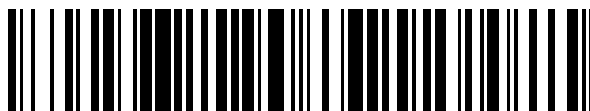


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 385 336**

51 Int. Cl.:

**C21D 6/00** (2006.01)

**C22C 38/22** (2006.01)

**C22C 38/24** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Número de solicitud europea: **03721267 .7**

96 Fecha de presentación: **07.05.2003**

97 Número de publicación de la solicitud: **1511872**

97 Fecha de publicación de la solicitud: **09.03.2005**

54 Título: **Acero y herramienta de moldeo para materiales plásticos hecha de acero**

30 Prioridad:  
**13.06.2002 SE 0201800**  
**30.01.2003 SE 0300215**

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:  
**23.07.2012**

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:  
**23.07.2012**

73 Titular/es:  
**Uddeholms AB**  
**683 85 Hagfors, SE**

72 Inventor/es:  
**SANDBERG, Odd**

74 Agente/Representante:  
**Polo Flores, Carlos**

ES 2 385 336 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

Acero y herramienta de moldeo para materiales plásticos hecha de acero.

### CAMPO TÉCNICO

- 5 La invención se refiere a un acero, es decir, a una aleación, destinada a su utilización en primer lugar para la fabricación de herramientas de moldeo, debiéndose fabricar los productos de plástico en la herramienta mediante alguna clase de procedimiento de moldeo en el estado plástico o moldeado del material plástico. La invención también se refiere a herramientas y detalles de herramientas hechos de acero, así como a piezas en bruto de la aleación de acero para la fabricación de herramientas de moldeo para materiales plásticos y detalles de dichas herramientas.

### ANTECEDENTES DE LA INVENCION

- Las herramientas de moldeo para materiales plásticos se fabrican con una gran variedad de aleaciones de acero, tales como aceros martensíticos y aceros de media aleación. En ese grupo se incluye un acero comercial que contiene nominalmente el 0,6% de C, el 4,5% de Cr, el 0,5% de Mo y el 0,2% V y que se utiliza para herramientas para trabajo en frío y herramientas de moldeo para materiales plásticos. Dentro del mismo grupo también se encuentra el acero inoxidable estandarizado AISI S7, que también se utiliza en ocasiones para, entre otras cosas, herramientas de moldeo para materiales plásticos, y otro acero comercial para herramientas, que contiene nominalmente el 0,55% de C, el 2,6% de Cr, el 2,25% de Mo y el 0,9% de V. Los dos primeros aceros nombrados alcanzan una dureza deseada solo después de un revenido a baja temperatura, que puede conllevar el riesgo de que aparezcan tensiones retenidas en el acero después del tratamiento térmico. Es cierto que el último acero mencionado puede lograr una dureza adecuada después de un revenido a alta temperatura, es decir, un revenido a aproximadamente 550 °C, pero, por el contrario, la templabilidad de ese acero no es particularmente buena. En el documento EP 1300482 A1 se describe otro acero de la técnica anterior, que presenta la siguiente composición en % en peso: C 0,451 a 0,598, Si 0,11 a 0,29, Mn 0,11 a 0,39, Cr 4,21 a 4,98, Mo 2,81 a 3,29 y V 0,41 a 0,69. Este acero adolece de baja ductilidad.

El propósito de la invención es dar a conocer un acero de moldeo para el moldeo de materiales plásticos que presente una mejor combinación de características para la utilización del acero en la fabricación de herramientas de moldeo para materiales plásticos en comparación con los aceros actualmente disponibles comercialmente. Particularmente, el acero debe presentar las siguientes características:

