa, reduce la densidad de la aleación, reduce el coste y reduce la difusividad efectiva. El Al tiene un efecto insignificante sobre el GRF y un efecto pequeño sobre el CSF; por lo tanto, se supone que es benigno para la capacidad de fabricación. Sin embargo, el Al aumenta la temperatura martensítica y reduce la estabilidad beta. Por lo tanto, para reducir la densidad, el coste y la difusividad y para aumentar la resistencia, el Al está presente en cantidades de 3,0 % en peso o más, deseablemente en cantidades de 4,0 % o más, preferiblemente 4,5 % o más, más preferiblemente 5,0 % o más. Para evitar una fuerte estabilización alfa y reducir las posibilidades de formar fases alfa quebradizas, el Al está presente en una cantidad del 7,0 % o menos, deseablemente el Al es 6,0 % o menos, preferiblemente de 5,5 % o menos, más preferiblemente 5,0 % o menos.

El niobio (Nb) reduce la susceptibilidad al agrietamiento y aumenta la restricción del crecimiento a medida que aumenta la cantidad de Nb; esto es bueno para la capacidad de fabricación. El aumento de Nb también disminuye la difusividad y la temperatura de inicio martensítico, lo que es bueno para la capacidad de fabricación y la estabilidad beta. Sin embargo, el Nb aumenta sustancialmente el coste y la densidad. Por las razones anteriores, el Nb puede estar presente en una cantidad de 5,0 % en peso o menos, deseablemente en una cantidad de 4,5 % o menos, preferiblemente de 4,0 % o menos, más preferiblemente de 3,0 % o menos - lo que asegura el coste y la densidad dentro de los límites. El Nb es deseable en una cantidad de 1,0 o más, preferiblemente 1,5 % o más, más preferiblemente 2,5 % o más.

El hierro (Fe) y el cromo (Cr) son excelentes fortalecedores y aumentan en gran medida la restricción del crecimiento; esto es bueno para las propiedades mecánicas y la capacidad de fabricación, respectivamente. Sin embargo, el Fe aumenta en gran medida la susceptibilidad al agrietamiento y el intervalo de solidificación. Por esta razón, el Fe está limitado a cantidades inferiores al 0,5 %, más preferiblemente inferiores al 0,25 %. El cromo también aumenta la susceptibilidad al agrietamiento, por lo que el Cr se limita a cantidades del 4,0 % o menos, preferiblemente 3,5 % o menos o incluso 3,0 % o menos. Incluso pequeñas cantidades de Cr aumentan la resistencia y el GRF, por lo tanto, el Cr está presente en una cantidad deseable de 0,5 % o más, preferiblemente 1,0 % o más, más preferiblemente 1,5 % o más, incluso más preferiblemente 2,0 % o más. Pequeñas cantidades de Fe permiten reciclar otras aleaciones de titanio y aumentan la resistencia y el GRF, por lo tanto, el Fe es deseable en cantidades superiores al 0,1 %, más preferiblemente el 0,2 %.

En una realización de la invención, la suma del % en peso de cada uno de cobalto, níquel y manganeso es 1,0 % en peso o menos, preferiblemente 0,5 % en peso o menos. Una aleación de este tipo tiene un bajo nivel de elementos que influirían excesivamente en la temperatura de inicio martensítico.

El tantalio y el hafnio tienen un coste elemental muy alto y no se cree que aumenten sustancialmente el rendimiento de resistencia de las aleaciones de titanio beta. Por tanto, el tantalio está limitado al 0,5 % en peso o menos y el hafnio al 1,0 % en peso o menos. El Ta puede desempeñar un papel similar al Nb en las aleaciones de titanio. Ambos son isomorfos beta y ambos tienen difusividades y propiedades de fortalecimiento similares. Asimismo, ambos darán una resistencia a la oxidación similar sin tener un efecto perjudicial sobre el resto de las propiedades calculadas. Por lo tanto, el Nb puede sustituirse por Ta en una forma de 1 a 1. Siempre que la suma de niobio y tantalio sea 5,0 % en peso o menos.

el O se puede añadir como un reforzador de solución sólida a las aleaciones de titanio. Incluso cantidades muy pequeñas de O pueden aumentar considerablemente la resistencia de la aleación. Sin embargo, el exceso de O tendrá un efecto perjudicial sobre la ductilidad, lo que limitará el O al 0,5 % o menos. Si se desean buenas propiedades de fluencia, el O debe limitarse al mínimo: es un difusor rápido y tendrá un efecto perjudicial sobre la fluencia. El H y el N tienen efectos similares al O y, por lo tanto, están limitados de manera análoga hasta un 0,5 %.

Se ha demostrado que el La es un gran estabilizador de grano para la capacidad de fabricación (rompe el crecimiento plano). Por lo tanto, es posible que desee incluir cantidades limitadas para mejorar aún más la capacidad de fabricación. Sin embargo, es caro y difícil de conseguir como aleación maestra, por lo que se pueden añadir adiciones opcionales en una cantidad de hasta el 0,5 %.

Se ha demostrado que el paladio ofrece una excelente resistencia a la corrosión cuando se incluye en aleaciones de titanio, incluso en cantidades muy pequeñas (<0,5 %). Sin embargo, el Pd es muy caro y por lo tanto se trata como un

elemento opcional.

La Figura 17 muestra las diversas restricciones que se pueden aplicar al área reivindicada para lograr una o más propiedades opcionales deseadas además de un GRF alto. El área sólida muestra el área más deseada que tiene GRF alto, así como las propiedades opcionales, pero no por ello menos deseables de: baja densidad, CSF bajo y una temperatura de inicio de martensita entre 75 y 300 grados C. Para niveles bajos de Zr y Cr (fila superior), los requisitos de GRF y densidad limitan los elementos permitidos, así como la necesidad de una temperatura de inicio de martensita por debajo de 300 grados C a mayores concentraciones de Nb. Para niveles más altos de Zr (segunda y tercera fila), el CSF deseado limita el intervalo elemental para las propiedades más deseadas. Para niveles bajos de circonio con niveles más altos de Cr (fila inferior), la temperatura de inicio de formación de martensita es deseablemente superior a 75 grados C (marcada como Ms), así como el CSF y la densidad imponen límites a la composición elemental para lograr la combinación de propiedades más deseable. Sin embargo, al cumplir con el requisito de un alto valor de GRF, las propiedades de la aleación dentro del intervalo elemental de la presente invención serán superiores a las de las aleaciones de referencia y las demás propiedades se encuentran dentro de límites aceptables, como se muestra en las Figuras 8-16.

Las Figuras 22-29 ilustran el intervalo de índices de calidad de las aleaciones en el intervalo en el que se ejecutó el modelo (Tabla 2) con las propiedades de las aleaciones de referencia existentes numeradas y trazadas en los mismos gráficos, así como las áreas del intervalo inventivo trazadas (como se restringe en la Figura 7). Como puede verse, las aleaciones de la presente invención tienen propiedades mejoradas sobre las aleaciones existentes, por lo demás más adecuadas.

REIVINDICACIONES

1. Una composición de aleación basada en titanio que consiste en, en porcentaje en peso: de 3,0 a 7,0 % de aluminio, de 3,0 a 10,0 % de vanadio, de 3,0 a 10,0 % de molibdeno, de 2,0 a 7,0 % de estaño, de 0,0 a 6,0 % de circonio, de 0,0 a 5,0 % de niobio, de 0 a 0,5 % de hierro, de 0,0 a 4,0 % de cromo, de 0,0 a 2,0 de wolframio, de 0,0 a 0,5 % de níquel, de 0,0 a 0,5 % de tantalio, o entre 0,0 y 2,5 de tantalio cuando la suma de niobio y tantalio es 5,0 % o menos, de 0,0 a 0,5 % de cobalto, de 0,0 a 0,75 % de silicio, de 0,0 a 0,5 % de boro, de 0,0 a 0,5 % de carbono, de 0,0 a 0,5 % de oxígeno, de 0,0 a 0,5 % de hidrógeno, de 0,0 a 0,5 % de nitrógeno, de 0,0 a 0,5 % de paladio, de 0,0 a 0,5 % de lantano, de 0,0 a 0,5 % de manganeso o 0,0 a 2,5 % de manganeso cuando la suma de cromo y manganeso es 4,0 % en peso o menos, de 0,0 a 1,0 % de hafnio, siendo el resto titanio e impurezas minoritarias que satisfacen la siguiente relación:

$$0,027V + 0,178Fe + 0,055(Mo+0,5W) + 0,016Zr + 0,044Cr + 0,033(Nb+Ta) + 0,053Sn > 1,0$$

donde Mo, W, V, Zr, Sn, Cr, Fe, Ta y Nb representan cantidades de molibdeno, wolframio, vanadio, circonio, estaño, cromo, hierro, tantalio y niobio en % en peso, respectivamente.

2. La composición de aleación basada en titanio de la reivindicación 1, que consiste en 9,0 % o menos de molibdeno, preferiblemente 8,5 % o menos de molibdeno.

3. La composición de aleación basada en titanio de la reivindicación 1 o 2, que consiste en 6,0 % o más, preferiblemente en 6,5 % o más de molibdeno.

4. La composición de aleación basada en titanio de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, que consiste en 3,5 % o más de estaño, preferiblemente 5,0 % o más de estaño.

5. La composición de aleación basada en titanio de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, que consiste en 5,0 o menos de circonio, preferiblemente 4,5 % o menos de circonio, más preferiblemente 4,0 % o menos de circonio.

6. La composición de aleación basada en titanio de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, que consiste en 1,0 % o más de circonio, preferiblemente 1,5 % o más de circonio, más preferiblemente 2,0 % o más de circonio.

7. La composición de aleación basada en titanio de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6, que consiste en 9,5 % o menos de vanadio, preferiblemente 9,0 % o menos de vanadio, más preferiblemente 8,0 % o menos de vanadio.

8. La composición de aleación basada en titanio de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7, que satisface la ecuación de flujo

$$300 \geq 883 - 150 \% \text{ en peso Fe} - 96 \% \text{ en peso Cr} - 49 \% \text{ en peso Mo} - 37 \% \text{ en peso V} - 17 \% \text{ en peso Nb} - 12 \% \text{ en peso Ta} - 7 \% \text{ en peso Zr} - 3 \% \text{ en peso Sn} + 15 \% \text{ en peso Al.}$$

en la que Fe, Cr, Mo, V, Nb, Ta, Zr, Sn y Al representan las cantidades de hierro, cromo, molibdeno, vanadio, niobio, tantalio, circonio, estaño y aluminio en % en peso, respectivamente.

9. La composición de aleación basada en titanio de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8, que consiste en 0,5 % o más de cromo, preferiblemente 1,0 % o más, más preferiblemente 1,5 % o más, incluso más preferiblemente 2 % o más.

10. La composición de aleación basada en titanio de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 9, que consiste en 0,05 % o más de boro.

11. La composición de aleación basada en titanio de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 10, que consiste en 0,15 % o más de silicio, preferiblemente 0,25 % o más de silicio.

12. La composición de aleación basada en titanio de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 11, en donde la suma del % en peso de cada uno de cobalto, níquel y manganeso es de 2,0 % en peso o menos, preferiblemente 1,0 % en peso o menos.

13. La composición de aleación basada en titanio de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 12, que satisface la ecuación de flujo

$$0,041Al - 0,03V + 4Fe - 0,015Mo + 0,037Zr + 0,24Cr - 0,02Nb - 0,112Sn < 0,0$$

en la que Fe, Cr, Mo, V, Nb, Ta, Zr, Sn y Al representan las cantidades de hierro, cromo, molibdeno, vanadio, niobio, tantalio, circonio, estaño y aluminio en % en peso, respectivamente.

14. La composición de aleación basada en titanio de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 13, que satisface la ecuación de flujo

$$50\text{Al} + 35\text{V} + 75\text{Fe} + 65\text{Cr} + 20\text{Zr} + 50\text{Mo} + 15\text{Nb} + 25\text{Sn} > 1110$$

5 en la que Fe, Cr, Mo, V, Nb, Ta, Zr, Sn y Al representan las cantidades de hierro, cromo, molibdeno, vanadio, niobio, tantalio, circonio, estaño y aluminio en % en peso, respectivamente.

10 15. La aleación basada en titanio de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 14, en donde la aleación tiene una microestructura de entre 50 % y 100 % de fase beta.

Efecto de Zr-Sn sobre los índices de calidad

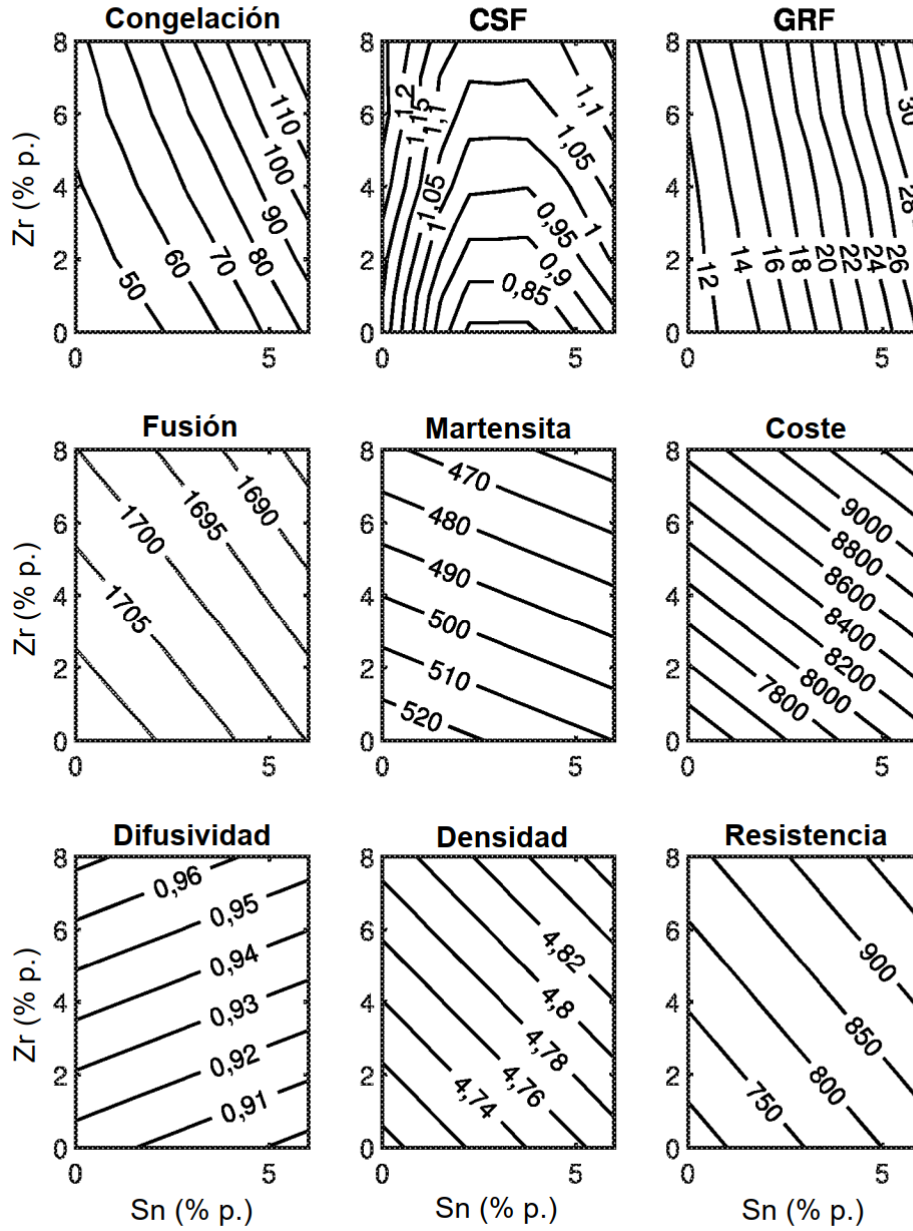


Figura 1: Mapas de contorno de los índices de calidad para el sistema Ti-5Al-5V-5Mo-YZr-XSn-0Fe-0Cr-0Nb.

Efecto de Mo-Cr sobre los índices de calidad

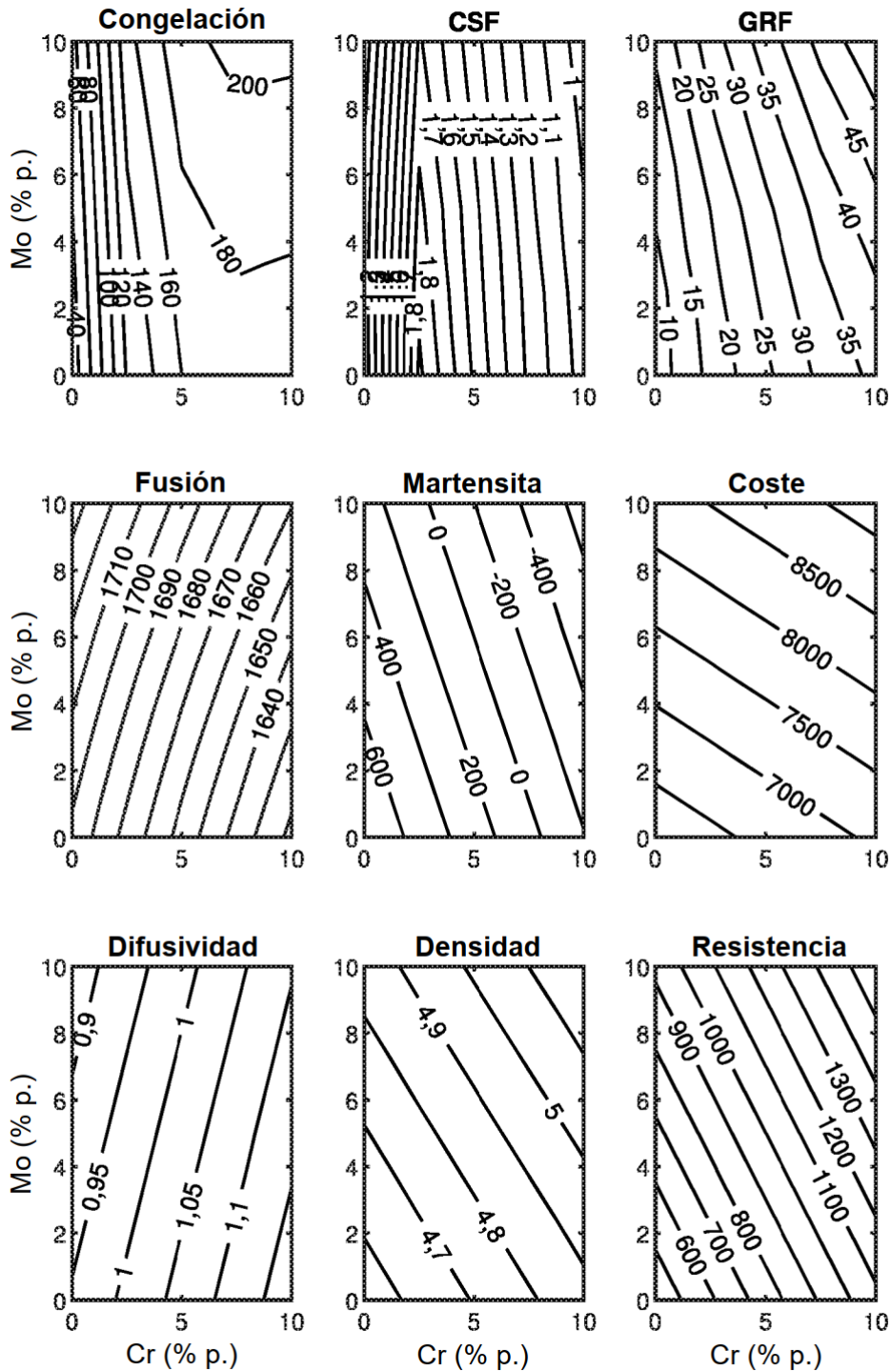


Figura 2: Mapas de contorno de los índices de calidad para el sistema Ti-5Al-5V-YMo-XCr-0Fe-0Sn-0Zr-0Nb.

Efecto de V-Fe sobre los índices de calidad

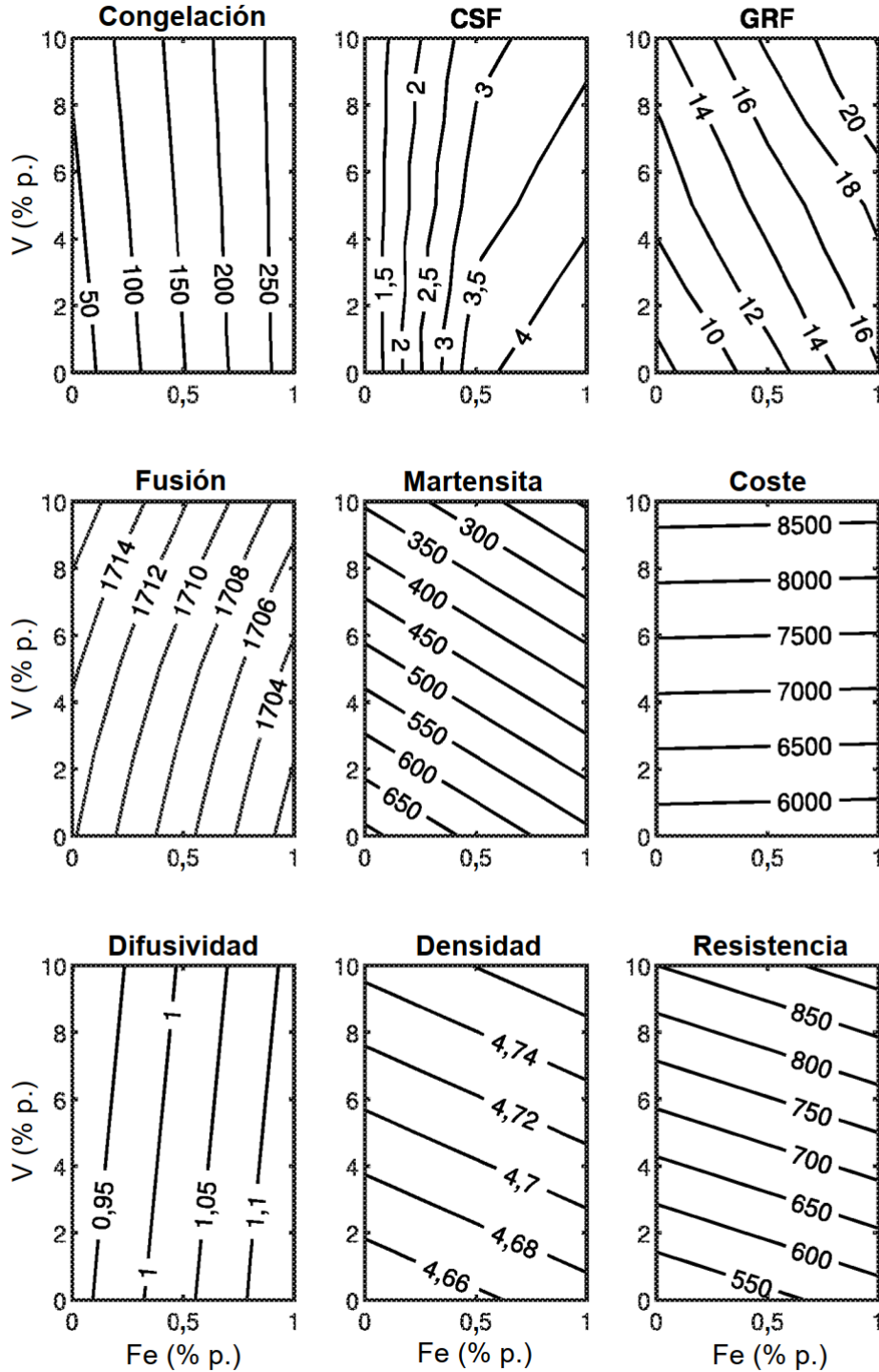


Figura 3: Mapas de contorno de los índices de calidad para el sistema Ti-5Al-5Mo-YV-XFe-0Zr-0Sn-0Cr-0Nb.

Efecto de Mo-Nb sobre los índices de calidad

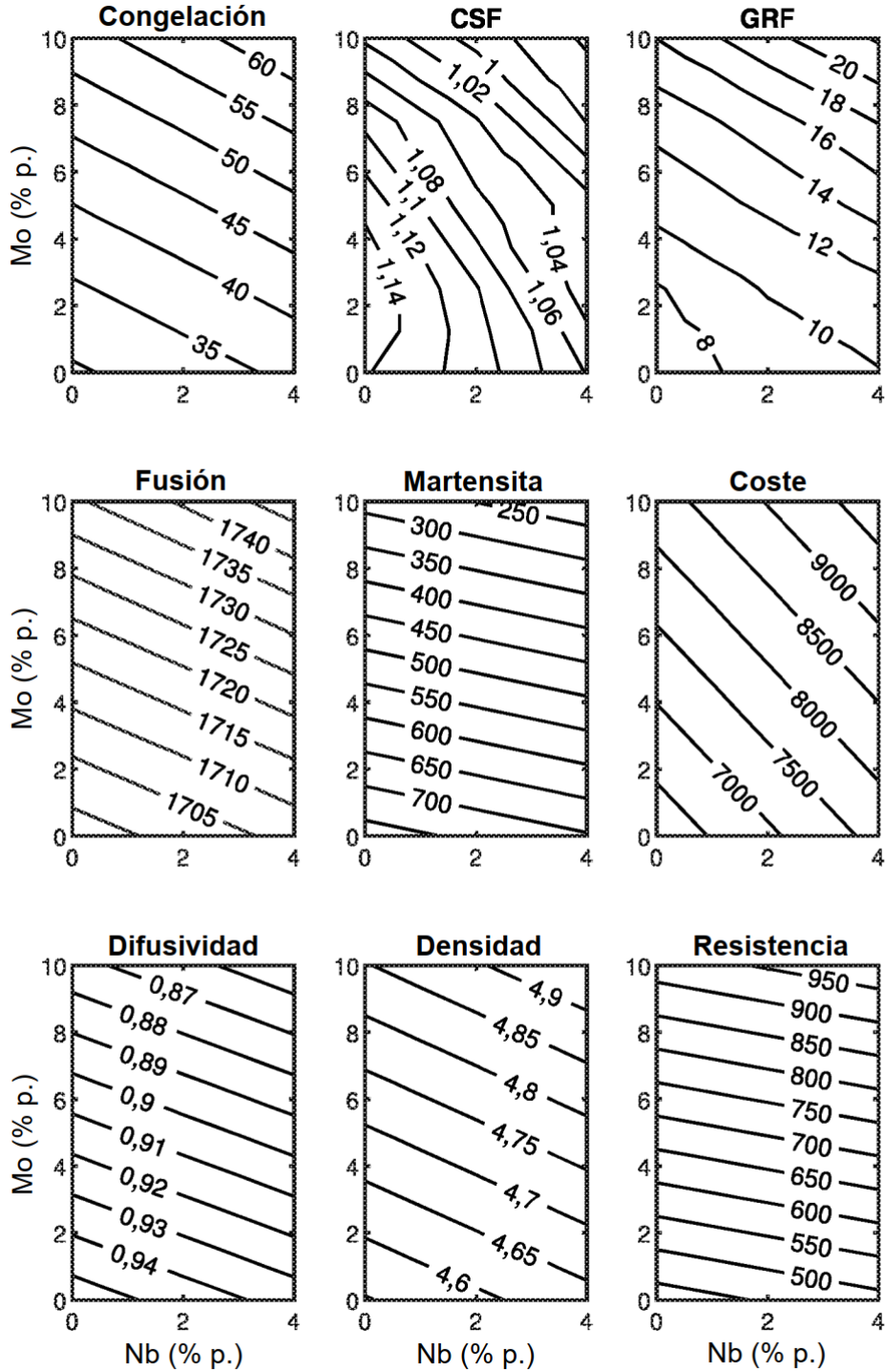


Figura 4: Mapas de contorno de los índices de calidad para el sistema Ti-5Al-5V-YMo-XNb-0Fe-0Cr-0Zr-0Sn.

Efecto de Al-Sn sobre los índices de calidad

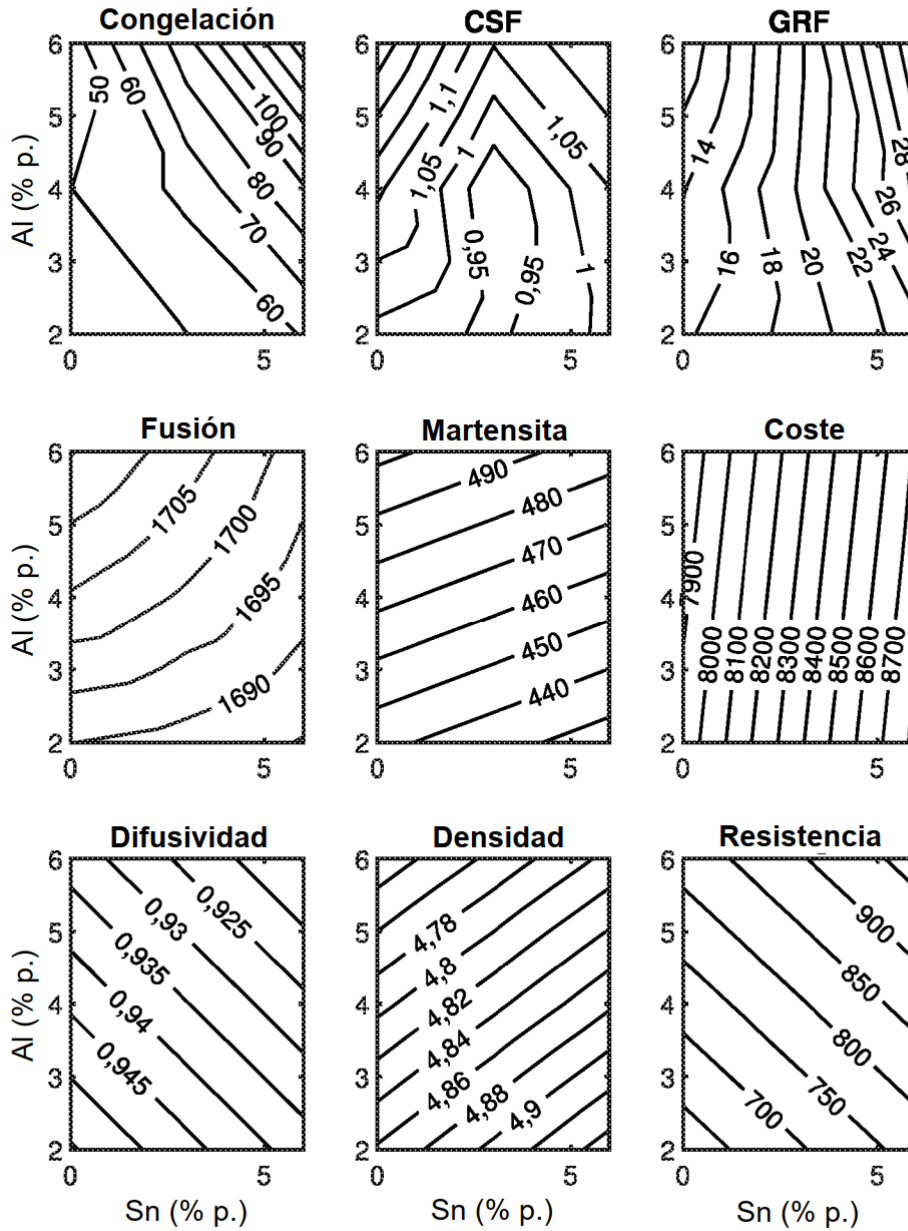


Figura 5: Mapas de contorno de los índices de calidad para el sistema Ti-4Mo-4V-YAl-XSn-0Fe-0Cr-4Zr-0Sn.

Factor	V	Fe	Mo	Zr	Cr	Nb	Sn
1 Intervalo de solidificación (intervalo seguro 100-275 °C)	↑	↑↑↑↑	↑	↑	↑↑↑	↑	↑↑
2 CSC (mejor cuanto más bajo)	-	↑↑↑	-	↑	↑↑	↓	↓
3 GRF (mejor cuanto más alto)	↑	↑↑	↑	↑	↑↑	↑↑	↑↑↑
4 Densidad (mejor cuanto más baja)	↑	↑↑	↑↑↑	↑	↑	↑↑	↑↑
5 M _s (intervalo óptimo 75-300 °C)	↓↓↓	↓↓↓↓	↓↓	↓	↓↓↓	↓	↓
6 Temperatura de fusión (mejor cuanto más baja)	↑	↓	↑	↑↑	↓↓	↑	↑↑
7 Resistencia beta (mejor cuanto más alta)	↑↑	↑↑↑↑	↑↑	↑	↑↑↑	↑	↑
8 Difusividad (mejor cuanto más baja)	↓	↑↑↑↑	↓↓↓	↑	↑↑	↓↓	↓

Figura 6: Efecto de las adiciones de aleaciones sobre los índices de calidad.

Diseño de las cinco fuerzas

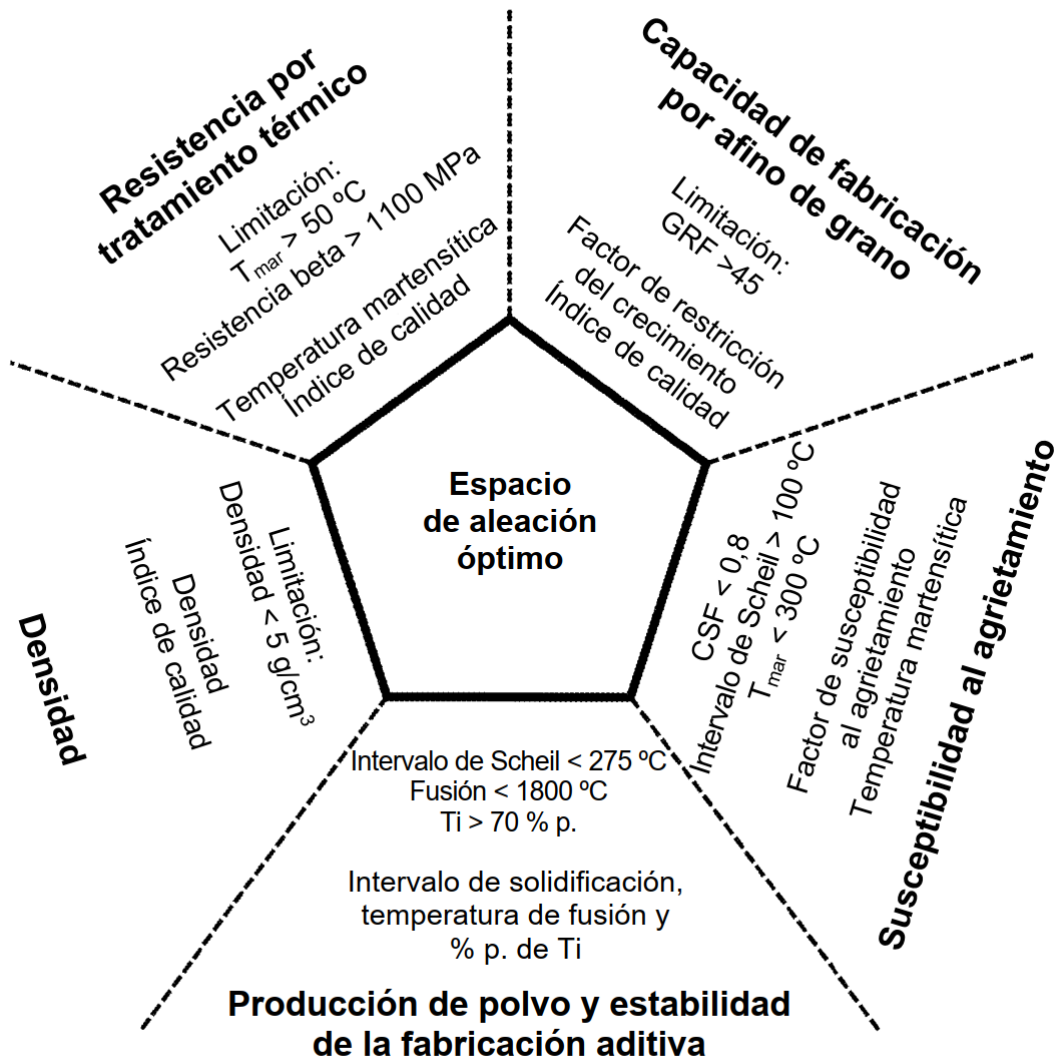


Figura 7: Restricciones al índice de calidad para aislar el espacio de aleación óptimo.

Intervalo de solidificación

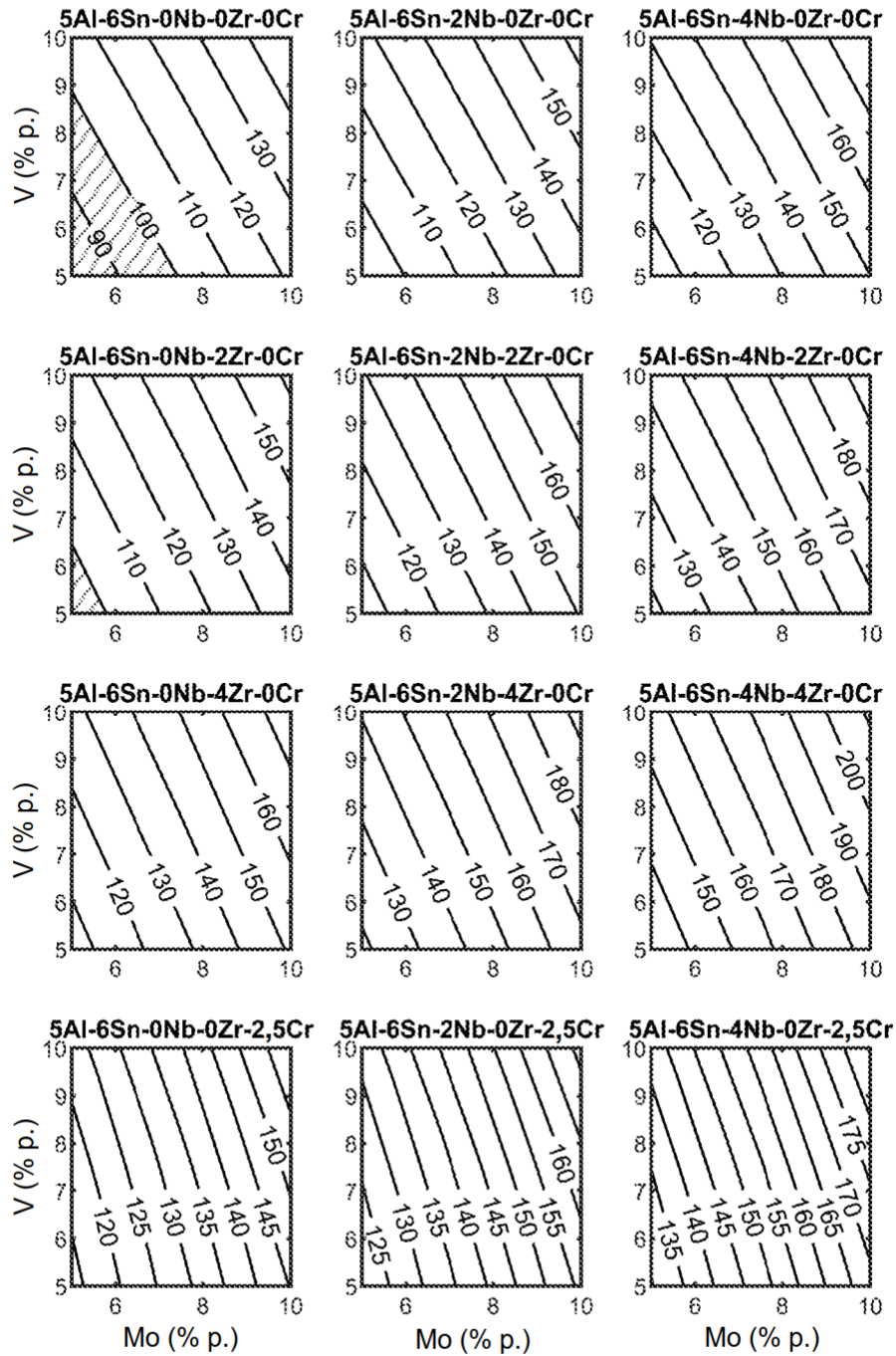


Figura 8: Mapa de contorno del intervalo de solidificación para el espacio de aleación preferido.

Susceptibilidad al agrietamiento

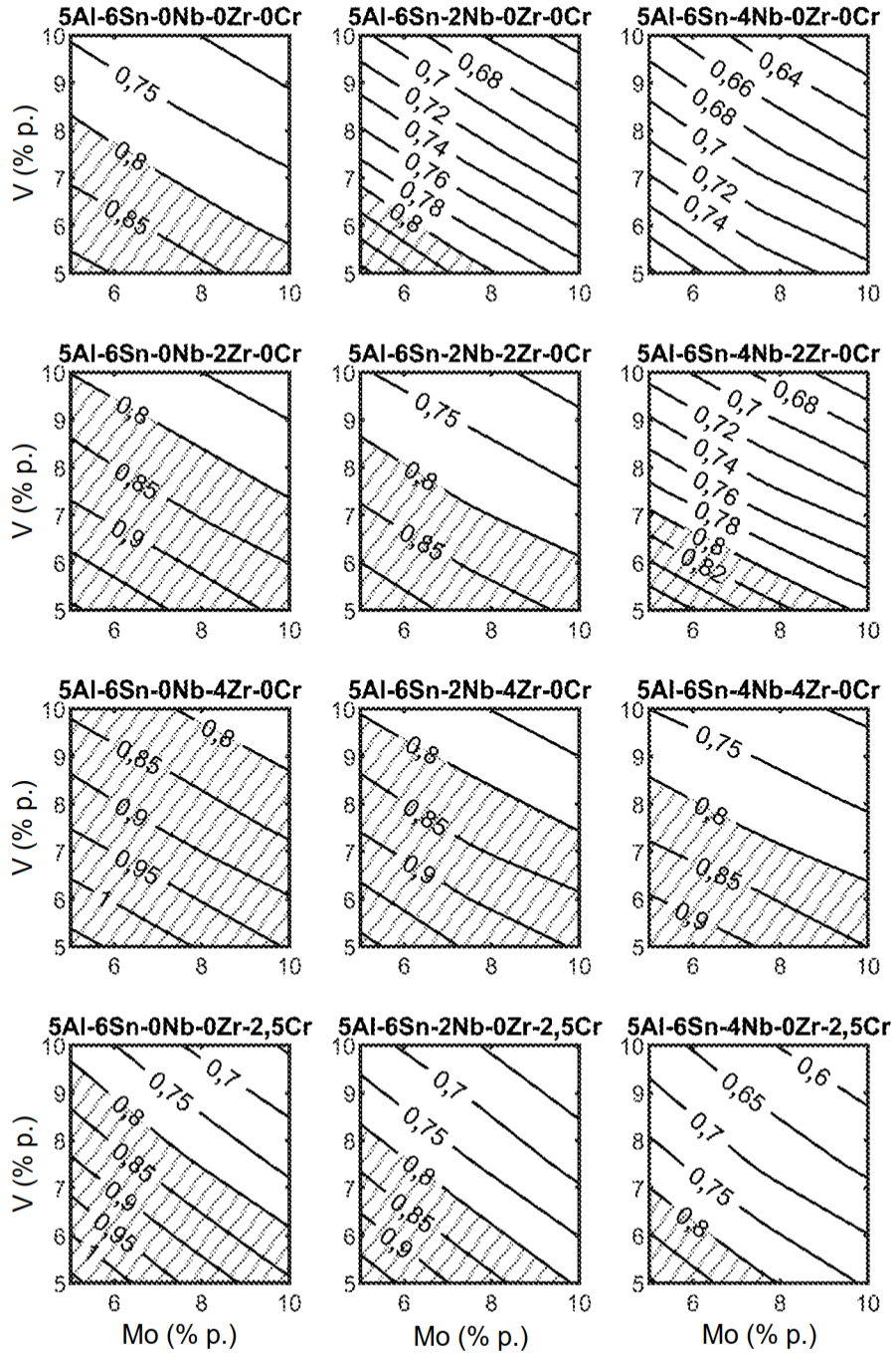


Figura 9: Mapa de contorno de la susceptibilidad al agrietamiento para el espacio de aleación preferido.

Factor de restricción del crecimiento

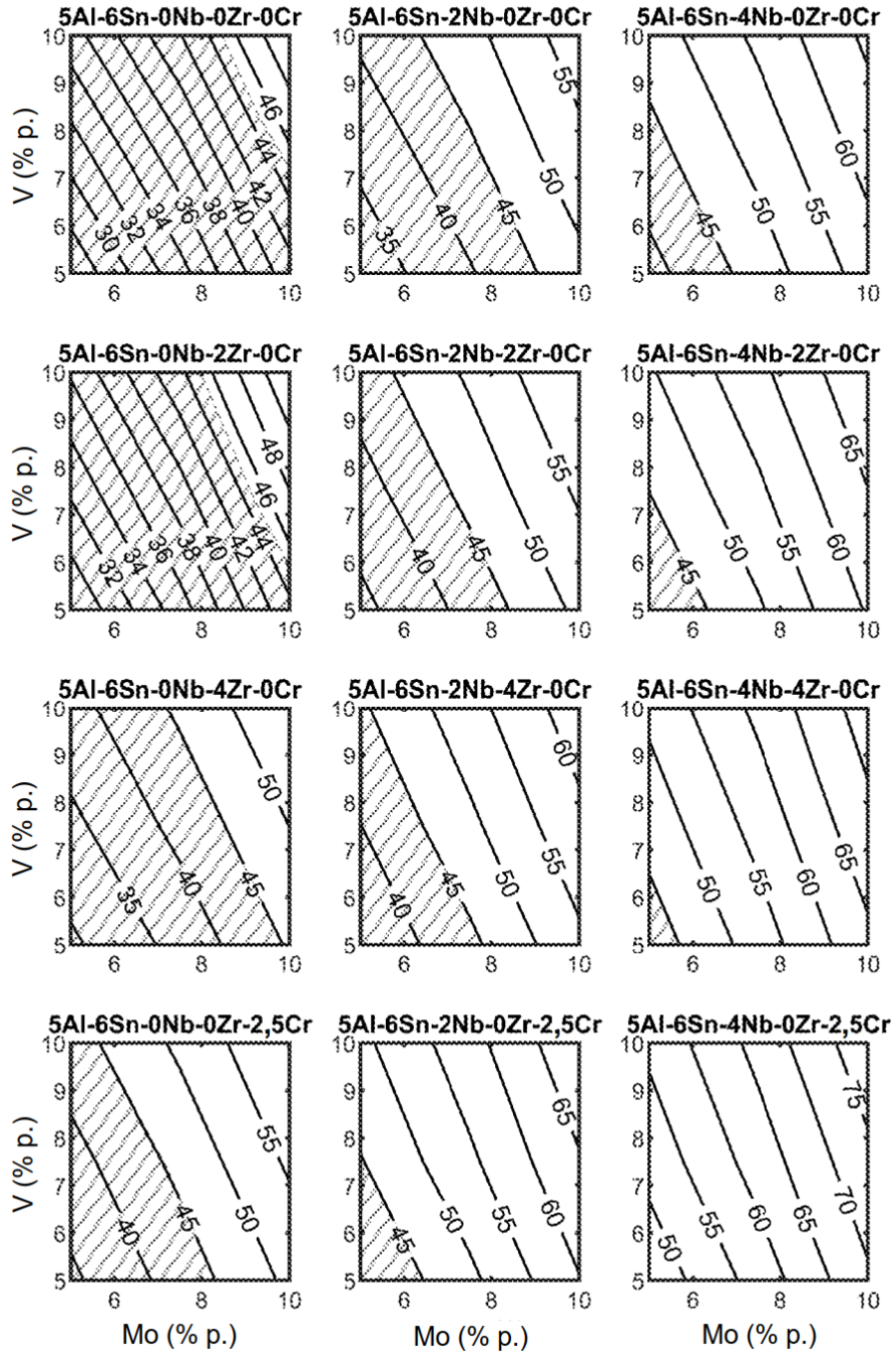


Figura 10: Mapa de contorno del factor de restricción del crecimiento para el espacio de aleación preferido.

Temperatura de fusión

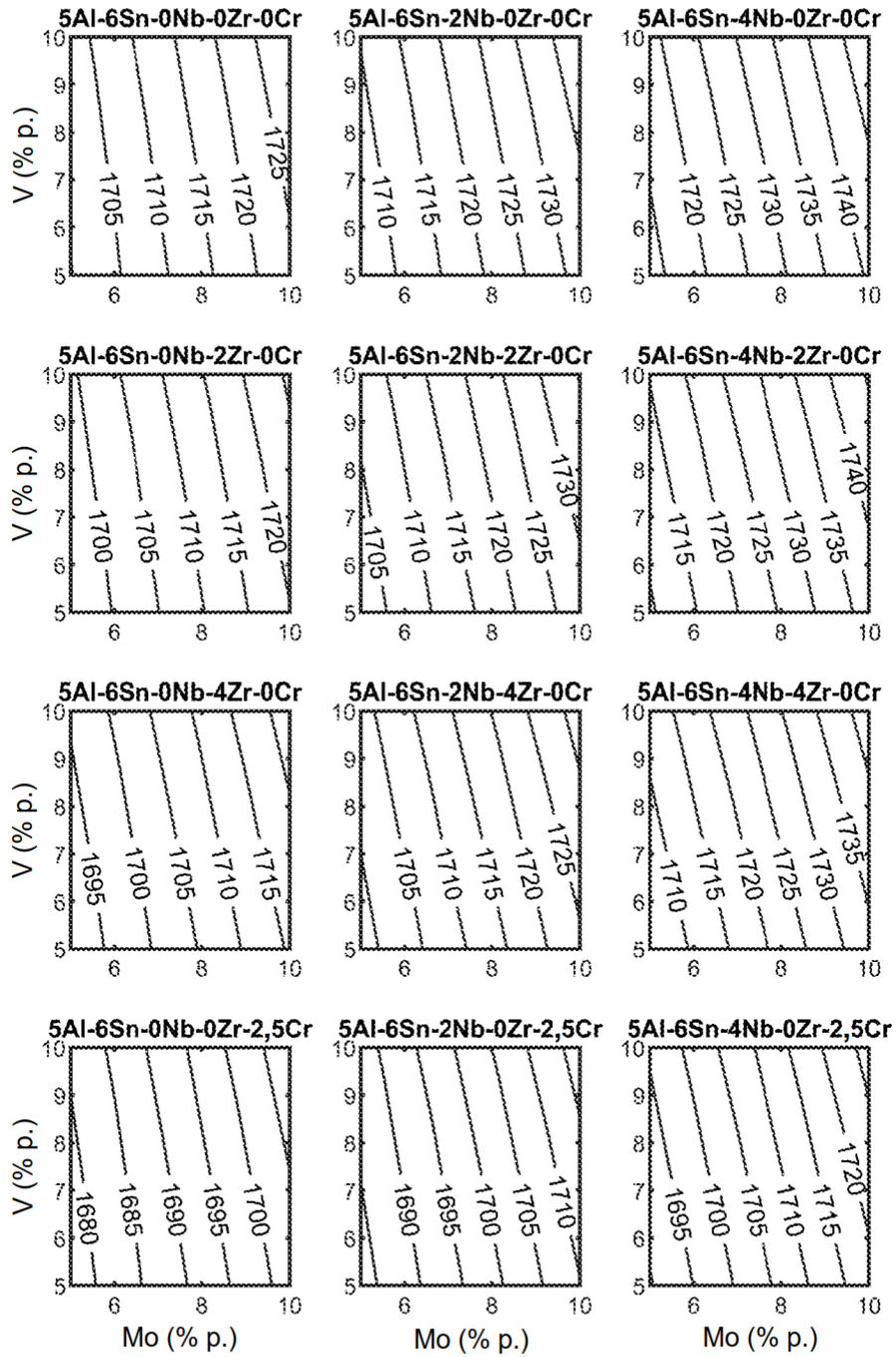


Figura 11: Mapa de contorno de la temperatura de fusión para el espacio de aleación preferido.

Temperatura de inicio martensítico

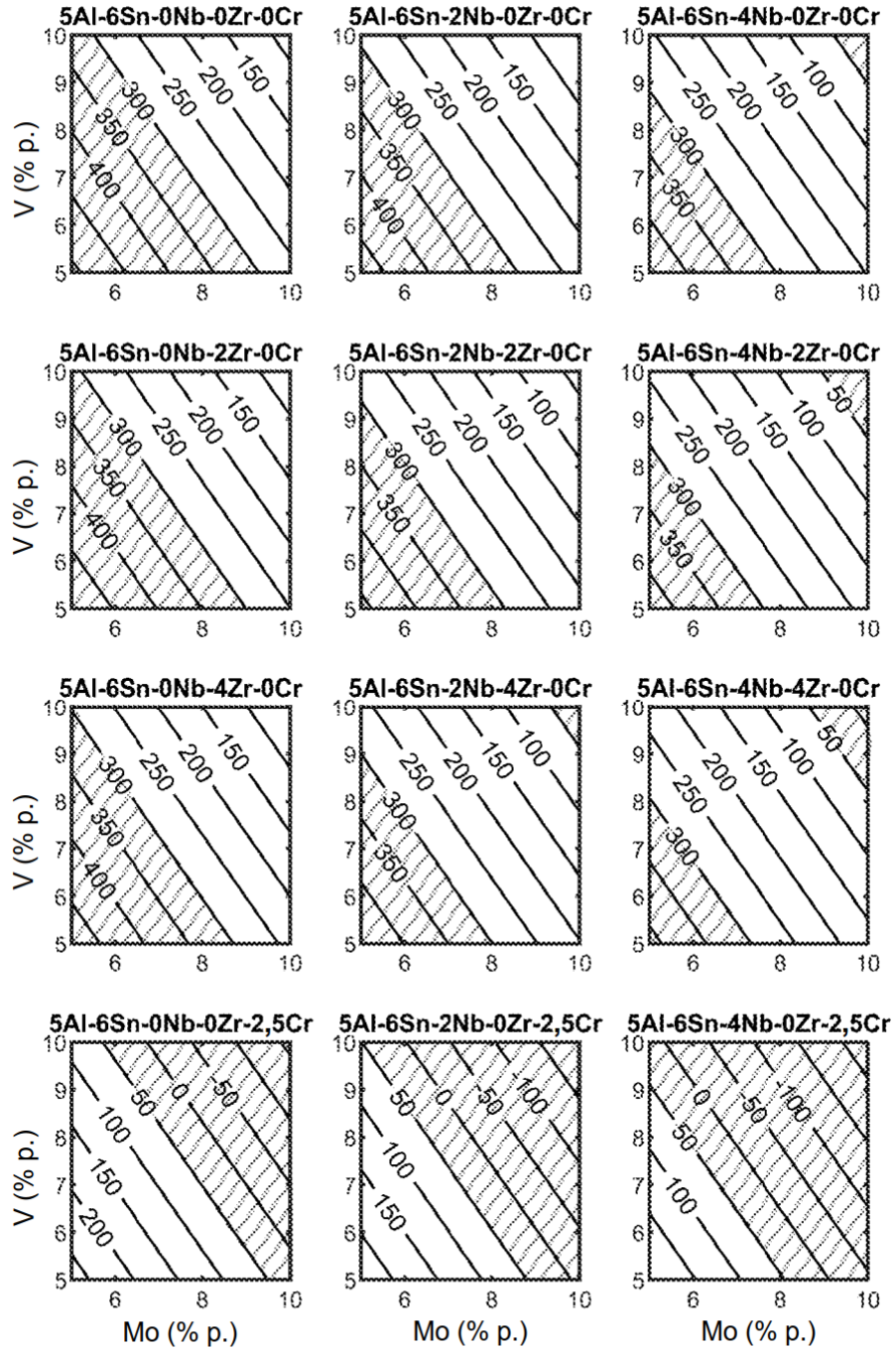


Figura 12: Mapa de contorno de la temperatura de inicio martensítico para el espacio de aleación preferido.

Coste de materias primas

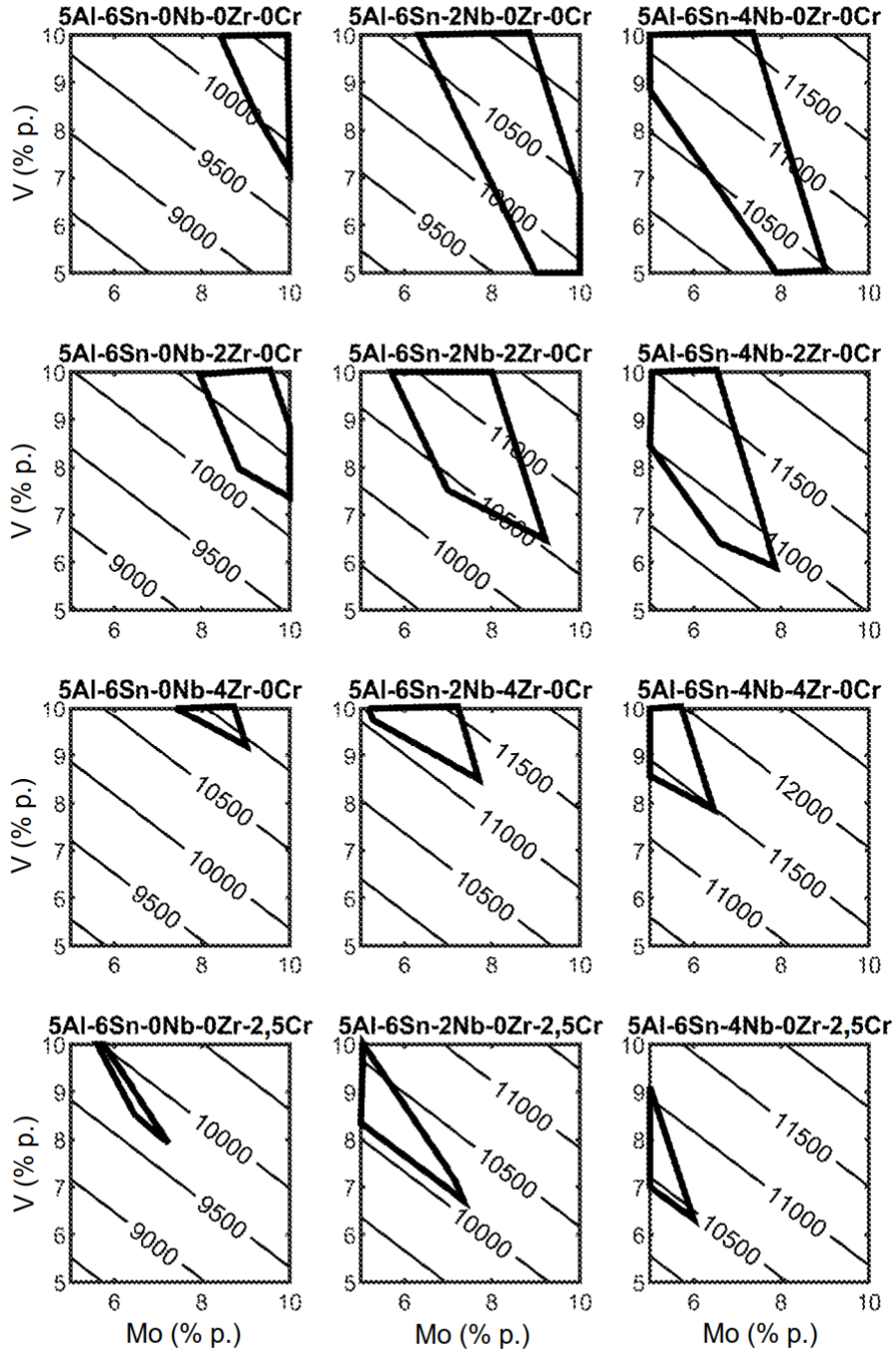


Figura 13: Mapa de contorno del coste de materias primas para el espacio de aleación preferido.

Difusividad normalizada

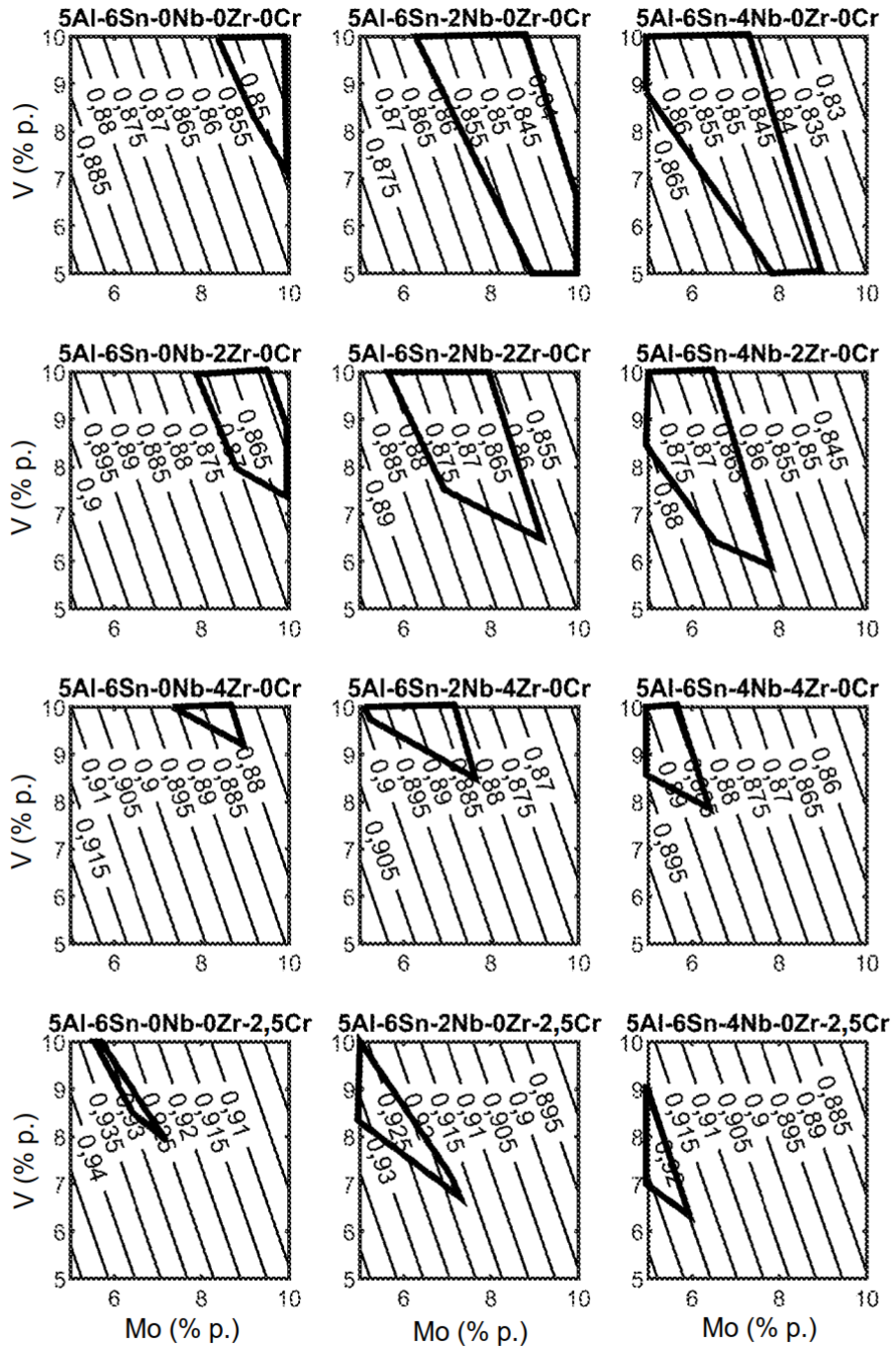


Figura 14: Mapa de contorno de la difusividad normalizada para el espacio de aleación preferido.

Densidad

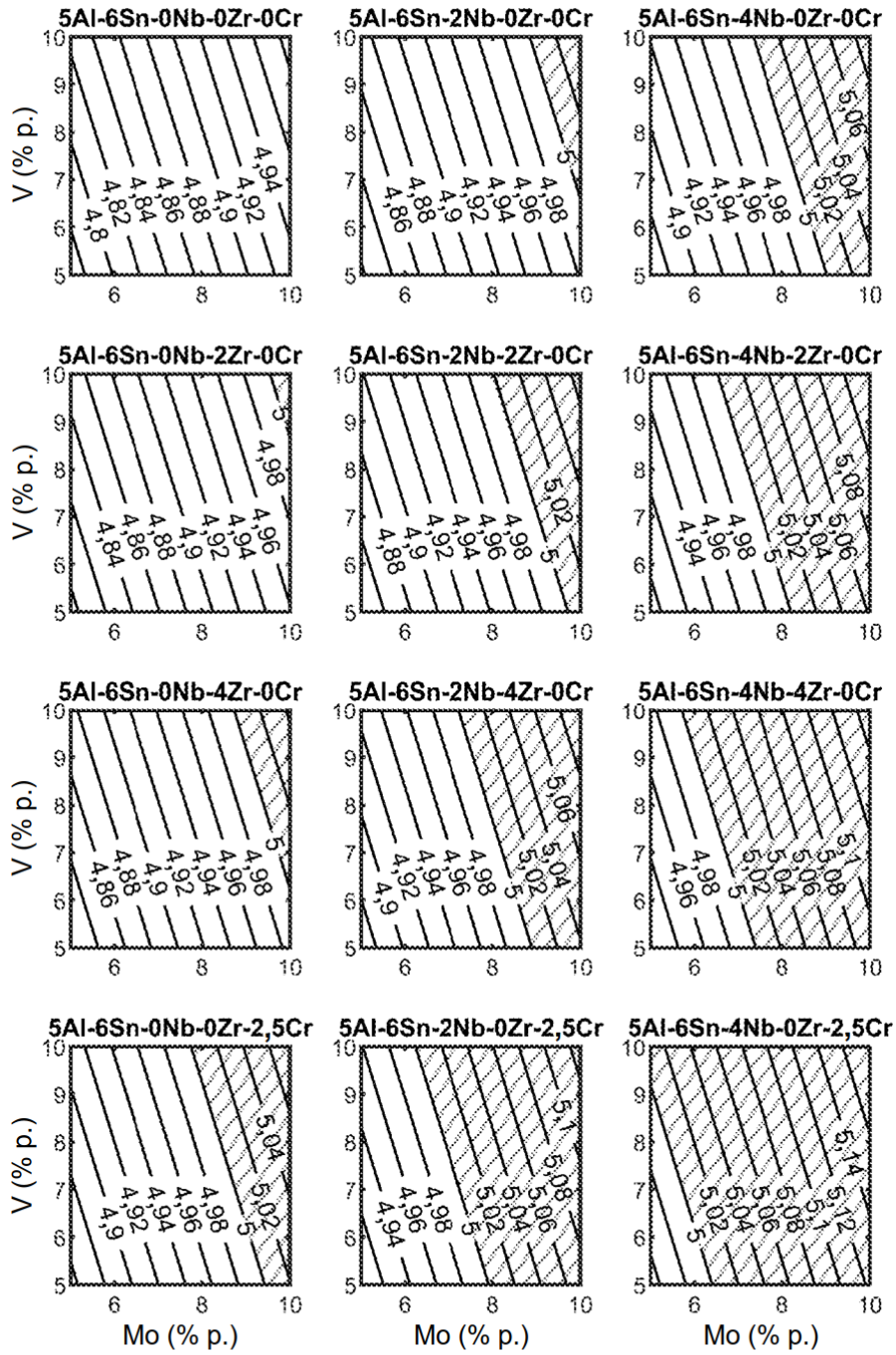


Figura 15: Mapa de contorno de la densidad para el espacio de aleación preferido.

Resistencia beta

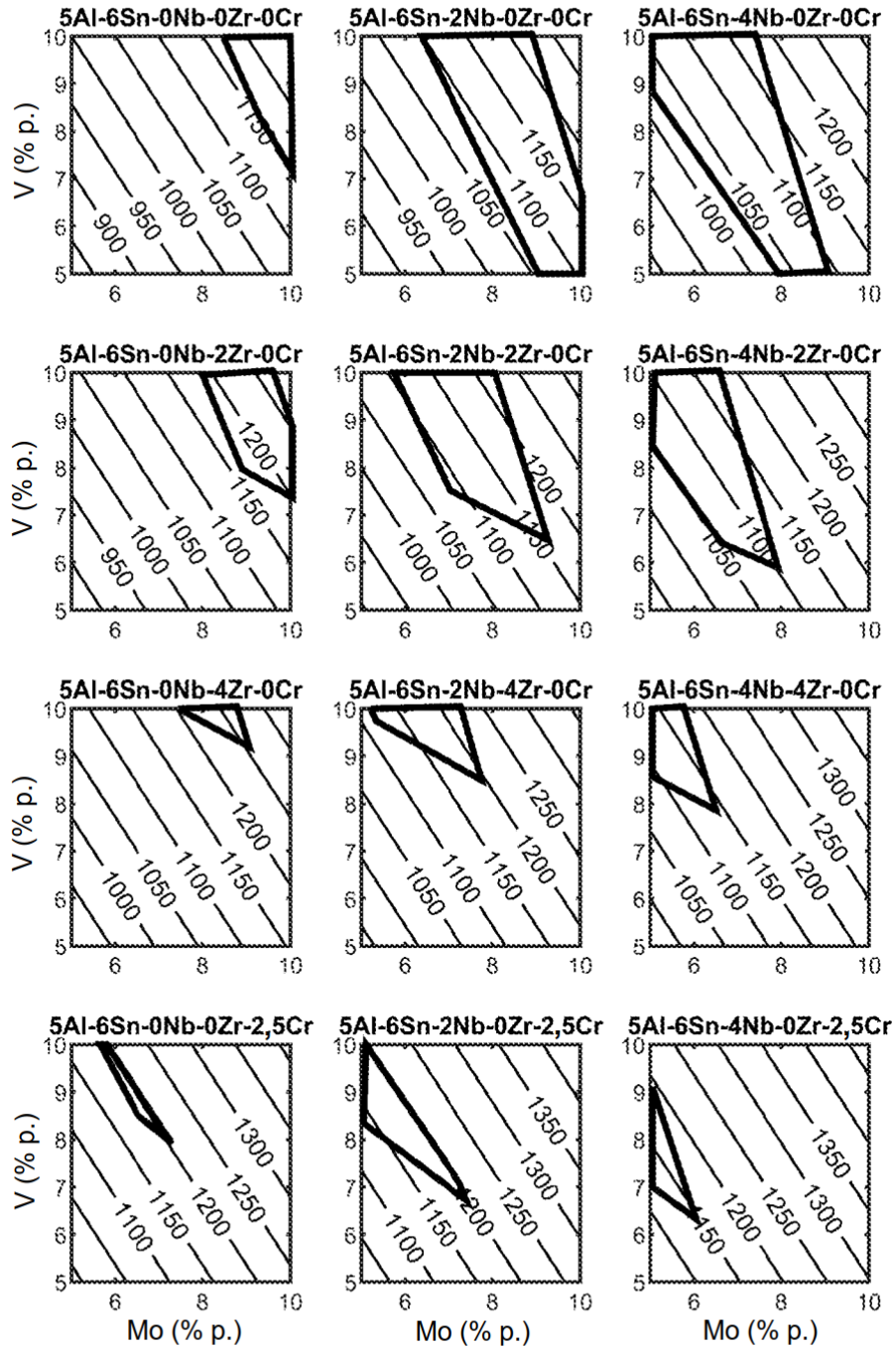


Figura 16: Mapa de contorno de la resistencia beta para el espacio de aleación preferido.

Espacio de aleación óptimo

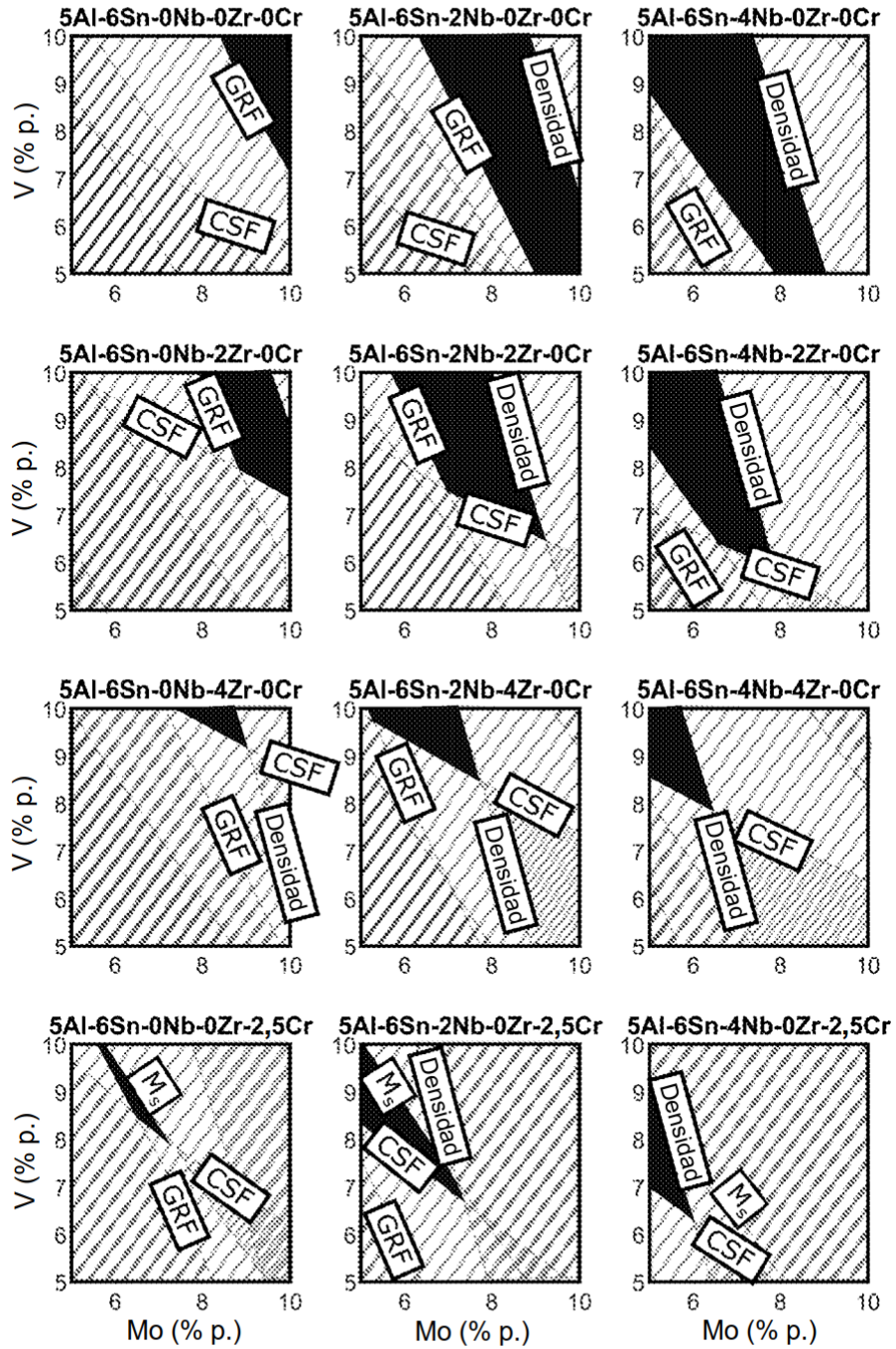


Figura 17: Espacio de aleación óptimo para el espacio de aleación preferido.

Aleaciones de referencia

	Aleaciones de referencia	Congel.	GRF	CSF	eq.	Mo	M _s	% p. Ti	Fusión	Densidad	Coste	Def	Resistencia	Idoneidad
1	Ti-10V-2Fe-3Al	392	28	3,1	9,5	258	85	1656	4,72	7638	1,38	550	CSF demasiado alto	Intervalo congelación demasiado alto Resistencia demasiado baja
2	Ti-15Mo-2,7Nb-3Al-0,25i	91	32	1	12,0	193	82	1746	5,10	9027	0,87	940,5	Intervalo congelación demasiado bajo	
3	Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr	227	39	1,5	15,3	-168	75	1640	5,01	9245	1,09	1300	M _s demasiado baja	
4	Ti-15V-3Al-3Sn-3Cr	110	26	1,4	11,9	85	79	1654	4,85	10108	1,02	945	GRF demasiado bajo	
5	Ti-13V-11Cr-3Al	155	43	0,9	23,3	-609	73	1595	5,05	9651	1,19	1320	M _s demasiado baja	
6	Ti-8Mo-8V-2Fe-3Al	453	39	3,0	16,2	-60	79	1693	4,95	8730	1,32	980	M _s demasiado baja Intervalo congelación demasiado alto CSF demasiado alto	
7	Ti-11Mo-6Zr-4,5Sn	75	31	1,0	10,0	302	83	1699	5,16	9090	0,98	782,5	Resistencia demasiado baja	
8	Ti-10V-2Fe-3Al	392	28	3,1	9,5	258	85	1656	4,72	7638	1,38	650	CSF demasiado alto Resistencia demasiado baja	
9	Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr	147	22	1,8	8,2	240	82	1690	4,79	7500	0,98	870	GRF demasiado bajo	
10	Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr-0,5Fe	227	27	2,3	9,6	165	81,5	1685	4,81	7477	1,09	907,5	CSF demasiado alto	
11	Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr-1Zr	157	23	1,8	8,0	233	81	1688	4,80	7679	0,99	890	GRF demasiado bajo	
12	Ti-15Mo-3Al-3Nb	65	32	0,7	12,0	193	82	1746	5,10	9153	0,87	945	Intervalo congelación demasiado bajo	
13	Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr	227	39	1,5	15,3	-168	75	1640	5,01	9245	1,09	1100	M _s demasiado baja	
14	Ti-5Al-5V-5Mo-1Cr-1Fe	292	23	3,3	7,9	282	83	1695	4,76	7269	1,15	815	CSF demasiado alto Intervalo congelación demasiado alto	

Figura 18: Propiedades de las aleaciones de referencia.

Aleaciones de ejemplo

Aleaciones de ejemplo*	Congel.	GRF	CSF	eq. Mo	M ₅	% p. Ti	Fusión	Densidad	Coste	Def	Resistencia
1 Ti-5Al-6Sn-8V-6Mo-2Nb-2,5Cr	133,6	49	0,778	10,36	75,85	78,5	1691,1	4,9696	10591	1	1172,5
2 Ti-5Al-6Sn-8V-6Mo-2Nb-2Cr-1,5Zr	147,1	51	0,8	9,85	65,35	77	1687,9	4,9899	10860	1,02	1202,5
3 Ti-5Al-6Sn-9,5V-5,5Mo-4Nb-4Zr	158,5	52	0,763	6,198	222,9	76	1714	4,987	12264	0,99	1147,5
4 Ti-5Al-6Sn-7,5V-7Mo-4Nb-2Zr	149,3	52	0,759	6,692	237,4	78,5	1723,2	4,9874	11620	0,97	1112,5
5 Ti-5Al-6Sn-9V-9Mo-2Zr	147,1	47	0,761	9,697	151,9	75	1719	4,97	10817	0,93	1205
6 Ti-5Al-6Sn-8,5V-8Mo-2Nb-2Zr	149,3	50	0,746	8,362	185,4	76,5	1721,4	4,9815	11294	0,95	1167,5
7 Ti-5Al-6Sn-9,5V-8Mo-2Nb-0,5Zr	144,6	50	0,683	9,282	158,9	77	1725,3	4,9723	11328	0,93	1172,5
8 Ti-5Al-6Sn-10V-8Mo-4Zr	155,4	47	0,789	9,033	149,9	73	1711,2	4,975	11265	0,95	1230

*todas las aleaciones de ejemplo contienen 0,1 % B

Figura 19: Propiedades de los ejemplos propuestos.

Espacio de aleación óptimo

Reivindicación 1*	Al	Sn	V	Mo	Nb	Zr	Cr	Fe	B
Límite inferior	3	0	3	3	0	0	0	0	0
Límite superior	7	7	10	10	5	6	4	0,5	0,5

*se muestran solo elementos principales

mientras que: $0,027V + 0,178Fe + 0,055Mo + 0,016Zr + 0,044Cr + 0,033Nb + 0,053Sn > 1,0$

Figura 20: Intervalo químico del espacio de aleación óptimo.

Restricciones para el espacio de aleación óptimo

Aleaciones de referencia	Al	V	Fe	Mo	Zr	Cr	Nb	Sn	GRF		CSF	
									Umbral	Real	Umbral	Real
1	*	3	10	2	0	0	0	0	0,63	28	7,83	3,12
2	*	3	0	0	15	0	0	2,7	0,82	32	-0,15	1,20
3	*	3	8	0	4	4	6	0	0,82	39	1,42	1,31
4	*	3	15	0	0	0	3	3	0,74	28	0,06	1,43
5	*	3	13	0	0	0	11	0	0,88	43	2,38	0,96
6	*	3	8	2	8	0	0	0	0,86	39	1,77	1,00
7	*	0	0	0	11	6	0	0	0,88	31	-0,45	0,96
8	*	3	10	2	0	0	0	0	0,63	28	7,83	3,12
9		5	5	0	5	0	3	0	0,55	22	0,70	1,78
10		5	5	0,5	5	0	3	0	0,64	27	2,70	2,26
11		5	5	0	5	1	3	0	0,57	23	0,78	1,85
12	*	3	0	0	15	0	0	3	0,83	32	-0,16	0,65
13	*	3	8	0	4	4	6	0	0,82	39	1,42	1,31
14	*	5	5	1	5	0	1	0	0,81	23	4,22	3,23

*Fuera del intervalo de la Reivindicación 1

Ejemplos	Al	V	Fe	Mo	Zr	Cr	Nb	Sn	GRF		CSF	
									Umbral	Real	Umbral	Real
1	5	8	0	6	0	2,5	2	6	1,04	49	-0,24	0,78
2	5	8	0	6	2	2	1,5	6	1,03	51	-0,27	0,80
3	5	9,5	0	5,5	4	0	4	6	1,05	52	-0,76	0,76
4	5	7,5	0	7	2	0	4	6	1,03	52	-0,80	0,76
5	5	9	0	9	2	0	0	6	1,04	47	-0,80	0,76
6	5	8,5	0	8	2	0	2	6	1,04	50	-0,81	0,75
7	5	9,5	0	8	0,5	0	2	6	1,04	50	-0,89	0,68
8	5	10	0	8	4	0	0	6	1,05	47	-0,74	0,79

Ecuaciones umbral

GRF $0,027V + 0,178Fe + 0,055Mo + 0,016Zr + 0,044Cr + 0,033Nb + 0,053Sn > 1,0$
 CSF $0,041Al - 0,03V + 4Fe - 0,015Mo + 0,037Zr + 0,24Cr - 0,02Nb - 0,112Sn < 0,0$

Figura 21: Relación que restringe el espacio de aleación óptimo.

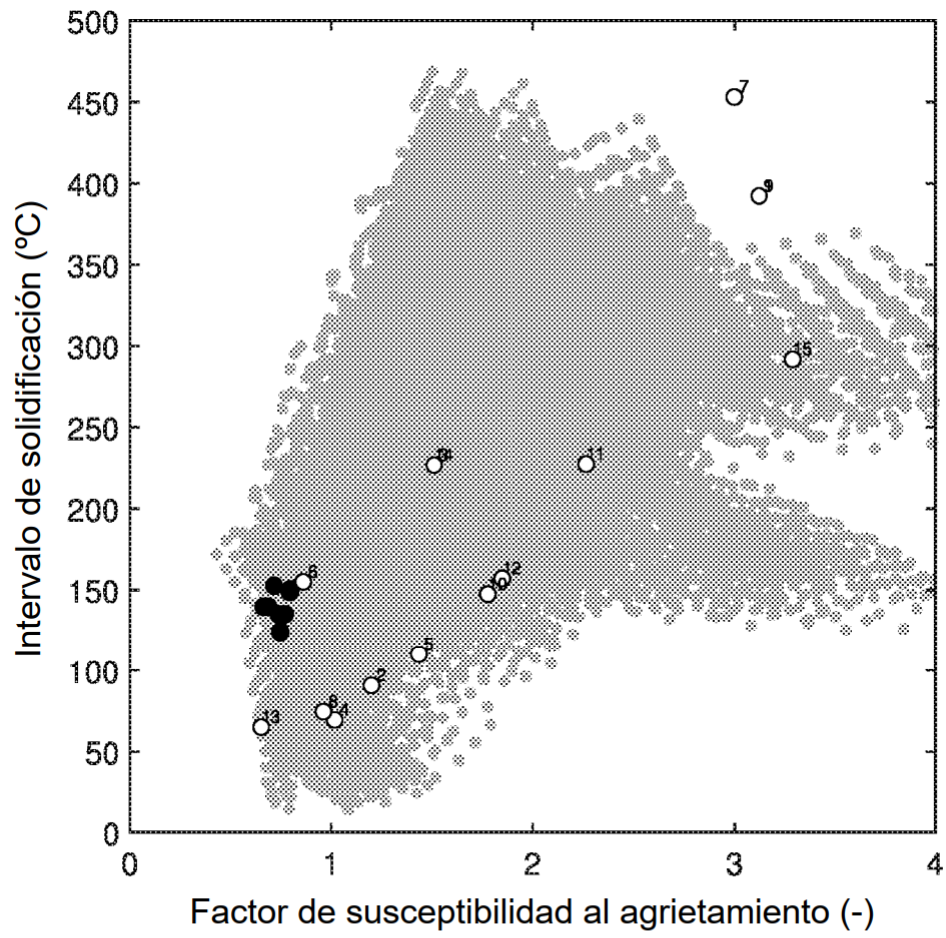


Figura 22: Diagrama de dispersión del factor de susceptibilidad al agrietamiento frente al intervalo de solidificación.

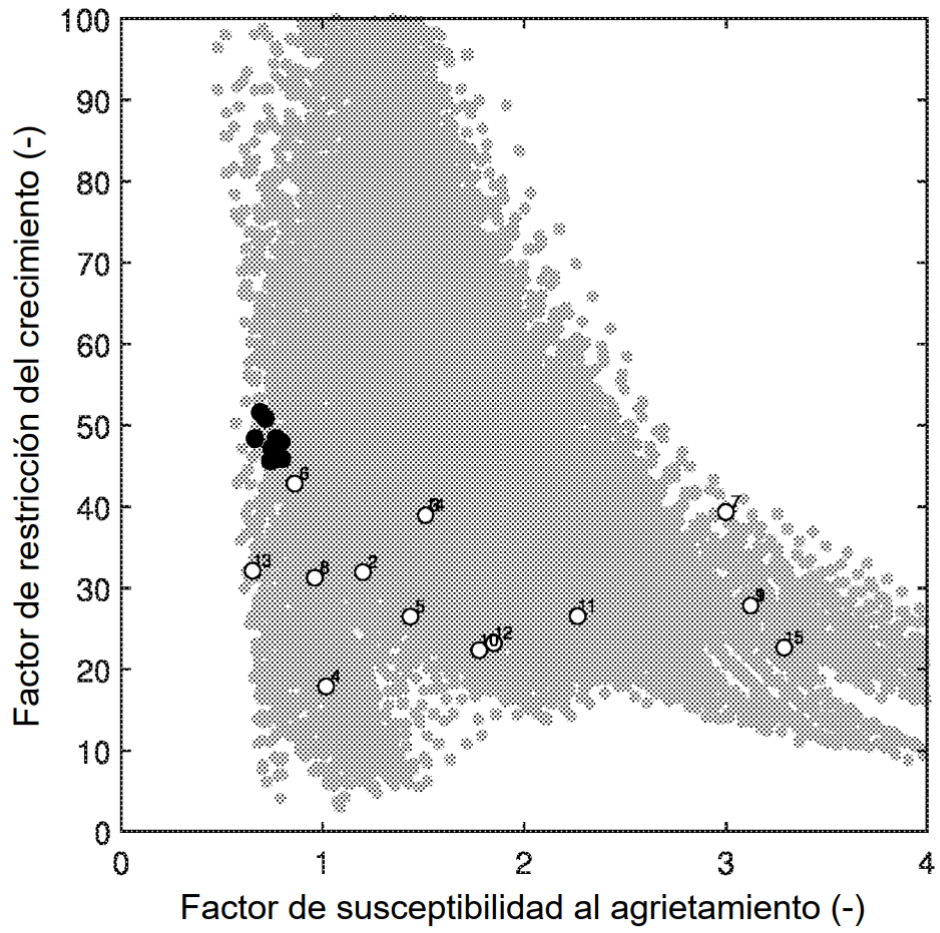


Figura 23: Diagrama de dispersión del factor de susceptibilidad al agrietamiento frente al factor de restricción del crecimiento.

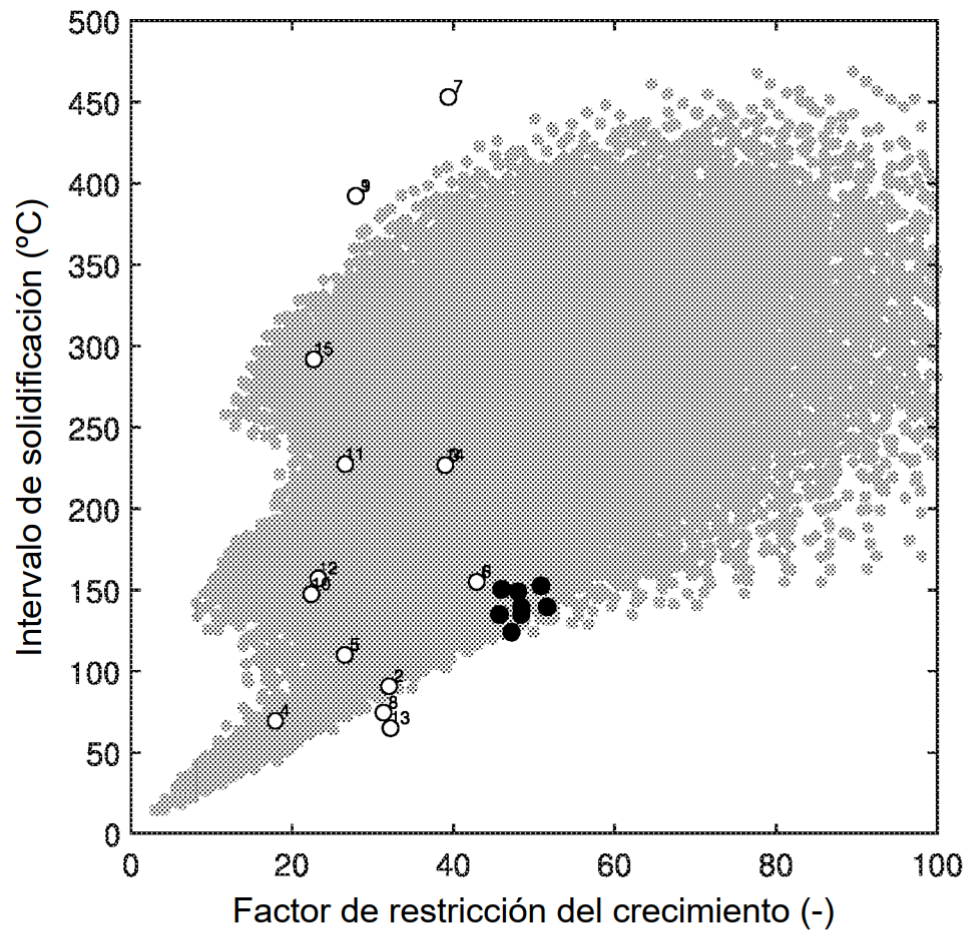


Figura 24: Diagrama de dispersión del factor de restricción del crecimiento frente al intervalo de solidificación.

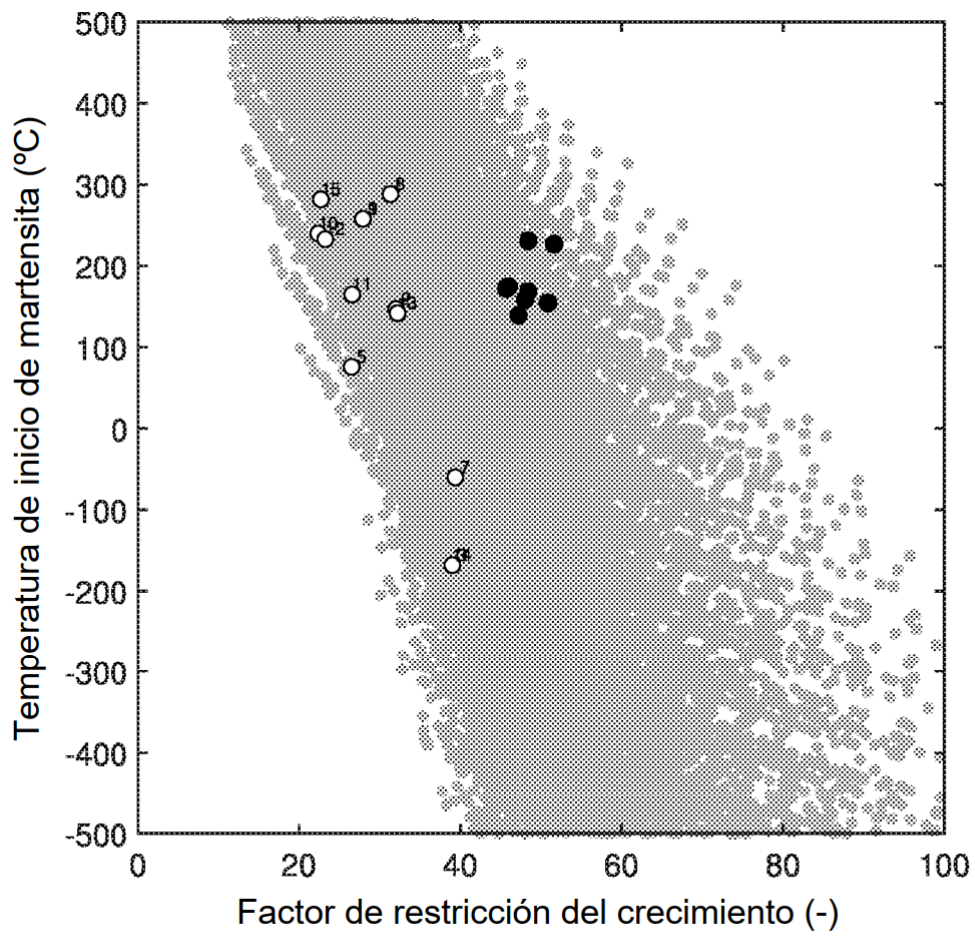


Figura 25: Diagrama de dispersión del factor de restricción del crecimiento frente a la temperatura de inicio de martensita.

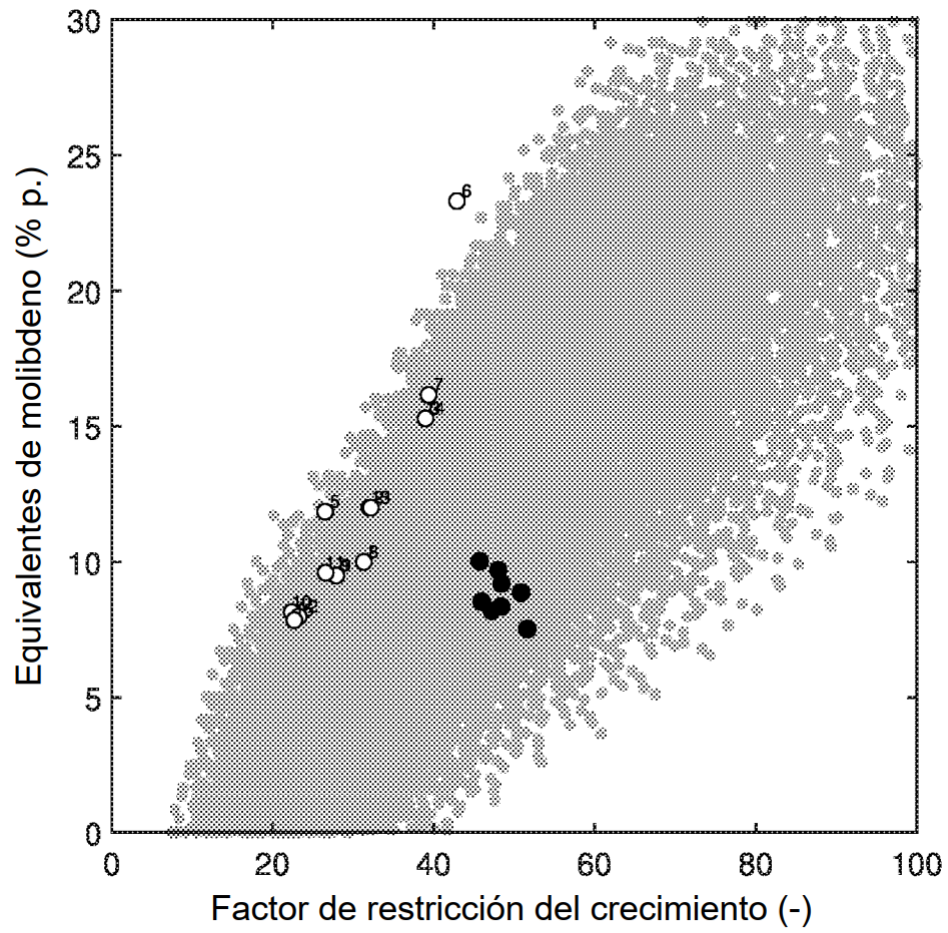


Figura 26: Diagrama de dispersión del factor de restricción del crecimiento frente al valor de equivalentes de molibdeno.

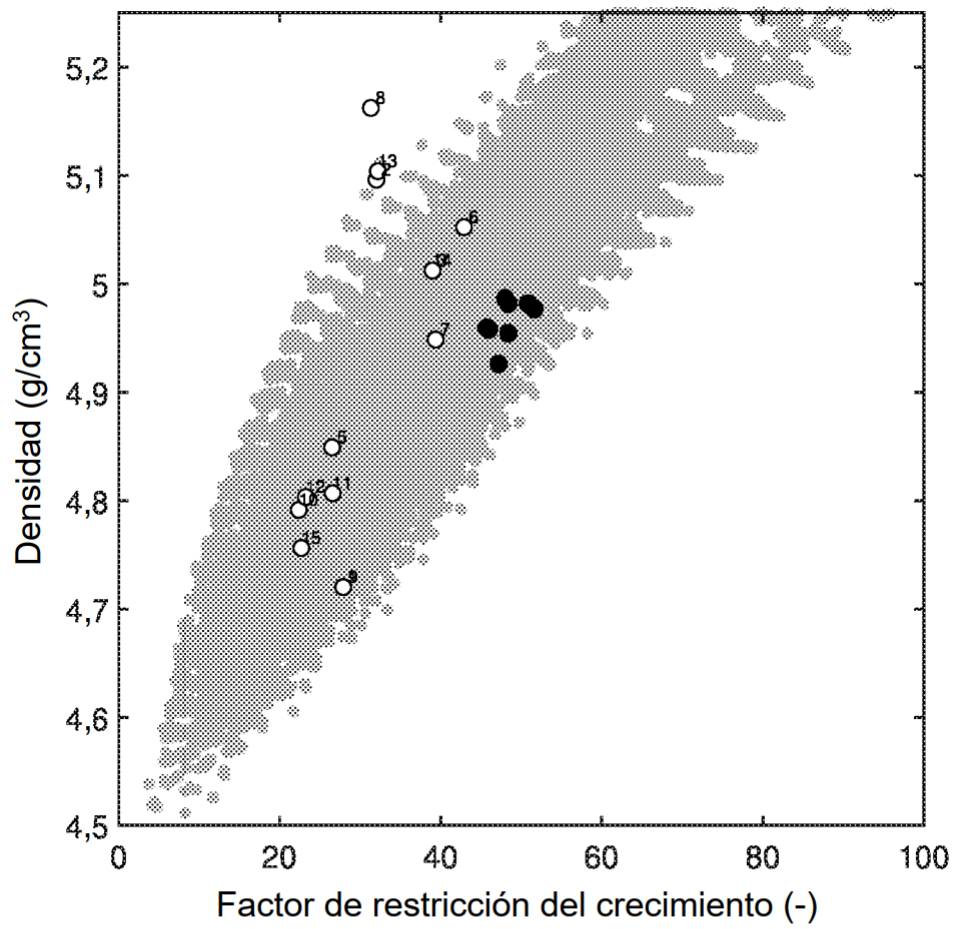


Figura 27: Diagrama de dispersión del factor de restricción del crecimiento frente a la densidad.

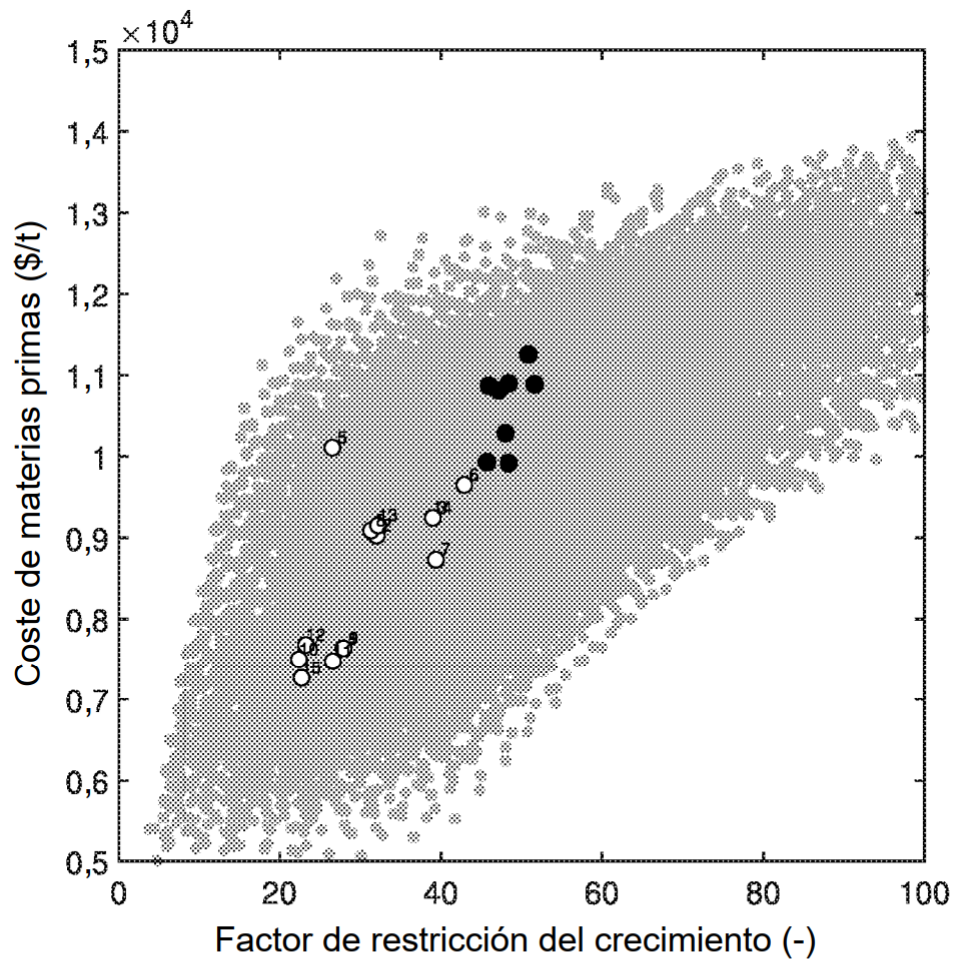


Figura 28: Diagrama de dispersión del factor de restricción del crecimiento frente al coste de las materias primas.

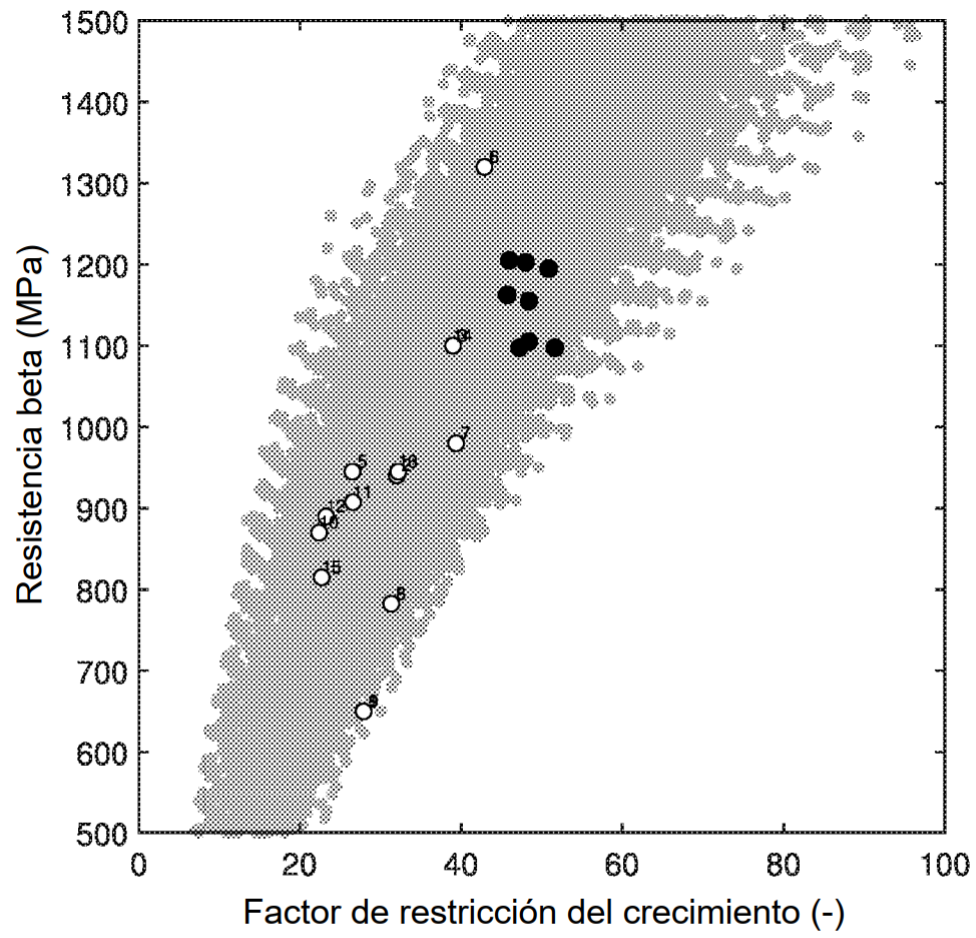


Figura 29: Diagrama de dispersión del factor de restricción del crecimiento frente a la resistencia beta.

Efecto de Zr-Sn sobre los índices de calidad

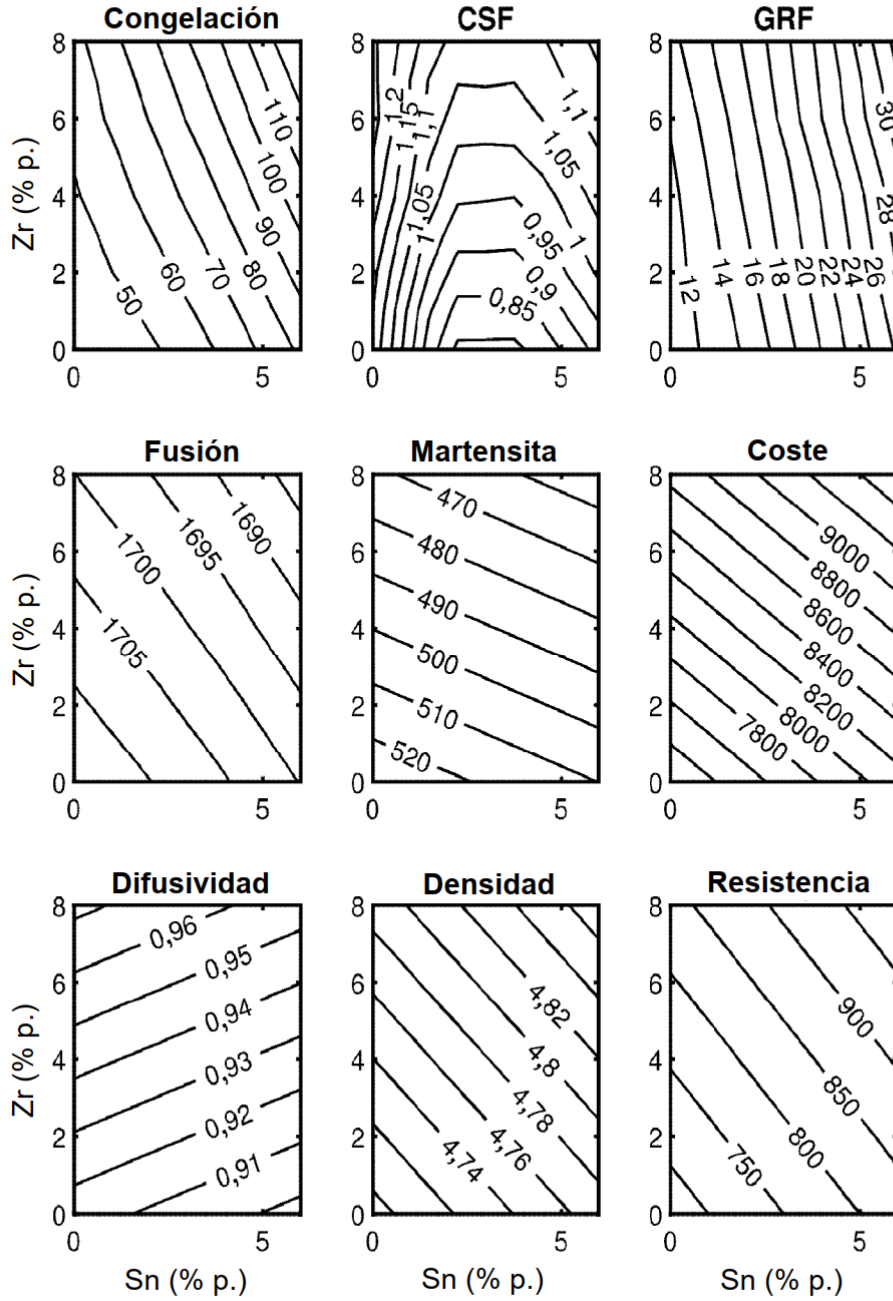


Figura 1: Mapas de contorno de los índices de calidad para el sistema Ti-5Al-5V-5Mo-YZr-XSn-0Fe-0Cr-0Nb.

Efecto de Mo-Cr sobre los índices de calidad

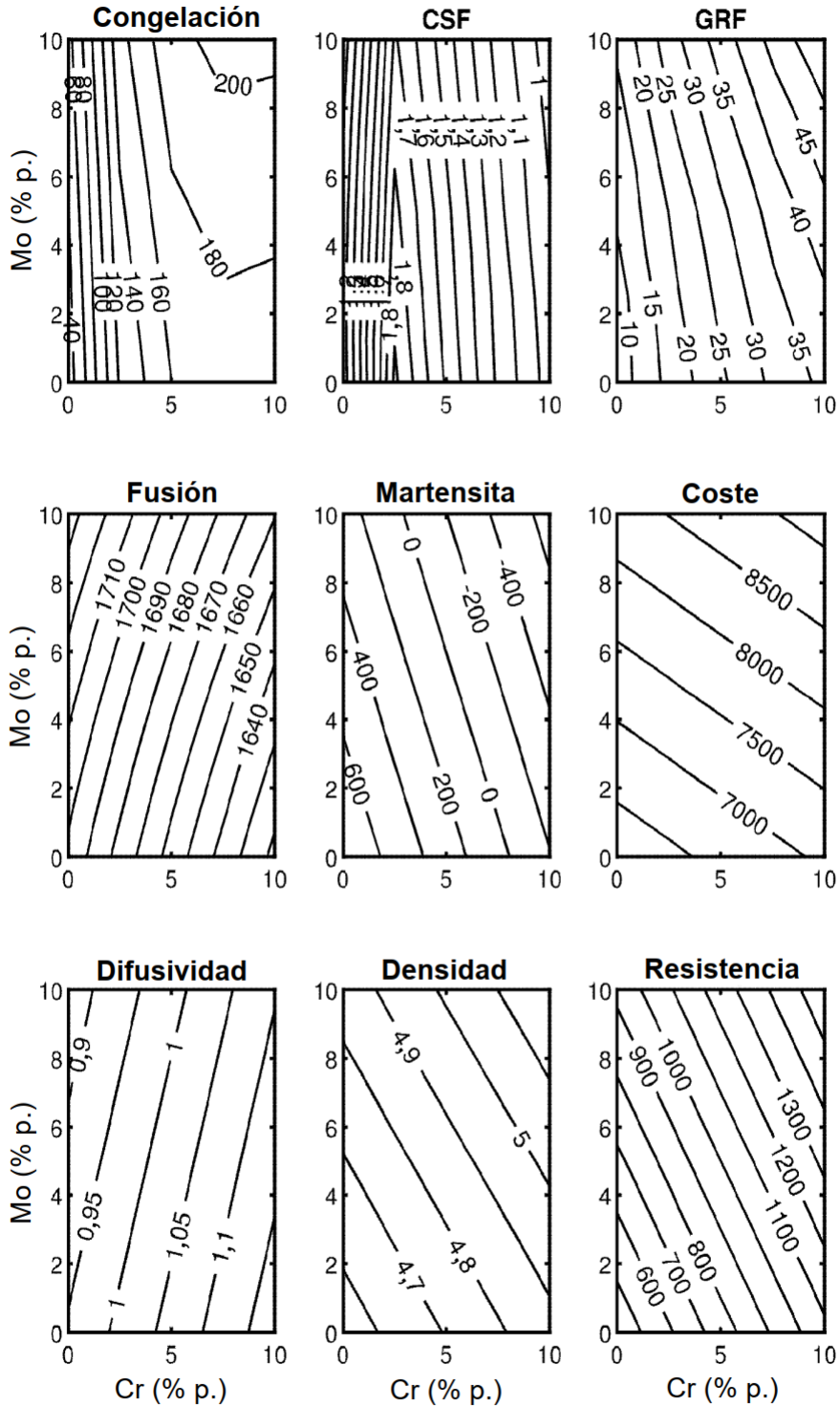


Figura 2: Mapas de contorno de los índices de calidad para el sistema Ti-5Al-5V-YMo-XCr-0Fe-0Sn-0Zr-0Nb.

Efecto de V-Fe sobre los índices de calidad

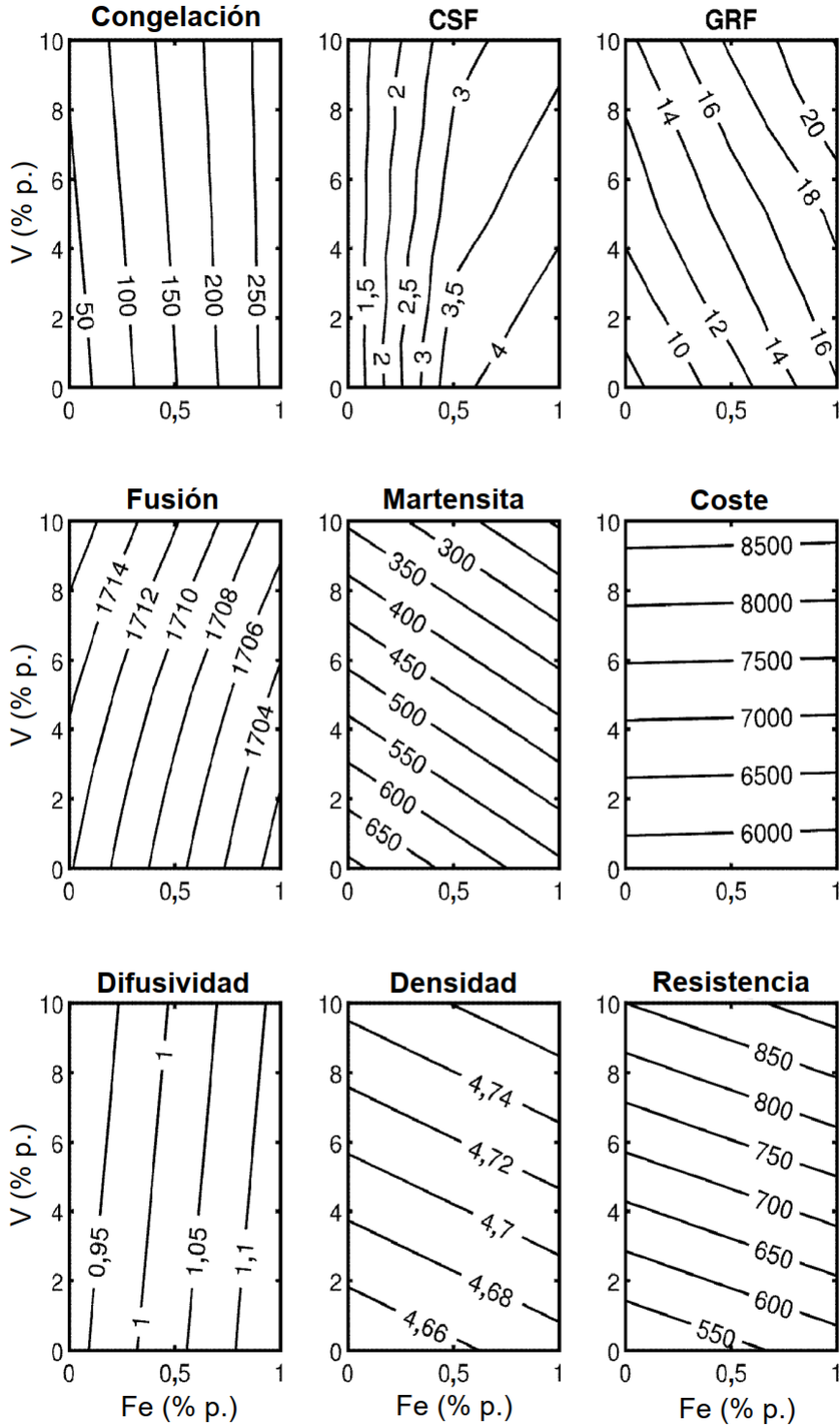


Figura 3: Mapas de contorno de los índices de calidad para el sistema Ti-5Al-5Mo-YV-XFe-0Zr-0Sn-0Cr-0Nb.

Efecto de Mo-Nb sobre los índices de calidad

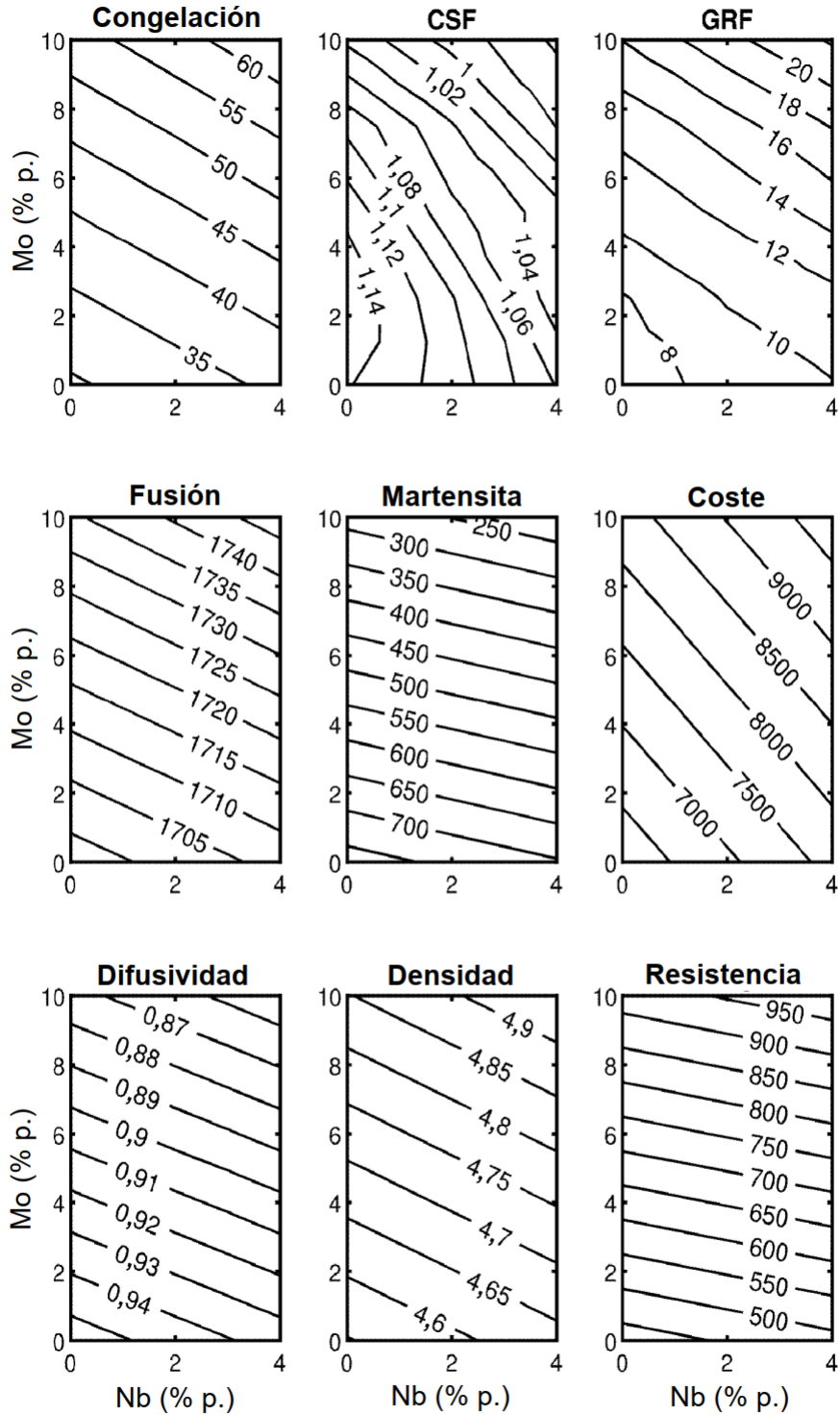


Figura 4: Mapas de contorno de los índices de calidad para el sistema Ti-5Al-5V-YMo-XNb-0Fe-0Cr-0Zr-0Sn.

Efecto de Al-Sn sobre los índices de calidad

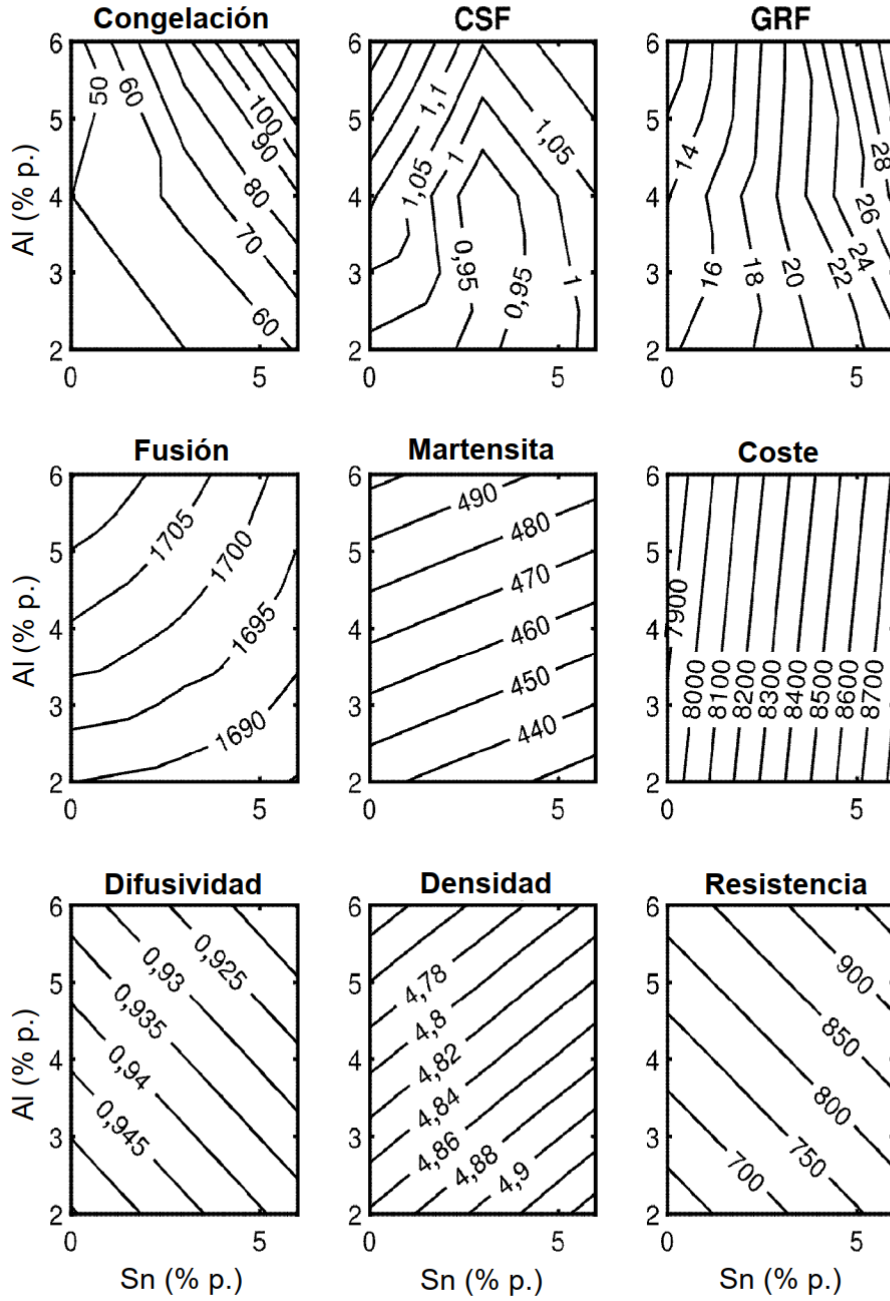


Figura 5: Mapas de contorno de los índices de calidad para el sistema Ti-4Mo-4V-YAl-XSn-0Fe-0Cr-4Zr-0Sn.

ES 2 927 839 T3

Factor	V	Fe	Mo	Zr	Cr	Nb	Sn
1 Intervalo de solidificación (intervalo seguro 100-275 °C)	↑	↑↑↑↑	↑	↑	↑↑↑	↑	↑↑
2 CSC (mejor cuanto más bajo)	-	↑↑↑	-	↑	↑↑	↓	↓
3 GRF (mejor cuanto más alto)	↑	↑↑	↑	↑	↑↑	↑↑	↑↑↑
4 Densidad (mejor cuanto más baja)	↑	↑↑	↑↑↑	↑	↑	↑↑	↑↑
5 M _s (intervalo óptimo 75-300 °C)	↓↓	↓↓↓↓	↓↓	↓	↓↓↓	↓	↓
6 Temperatura de fusión (mejor cuanto más baja)	↑	↓	↑	↑↑	↓↓	↑	↑↑
7 Resistencia beta (mejor cuanto más alta)	↑↑	↑↑↑↑	↑↑	↑	↑↑↑	↑	↑
8 Difusividad (mejor cuanto más baja)	↓	↑↑↑↑	↓↓↓	↑	↑↑	↓↓	↓

Figura 6: Efecto de las adiciones de aleaciones sobre los índices de calidad.

Diseño de las cinco fuerzas

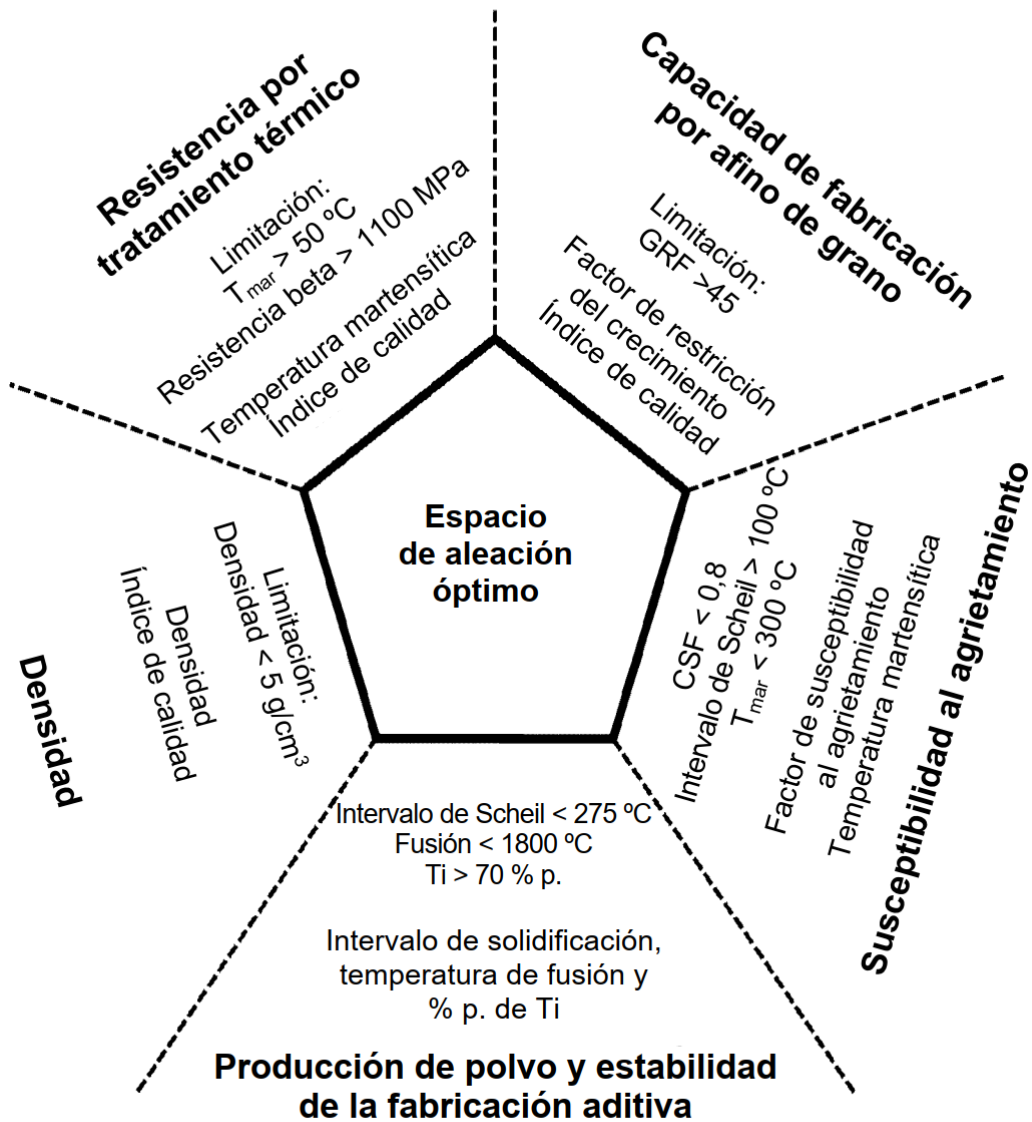


Figura 7: Restricciones al índice de calidad para aislar el espacio de aleación óptimo.

Intervalo de solidificación

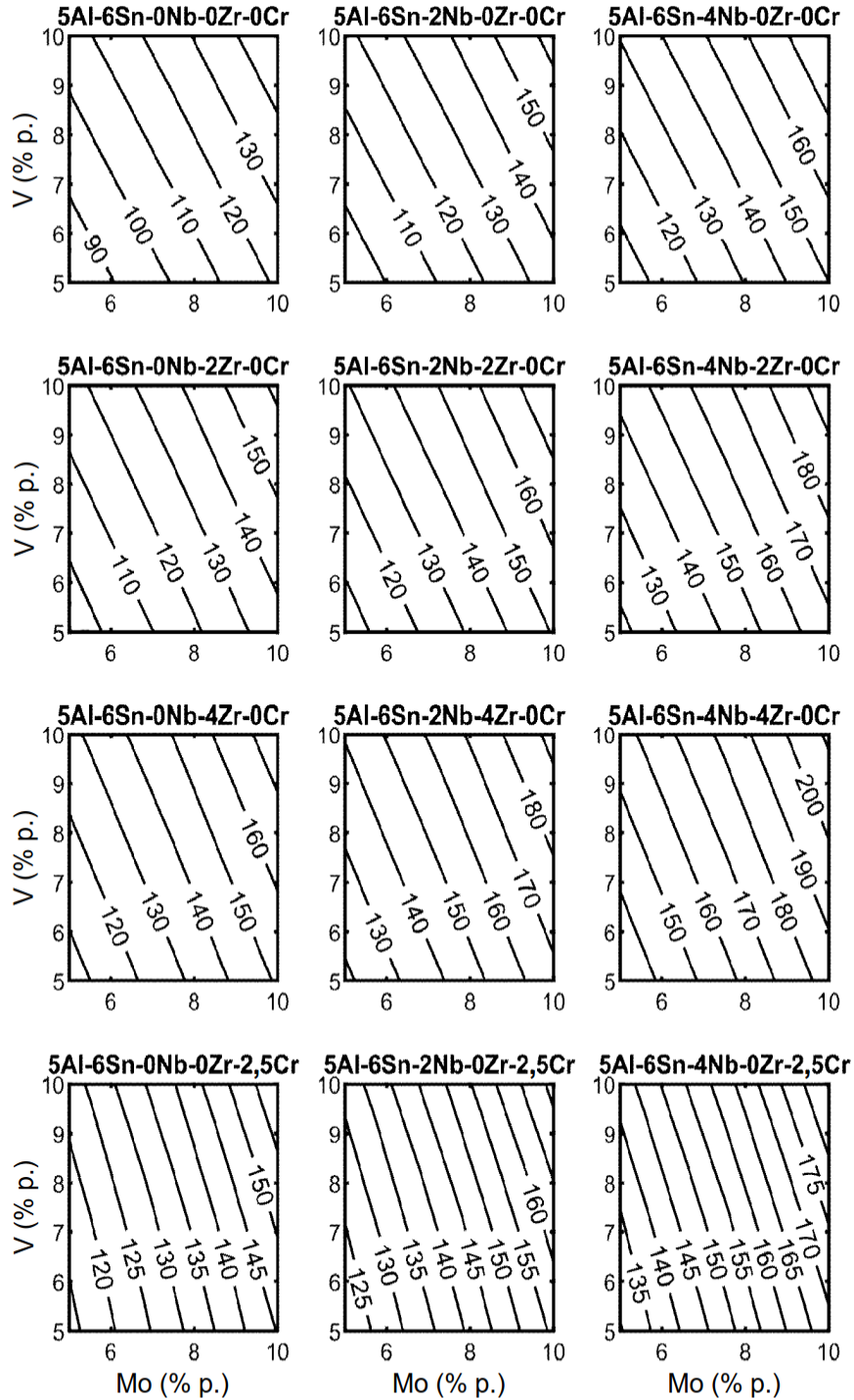


Figura 8: Mapa de contorno del intervalo de solidificación para el espacio de aleación preferido.

Susceptibilidad al agrietamiento

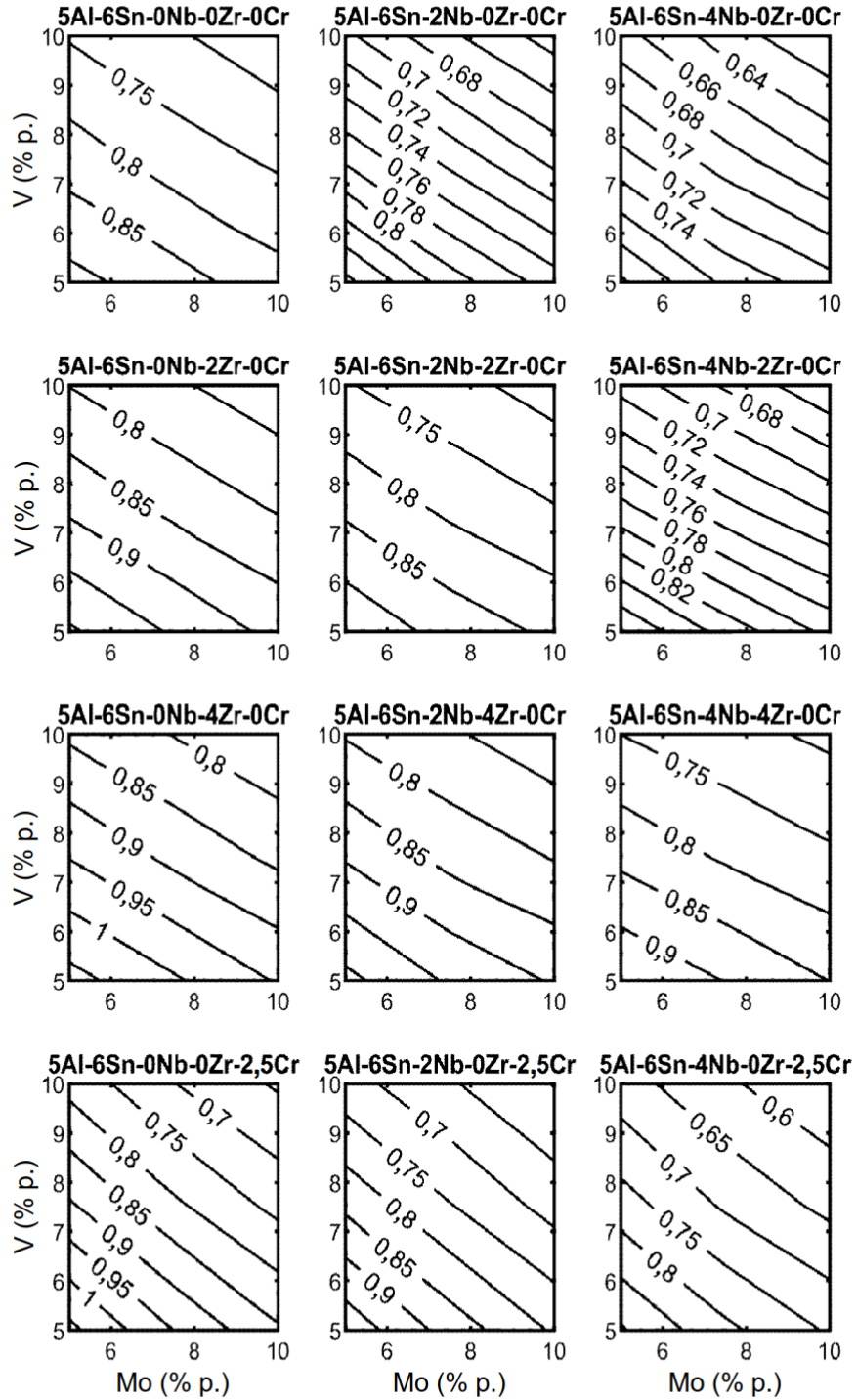


Figura 9: Mapa de contorno de la susceptibilidad al agrietamiento para el espacio de aleación preferido.

Factor de restricción del crecimiento

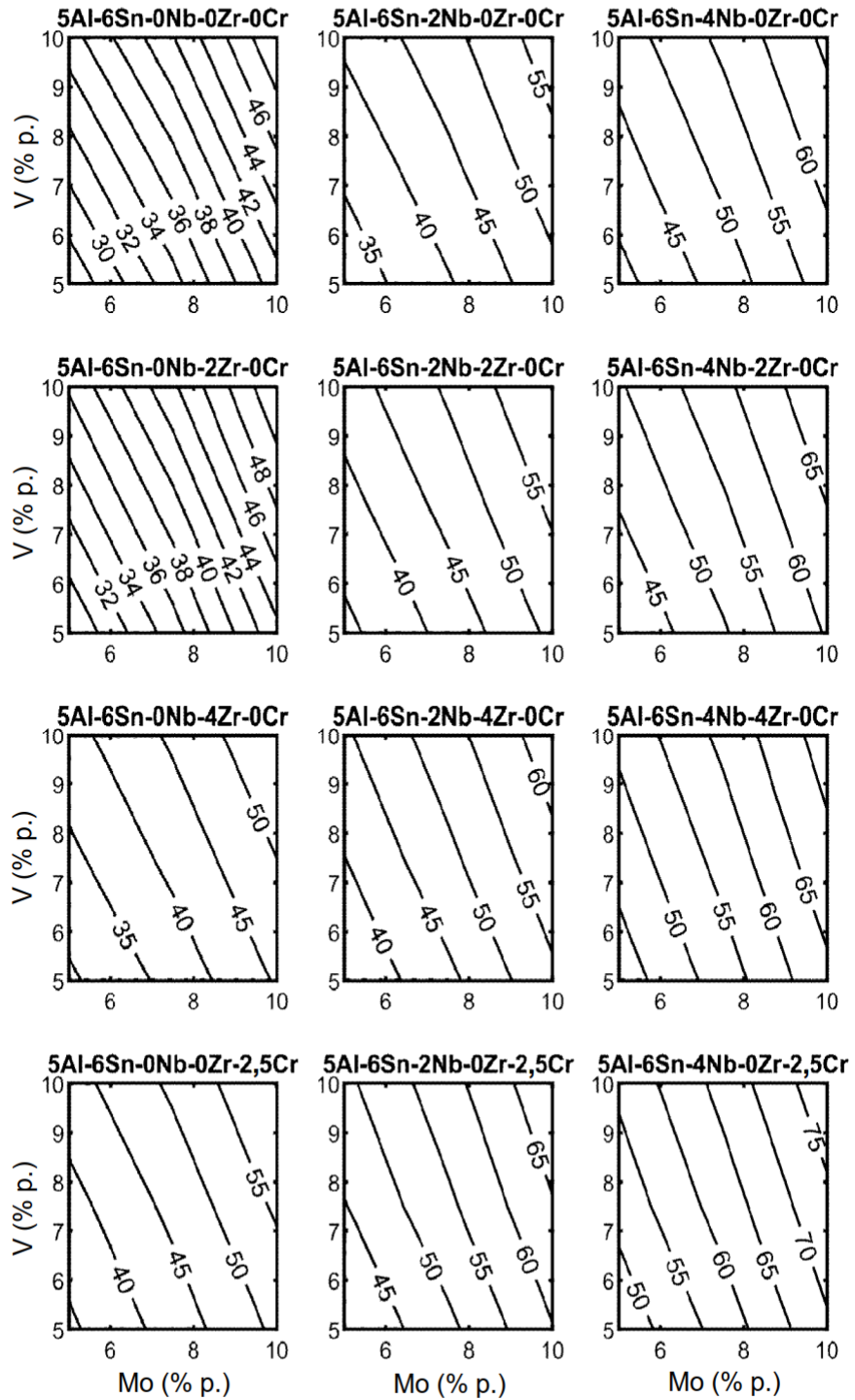


Figura 10: Mapa de contorno del factor de restricción del crecimiento para el espacio de aleación preferido.

Temperatura de fusión

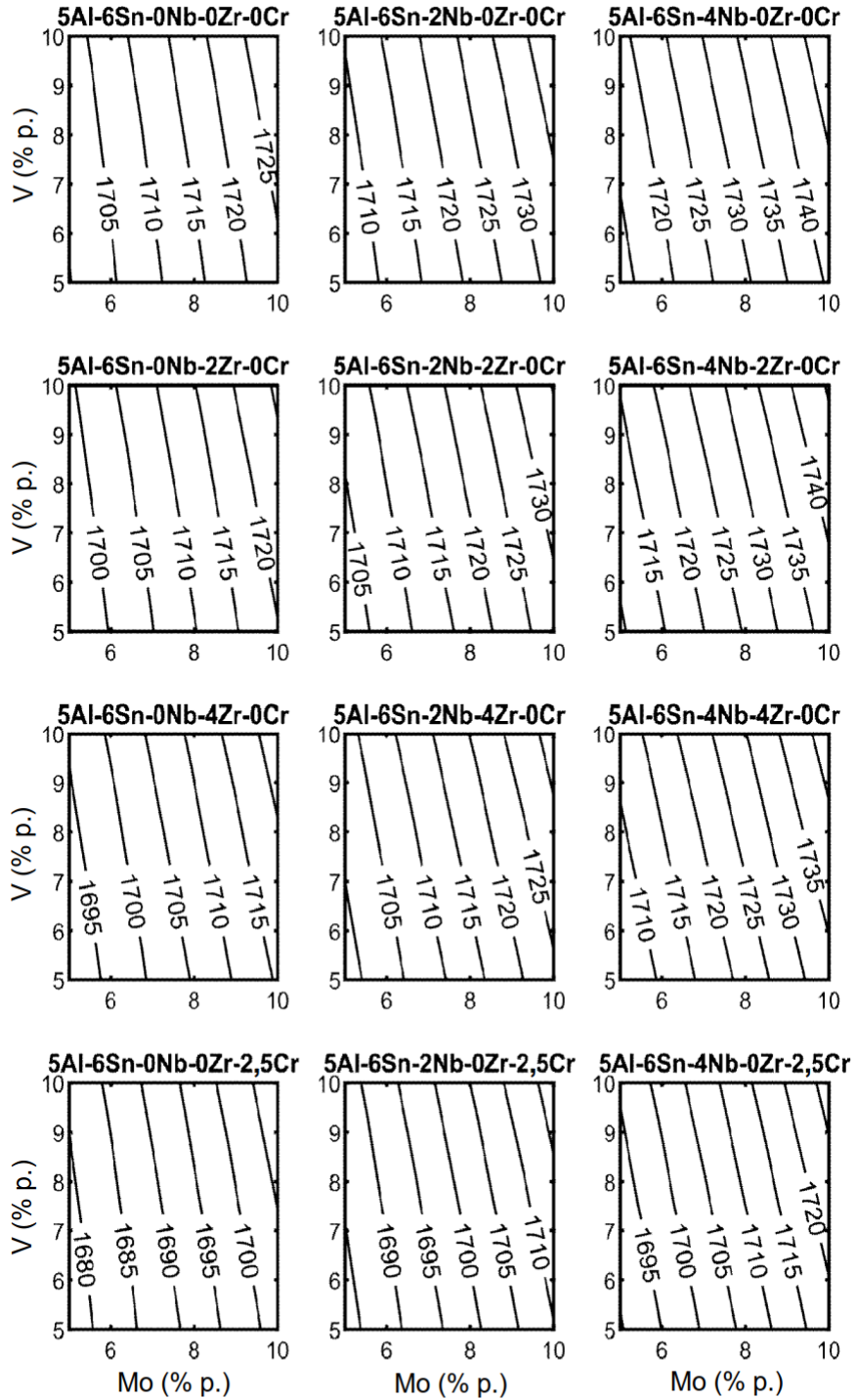


Figura 11: Mapa de contorno de la temperatura de fusión para el espacio de aleación preferido.

Temperatura de inicio martensítico

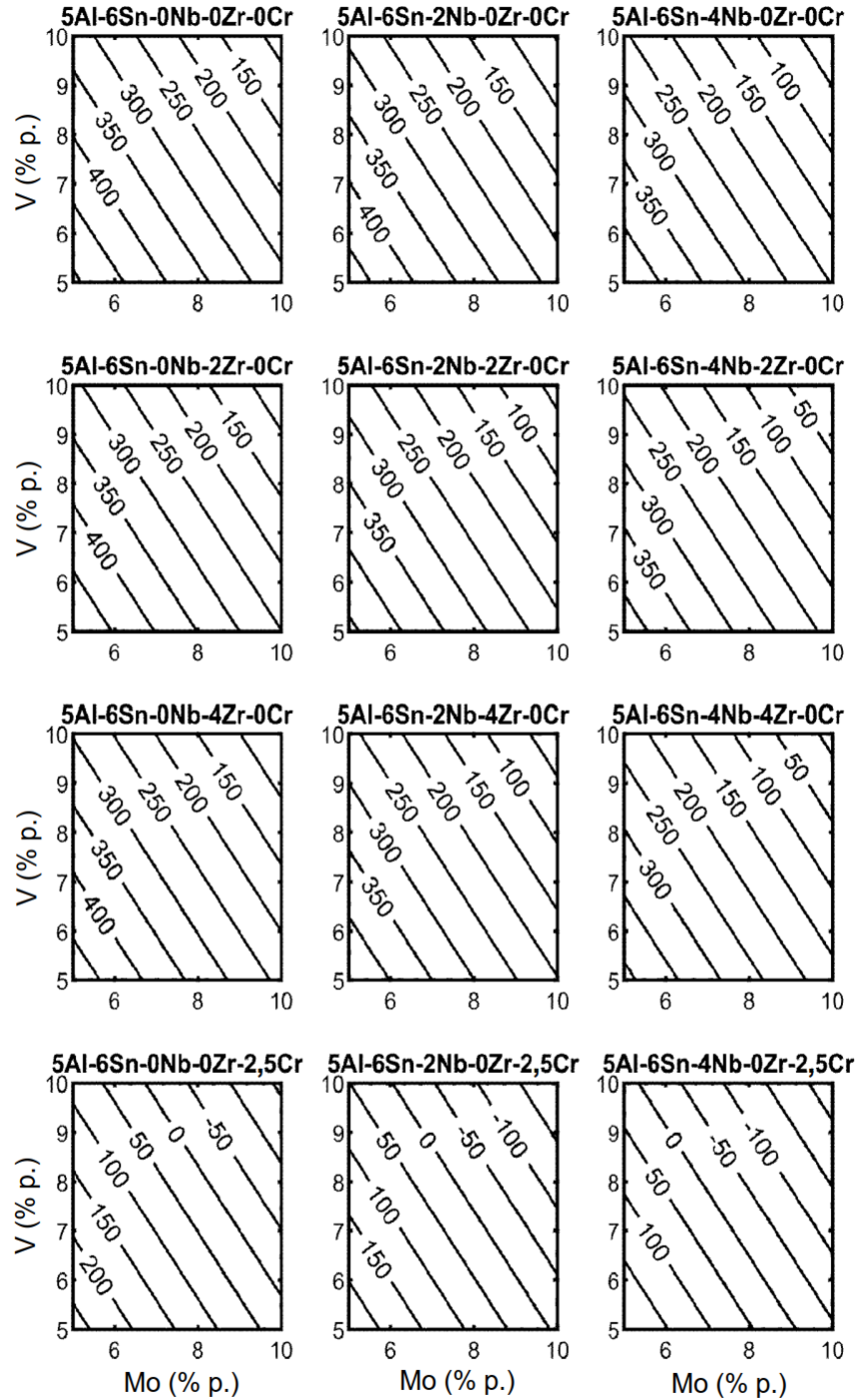


Figura 12: Mapa de contorno de la temperatura de inicio martensítico para el espacio de aleación preferido.

Coste de materias primas

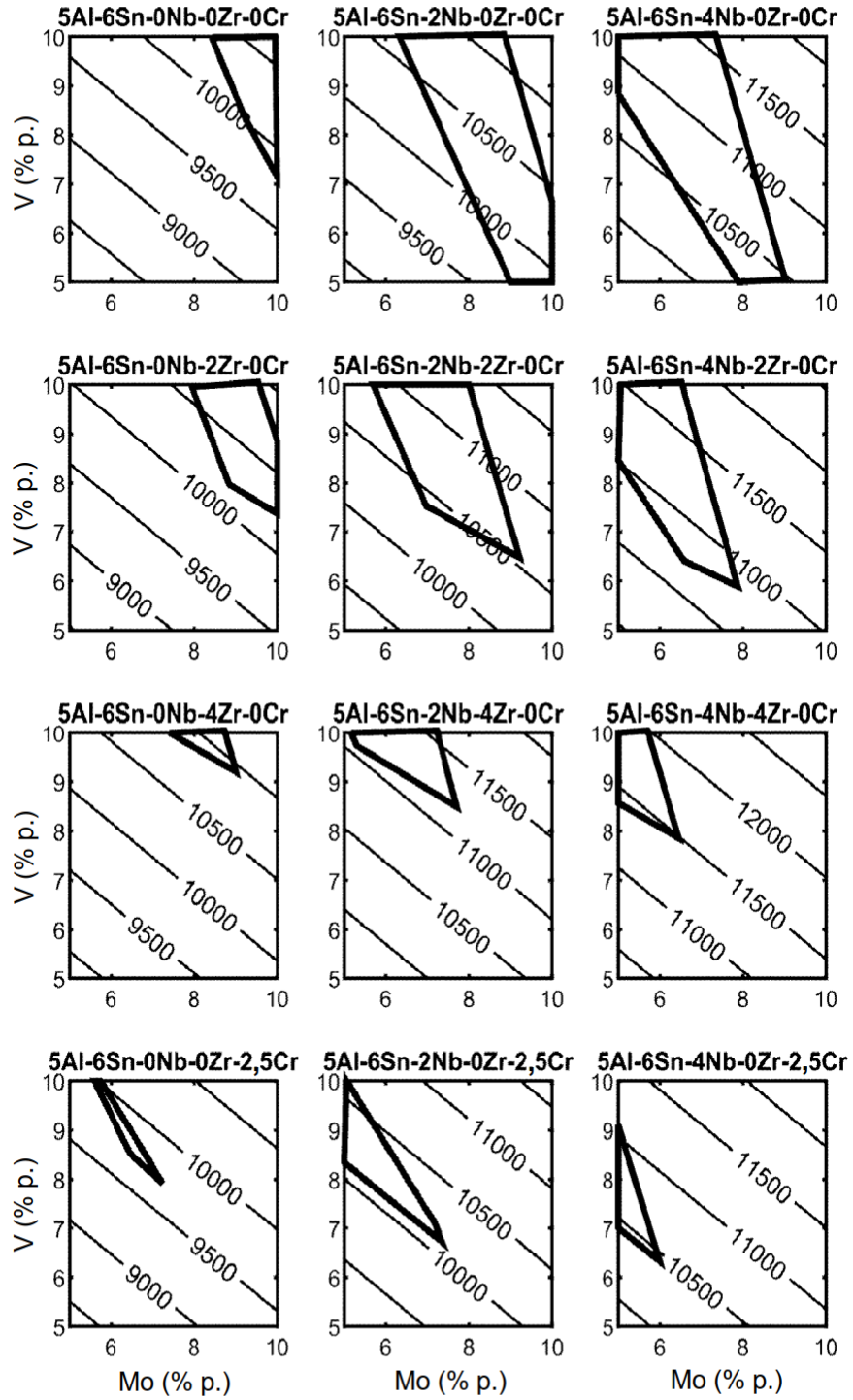


Figura 13: Mapa de contorno del coste de materias primas para el espacio de aleación preferido.

Difusividad normalizada

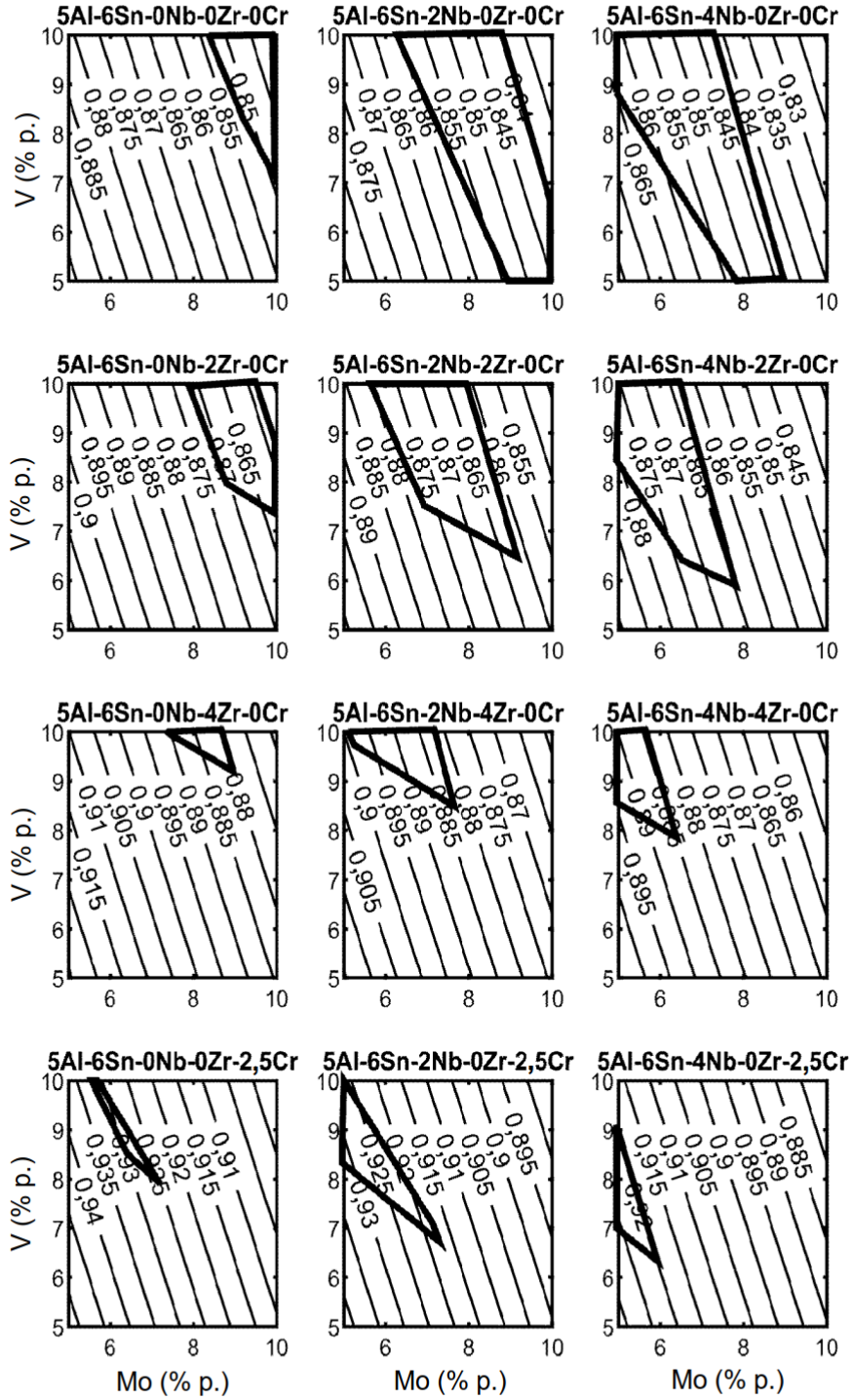


Figura 14: Mapa de contorno de la difusividad normalizada para el espacio de aleación preferido.

Densidad

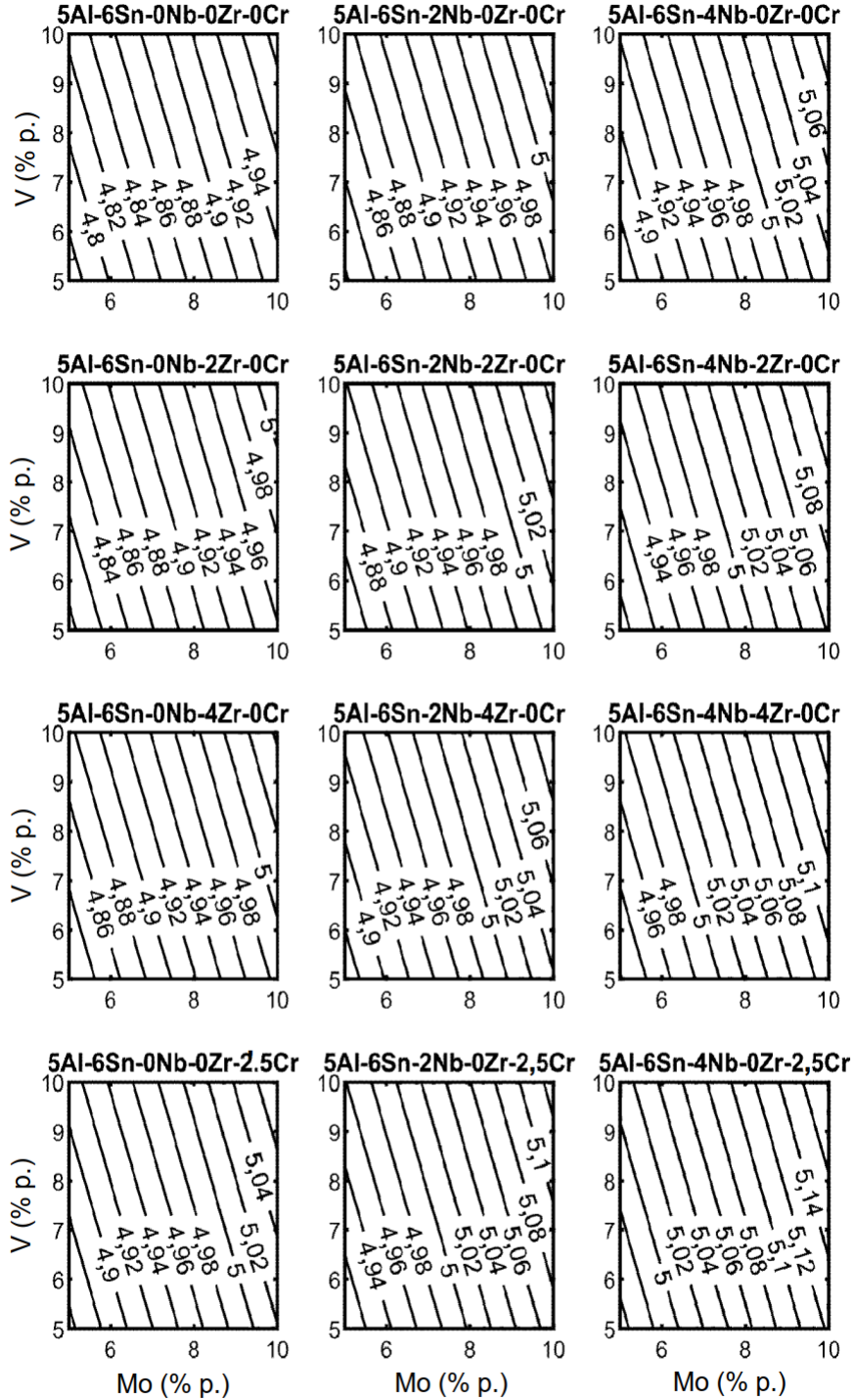


Figura 15: Mapa de contorno de la densidad para el espacio de aleación preferido.

Resistencia beta

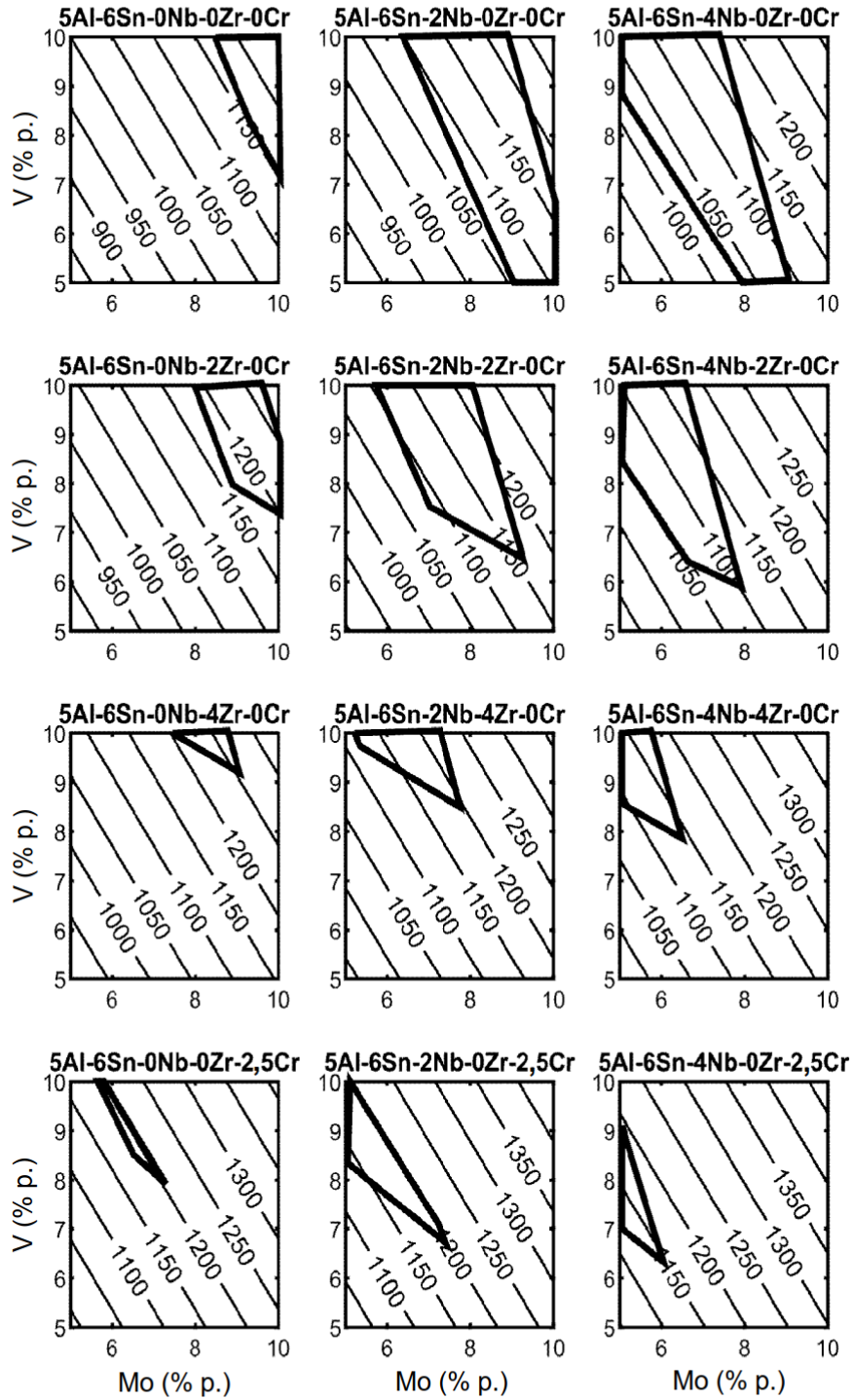


Figura 16: Mapa de contorno de la resistencia beta para el espacio de aleación preferido.

Espacio de aleación óptimo

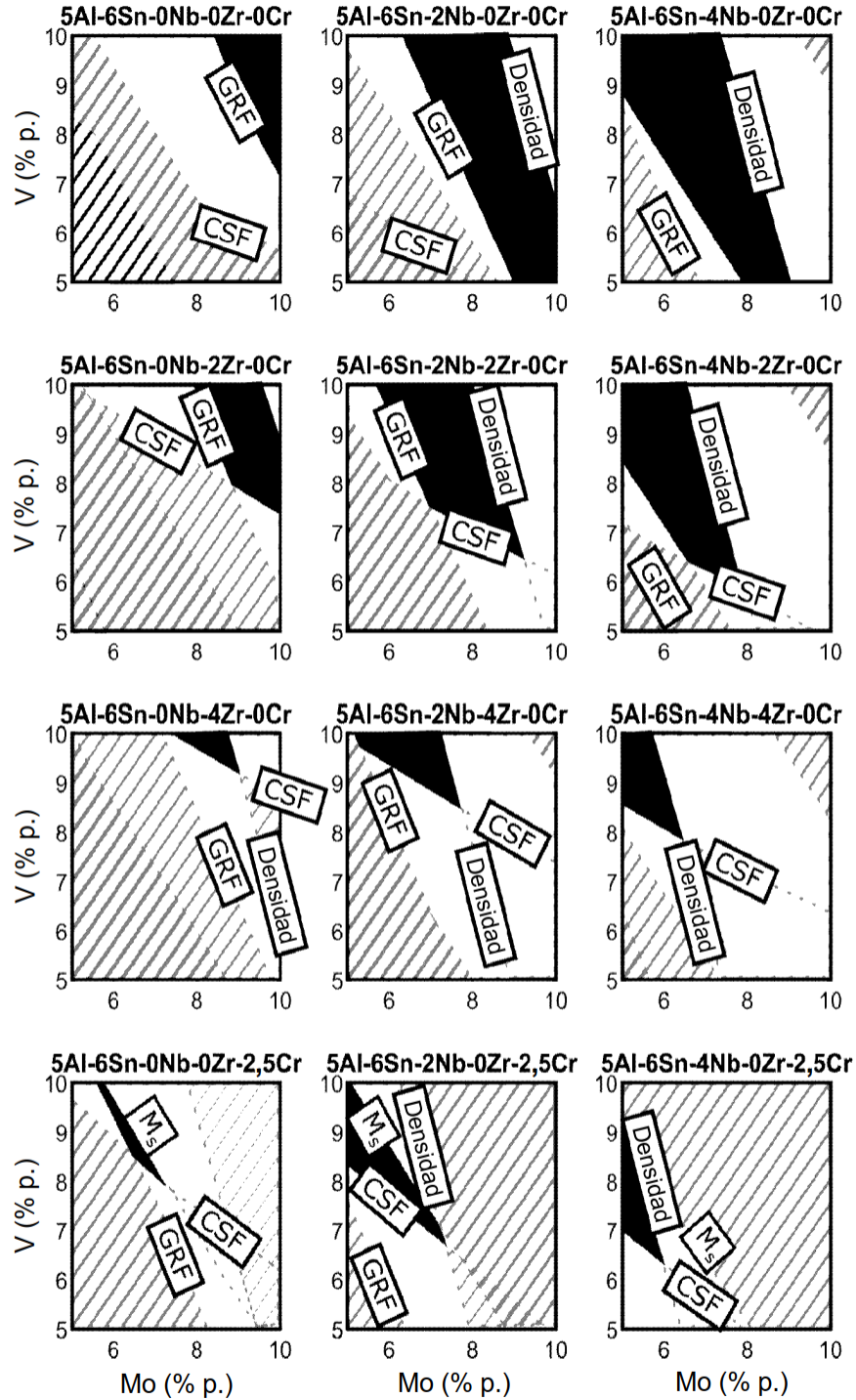


Figura 17: Espacio de aleación óptimo para el espacio de aleación preferido.

Aleaciones de referencia

	Aleaciones de referencia	Congel.	GRF	CSF	eq. Mo	M _s	% p. Ti	Fusión	Densidad	Coste	Def	Resistencia	Idoneidad
1	Ti-10V-2Fe-3Al	392	28	3,1	9,5	258	85	1656	4,72	7638	1,38	650	CSF demasiado alto Intervalo congelación demasiado alto Resistencia demasiado baja
2	Ti-15Mo-2,7Nb-3Al-0,2Si	91	32	1	12,0	193	82	1746	5,10	9027	0,87	940,5	Intervalo congelación demasiado bajo
3	Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr	227	39	1,5	15,3	-168	75	1640	5,01	9245	1,09	1100	M _s demasiado baja
4	Ti-15V-3Al-3Sn-3Cr	110	26	1,4	11,9	85	79	1654	4,85	10108	1,02	945	GRF demasiado bajo
5	Ti-13V-11Cr-3Al	155	43	0,9	23,3	-609	73	1595	5,05	9651	1,19	1320	M _s demasiado baja
6	Ti-8Mo-8V-2Fe-3Al	453	39	3,0	16,2	-60	79	1693	4,95	8730	1,32	980	M _s demasiado baja Intervalo congelación demasiado alto CSF demasiado alto
7	Ti-11Mo-6Zr-4,5Sn	75	31	1,0	10,0	302	83	1699	5,16	9090	0,98	782,5	Resistencia demasiado baja
8	Ti-10V-2Fe-3Al	392	28	3,1	9,5	258	85	1656	4,72	7638	1,38	650	CSF demasiado alto Resistencia demasiado baja
9	Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr	147	22	1,8	8,2	240	82	1690	4,79	7500	0,98	870	GRF demasiado bajo
10	Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr-0,5Fe	227	27	2,3	9,6	165	81,5	1685	4,81	7477	1,09	907,5	CSF demasiado alto
11	Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr-1Zr	157	23	1,8	8,0	233	81	1688	4,80	7679	0,99	890	GRF demasiado bajo
12	Ti-15Mo-3Al-3Nb	65	32	0,7	12,0	193	82	1746	5,10	9153	0,87	945	Intervalo congelación demasiado bajo
13	Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr	227	39	1,5	15,3	-168	75	1640	5,01	9245	1,09	1100	M _s demasiado baja
14	Ti-5Al-5V-5Mo-1Cr-1Fe	292	23	3,3	7,9	282	83	1695	4,76	7269	1,15	815	CSF demasiado alto Intervalo congelación demasiado alto

Figura 18: Propiedades de las aleaciones de referencia.

Aleaciones de ejemplo

Aleaciones de ejemplo*	Congel.	GRF	CSF	eq. Mo	M _s	% p. Ti	Fusión	Densidad	Coste	Def	Resistencia
1 Ti-5Al-6Sn-8V-6Mo-2Nb-2,5Cr	133,6	49	0,778	10,36	75,85	78,5	1691,1	4,9696	10591	1	1172,5
2 Ti-5Al-6Sn-8V-6Mo-2Nb-2Cr-1,5Zr	147,1	51	0,8	9,85	65,35	77	1687,9	4,9899	10860	1,02	1202,5
3 Ti-5Al-6Sn-9.5V-5.5Mo-4Nb-4Zr	158,5	52	0,763	6,198	222,9	76	1714	4,987	12264	0,99	1147,5
4 Ti-5Al-6Sn-7.5V-7Mo-4Nb-2Zr	149,3	52	0,759	6,692	237,4	78,5	1723,2	4,9874	11620	0,97	1112,5
5 Ti-5Al-6Sn-9V-9Mo-2Zr	147,1	47	0,761	9,697	151,9	75	1719	4,97	10817	0,93	1205
6 Ti-5Al-6Sn-8.5V-8Mo-2Nb-2Zr	149,3	50	0,746	8,362	185,4	76,5	1721,4	4,9815	11294	0,95	1167,5
7 Ti-5Al-6Sn-9.5V-8Mo-2Nb-0.5Zr	144,6	50	0,683	9,282	158,9	77	1725,3	4,9723	11328	0,93	1172,5
8 Ti-5Al-6Sn-10V-8Mo-4Zr	155,4	47	0,789	9,033	149,9	73	1711,2	4,975	11265	0,95	1230

*todas las aleaciones de ejemplo contienen 0,1 % B

Figura 19: Propiedades de los ejemplos propuestos.

Espacio de aleación óptimo

Reivindicación 1*	Al	Sn	V	Mo	Nb	Zr	Cr	Fe	B
Límite inferior	3	0	3	3	0	0	0	0	0
Límite superior	7	7	10	10	5	6	4	0,5	0,5

*se muestran solo elementos principales

mientras que: $0,027V + 0,178Fe + 0,055Mo + 0,016Zr + 0,044Cr + 0,033Nb + 0,053Sn > 1,0$

Figura 20: Intervalo químico del espacio de aleación óptimo.

Restricciones para el espacio de aleación óptimo

Aleaciones de referencia		Al	V	Fe	Mo	Zr	Cr	Nb	Sn	GRF		CSF	
										Umbral	Real	Umbral	Real
1	*	3	10	2	0	0	0	0	0	0,63	28	7,83	3,12
2	*	3	0	0	15	0	0	2,7	0	0,82	32	-0,15	1,20
3	*	3	8	0	4	4	6	0	0	0,82	39	1,42	1,51
4	*	3	15	0	0	0	3	0	3	0,74	26	0,06	1,43
5	*	3	13	0	0	0	11	0	0	0,98	43	2,38	0,86
6	*	3	8	2	8	0	0	0	0	0,96	39	7,77	3,00
7	*	0	0	0	11	6	0	0	4,5	0,88	31	-0,45	0,96
8	*	3	10	2	0	0	0	0	0	0,63	28	7,83	3,12
9		5	5	0	5	0	3	0	0	0,55	22	0,70	1,78
10		5	5	0,5	5	0	3	0	0	0,64	27	2,70	2,26
11		5	5	0	5	1	3	0	0	0,57	23	0,74	1,85
12	*	3	0	0	15	0	0	3	0	0,83	32	-0,16	0,65
13	*	3	8	0	4	4	6	0	0	0,82	39	1,42	1,51
14	*	5	5	1	5	0	1	0	0	0,61	23	4,22	3,29

*Fuera del intervalo de la Reivindicación 1

Ejemplos	Al	V	Fe	Mo	Zr	Cr	Nb	Sn	GRF		CSF	
									Umbral	Real	Umbral	Real
1	5	8	0	6	0	2,5	2	6	1,04	49	-0,24	0,78
2	5	8	0	6	2	2	1,5	6	1,03	51	-0,27	0,80
3	5	9,5	0	5,5	4	0	4	6	1,05	52	-0,76	0,76
4	5	7,5	0	7	2	0	4	6	1,03	52	-0,80	0,76
5	5	9	0	9	2	0	0	6	1,04	47	-0,80	0,76
6	5	8,5	0	8	2	0	2	6	1,04	50	-0,81	0,75
7	5	9,5	0	8	0,5	0	2	6	1,04	50	-0,89	0,68
8	5	10	0	8	4	0	0	6	1,05	47	-0,74	0,79

Ecuaciones umbral

GRF $0,027V + 0,178Fe + 0,055Mo + 0,016Zr + 0,044Cr + 0,033Nb + 0,053Sn > 1,0$
 CSF $0,041Al - 0,03V + 4Fe - 0,015Mo + 0,037Zr + 0,24Cr - 0,02Nb - 0,112Sn < 0,0$

Figura 21: Relación que restringe el espacio de aleación óptimo.

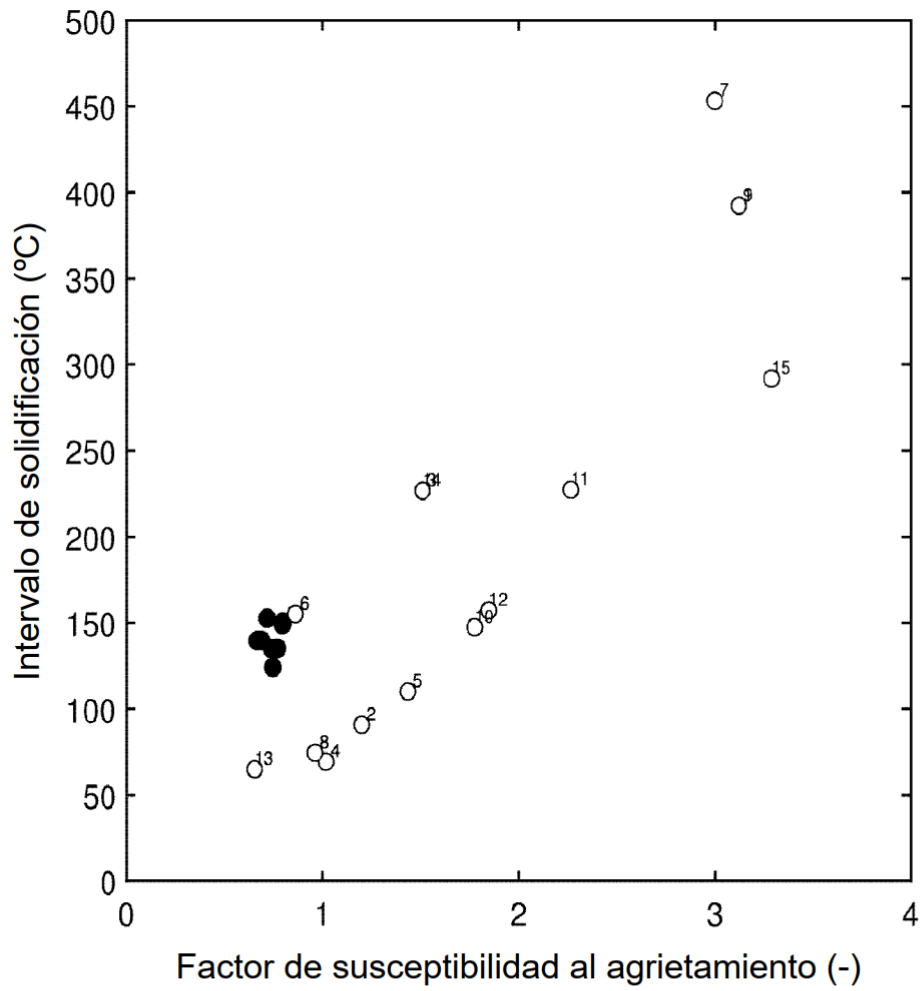


Figura 22: Diagrama de dispersión del factor de susceptibilidad al agrietamiento frente al intervalo de solidificación.

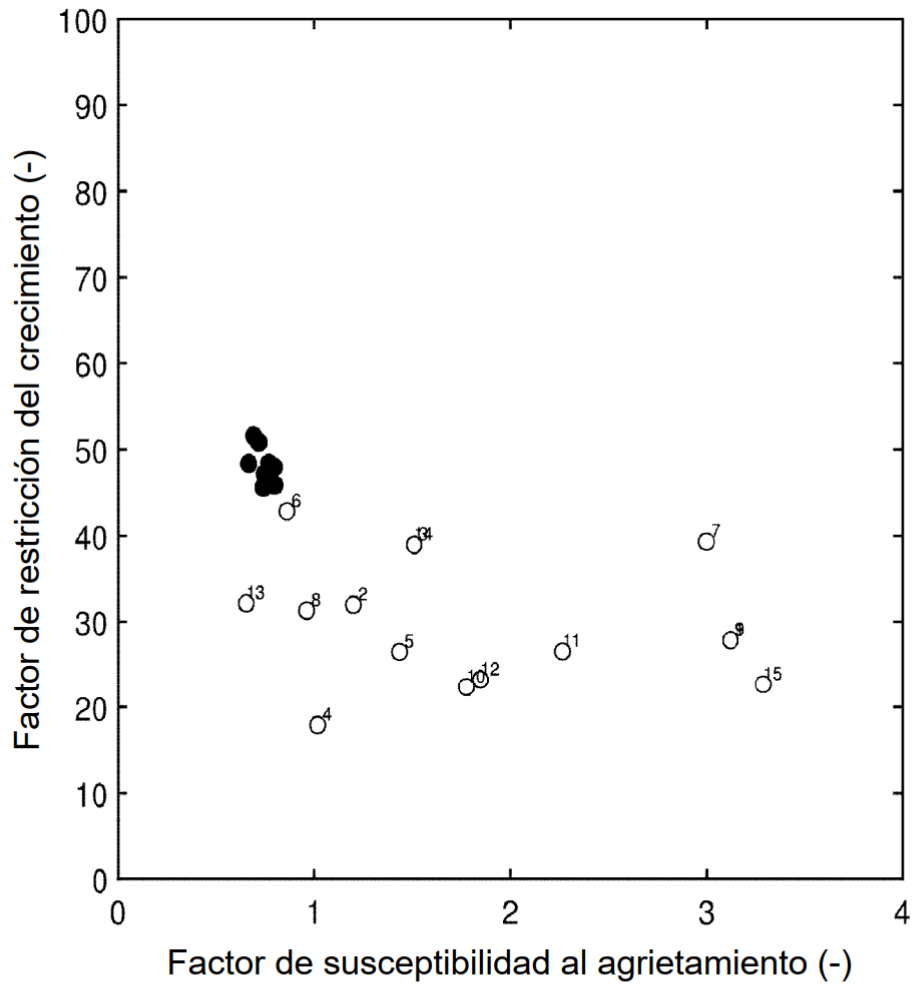


Figura 23: Diagrama de dispersión del factor de susceptibilidad al agrietamiento frente al factor de restricción del crecimiento.

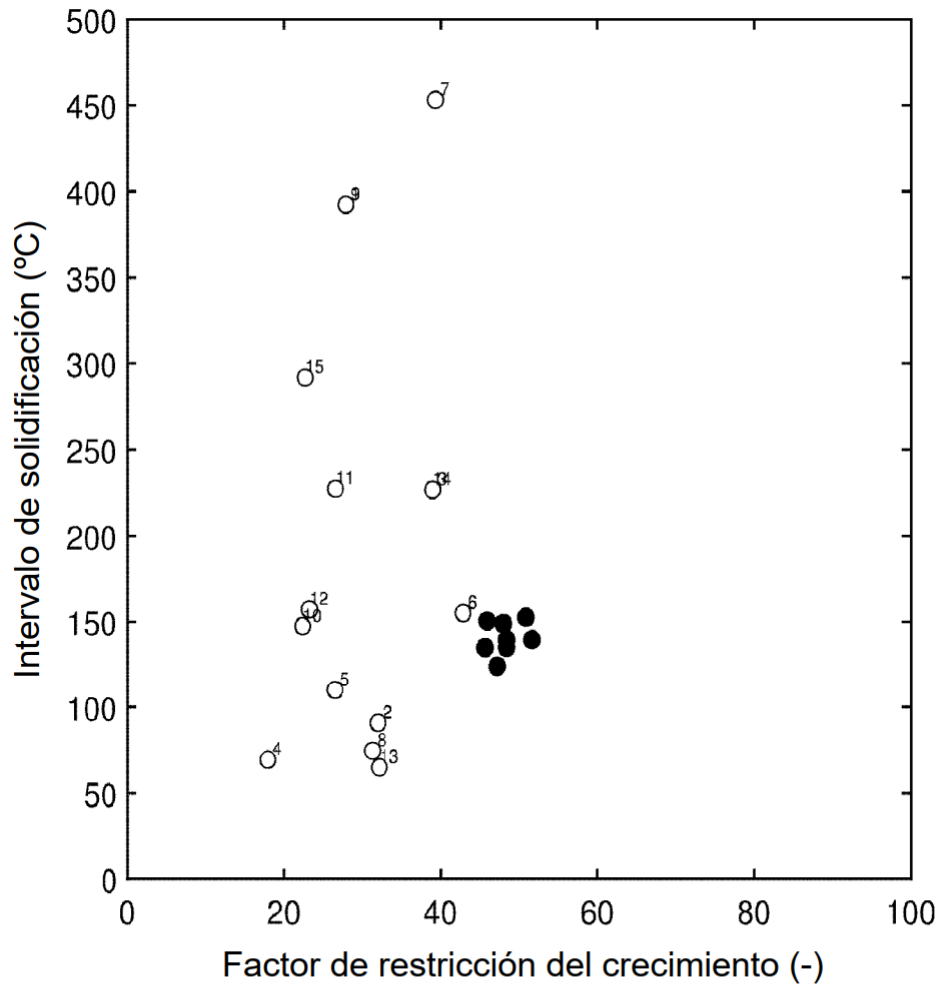


Figura 24: Diagrama de dispersión del factor de restricción del crecimiento frente al intervalo de solidificación.

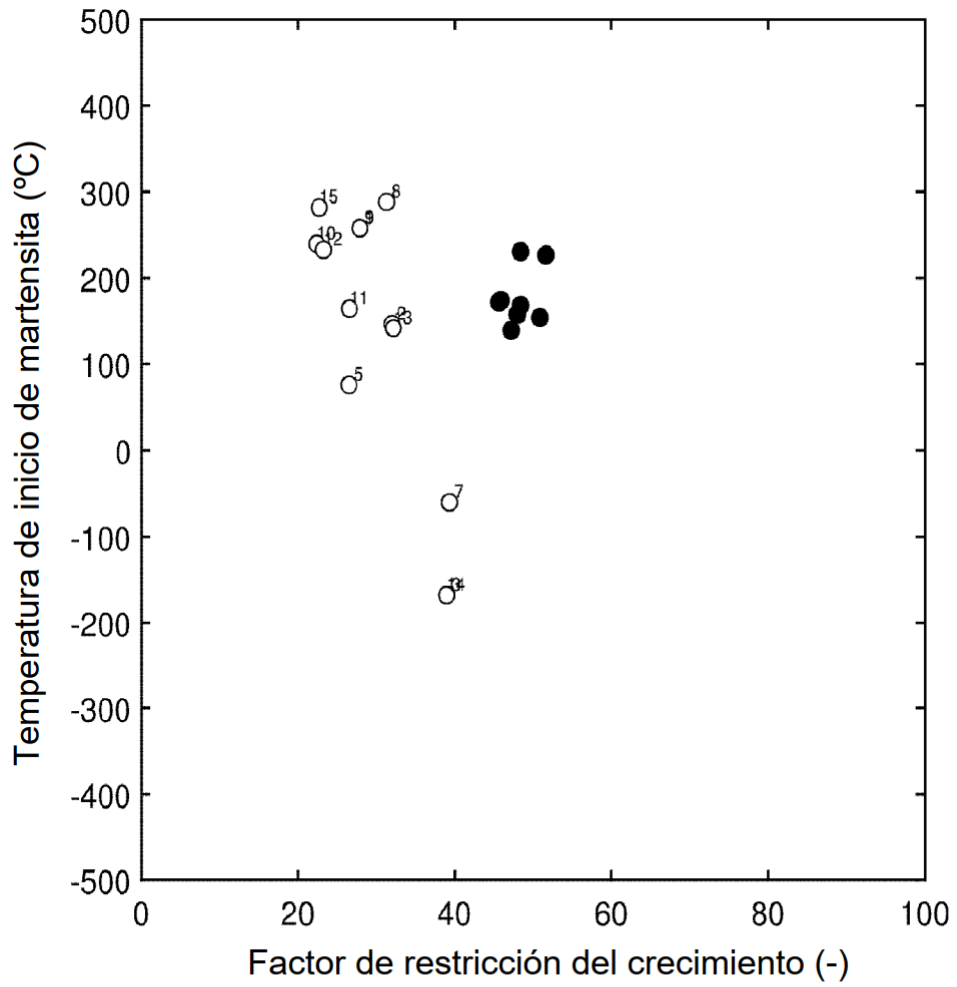


Figura 25: Diagrama de dispersión del factor de restricción del crecimiento frente a la temperatura de inicio de martensita.

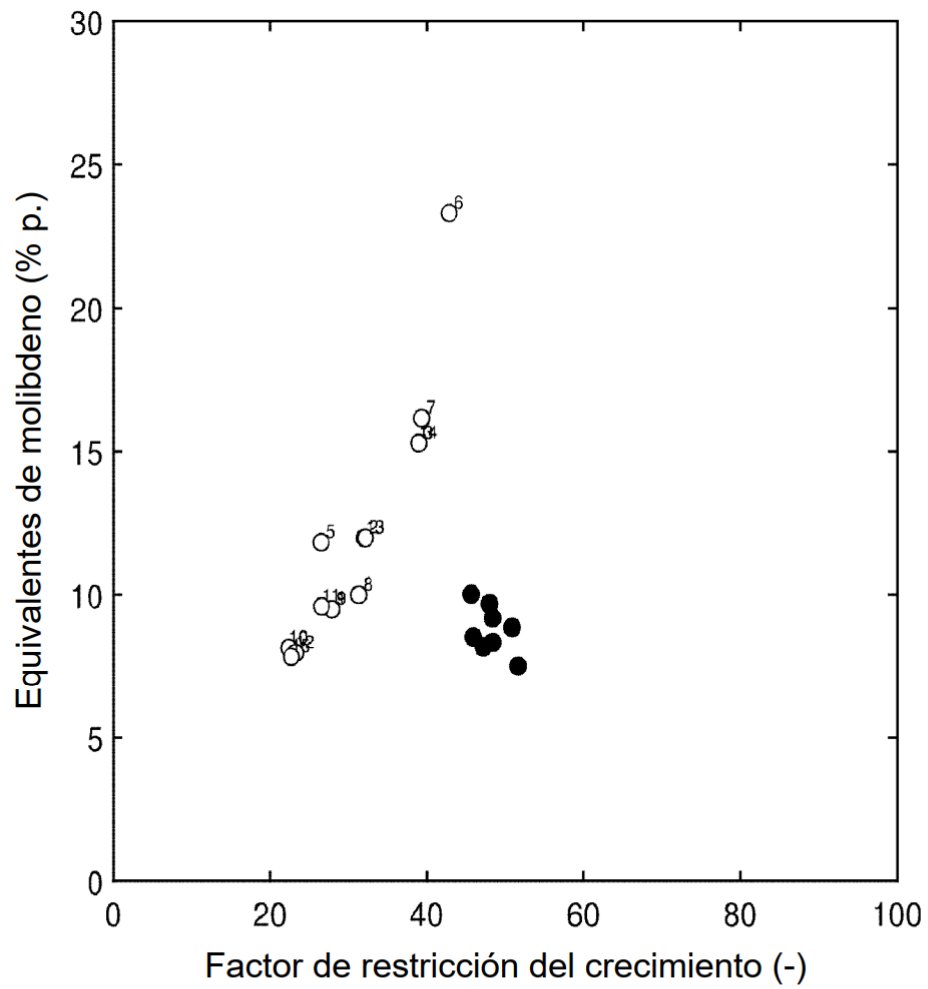


Figura 26: Diagrama de dispersión del factor de restricción del crecimiento frente al valor de equivalentes de molibdeno.

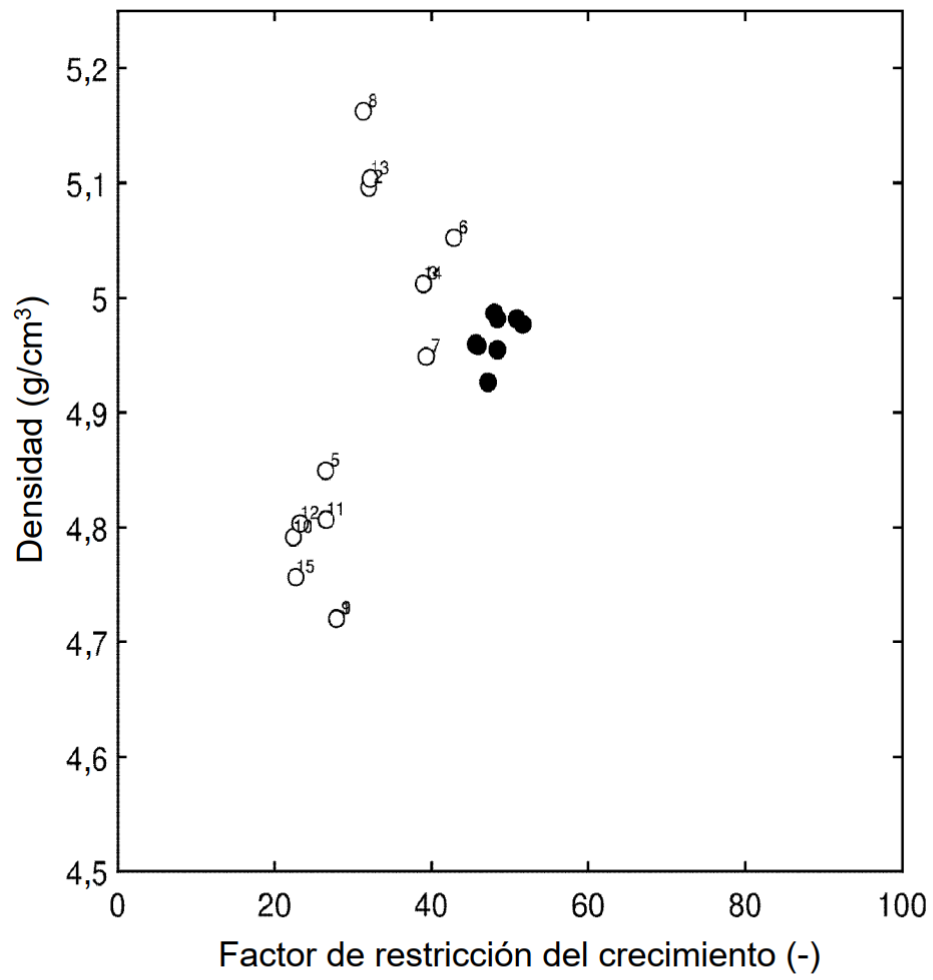


Figura 27: Diagrama de dispersión del factor de restricción del crecimiento frente a la densidad.

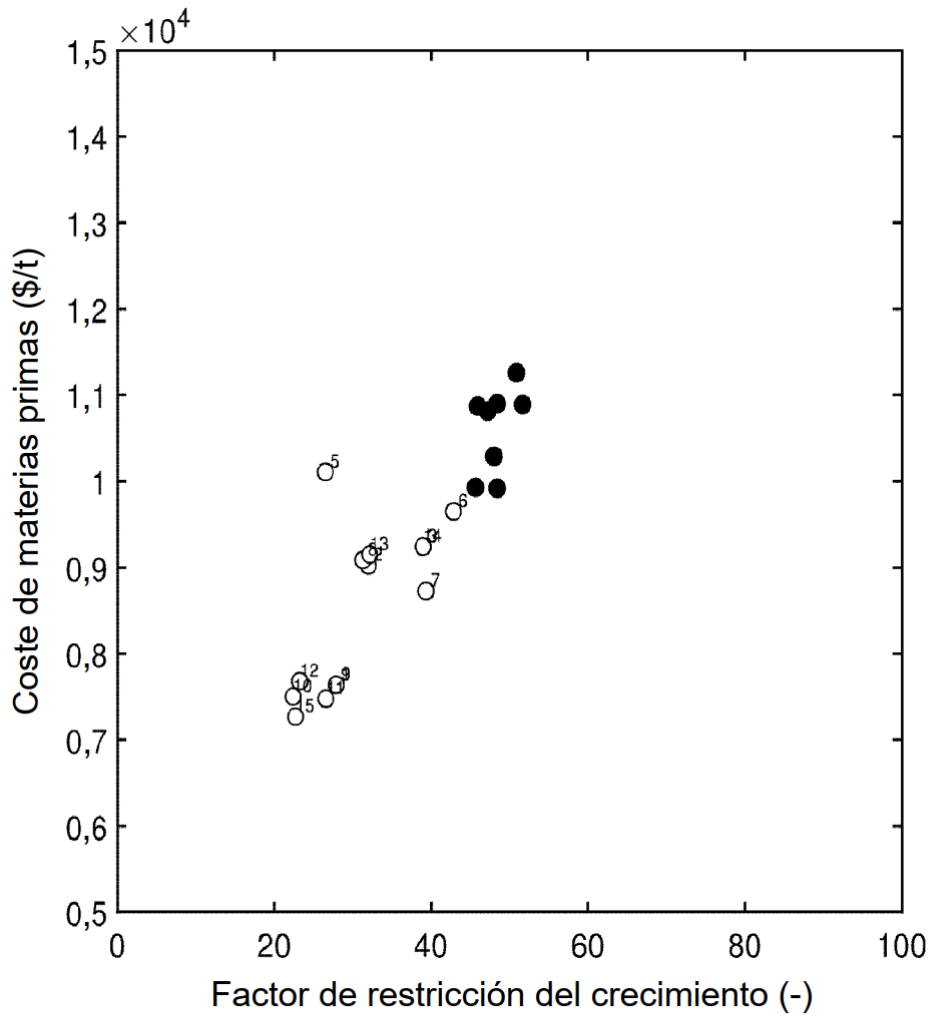


Figura 28: Diagrama de dispersión del factor de restricción del crecimiento frente al coste de las materias primas.

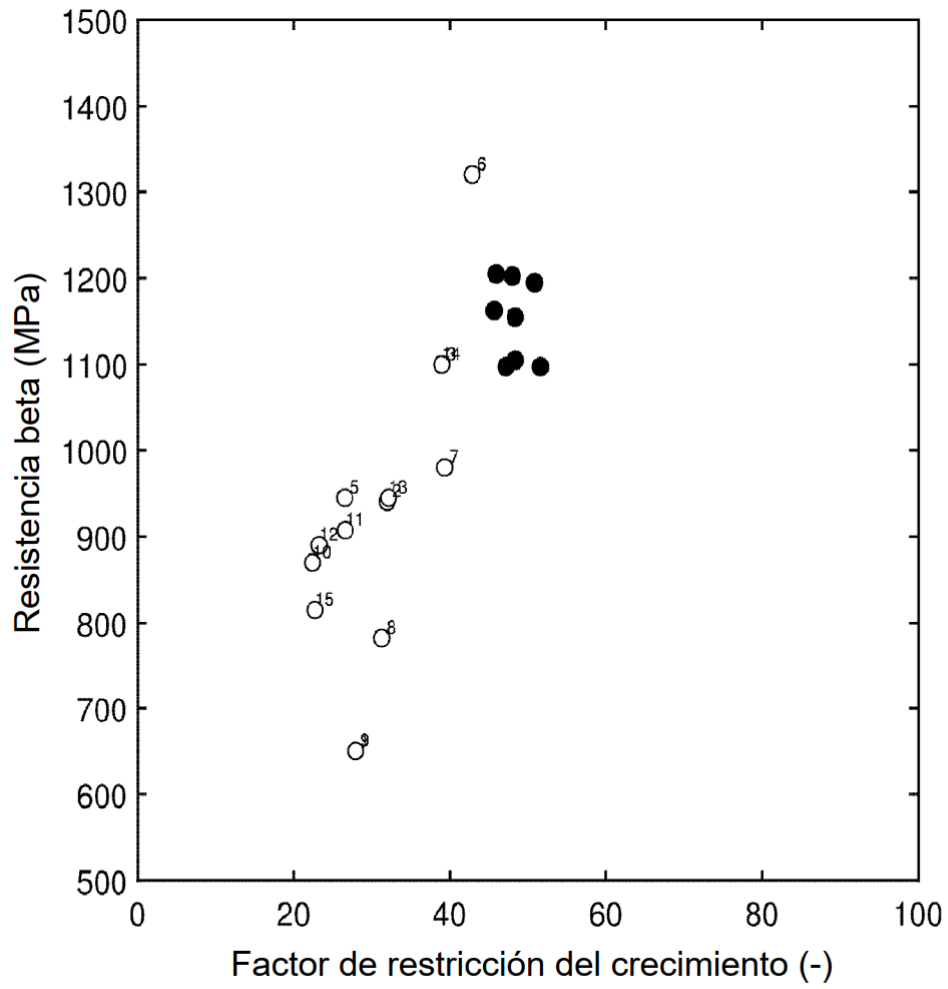


Figura 29: Diagrama de dispersión del factor de restricción del crecimiento frente a la resistencia beta.