- 30 - Buena ductilidad / tenacidad,
- Buena templabilidad que permita el temple en profundidad mediante temple convencional en un horno de vacío de productos con espesores de hasta 350 mm como mínimo,
- Dureza adecuada, al menos de 54 HRC, preferentemente al menos 56 HRC, después del temple y revenido a alta temperatura, que imparta alta resistencia a la deformación plástica y, por lo menos en cuanto a ciertas aplicaciones se refiere, también una adecuada resistencia al desgaste sin nitruración ni recubrimiento superficial con carburo de titanio y/o nitruro de titanio o similares por medio de, p. ej., una técnica de PVD o CVD,
- 35
- Buena resistencia al revenido con el fin de permitir la nitruración o el revestimiento superficial con carburo de titanio y/o nitruro de titanio o similares por medio de, p. ej., cualquiera de dichas técnicas, sin reducción de la dureza del material, para aplicaciones que requieran una resistencia al desgaste particularmente buena de la herramienta,
- 40 - Buenas características para el tratamiento térmico,
- Buena capacidad de amolado, mecanización mediante operación de corte, mecanización por descarga eléctrica y pulido.
- Otras características importantes del producto son:
- Buena estabilidad dimensional durante el tratamiento térmico,
- 45 - Larga vida a fatiga.
- Específicamente, la invención tiene como objetivo dar a conocer una matriz de acero que se pueda utilizar como material para herramientas de moldeo para materiales plásticos, es decir, un acero que esté esencialmente exento de carburos primarios y que, en condiciones de uso, presente una matriz constituida por martensita revenida.

### DESCRIPCIÓN DE LA INVENCION

- 50 Los fines y las características mencionados anteriormente se pueden lograr por medio de un acero que se caracteriza por lo que se indica en las reivindicaciones de patente adjuntas.

Por cuanto concierne a los elementos individuales de la aleación de acero y su interacción mutua, se aplica lo

siguiente. Los porcentajes mencionados en este texto siempre se refieren a % en peso si no se indica lo contrario.

- El acero de la invención, según se mencionó anteriormente, no debe contener ningún carburo primario, pero, sin embargo, presenta resistencia al desgaste, lo cual resulta adecuado para la mayoría de las aplicaciones. Esto se logra mediante una dureza adecuada dentro del intervalo comprendido entre 54 y 59 HRC, adecuadamente entre 56 y 58 HRC, en el estado templado y revenido a alta temperatura del acero, al mismo tiempo, dado que el acero presentará una tenacidad muy buena. Para lograr esto, el acero contiene carbono y vanadio en cantidades bien equilibradas. Así, el acero debe contener al menos el 0,43%, preferentemente al menos el 0,44% y adecuadamente al menos el 0,46% de C. Además el acero debe contener al menos el 0,30%, preferentemente al menos el 0,40% y adecuadamente al menos el 0,45% de V, lo que hace que sea posible que la matriz martensítica del acero, en el estado templado y revenido del acero, contenga una cantidad suficiente de carbono en solución sólida con el fin de impartir la citada dureza a la matriz, y también que se forme en la matriz del acero una cantidad adecuada de carburos de vanadio muy pequeños, de precipitación secundaria, que logran un aumento de la dureza. Por otra parte, el acero contiene carburos de vanadio muy pequeños, de precipitación primaria, que contribuyen a la prevención del crecimiento del grano durante el tratamiento térmico. No debería estar presente ningún otro carburo aparte de los carburos de vanadio. Con el fin de lograr las citadas condiciones, el acero no debe contener más del 0,60%, preferentemente como máximo el 0,55% y adecuadamente como máximo el 0,53% de C, y como máximo el 0,65%, preferentemente como máximo el 0,65% y adecuadamente como máximo el 0,60% de V. Nominalmente, el acero contiene el 0,49% de C y el 0,52% de V. El contenido nominal de carbono en solución sólida en el estado templado y revenido a alta temperatura del acero asciende a alrededor del 0,45%.
- 20 Hay silicio presente al menos en una cantidad cuantificable como elemento residual de la fabricación del acero. El silicio, sin embargo, merma la tenacidad del acero y, por consiguiente, no debe estar presente en una cantidad superior al 0,25%. Normalmente, hay silicio presente en una cantidad mínima de al menos el 0,05%. Un efecto del silicio es que aumenta la actividad del carbono en el acero y, por lo tanto, contribuye a permitir una dureza deseada del acero. Por lo tanto, puede resultar ventajoso que el acero contenga silicio en una cantidad de al menos el 0,1%.
- 25 Nominalmente, el acero contiene el 0,2% de silicio.

El aluminio, hasta cierto punto, puede tener el mismo efecto o un efecto similar al del silicio, al menos en un acero del tipo actual. Ambos se pueden utilizar como agentes de oxidación en relación con la fabricación del acero. Ambos son formadores de ferrita y pueden aportar un efecto de temple en disolución de la matriz del acero. Por consiguiente, el silicio se puede reemplazar parcialmente por el aluminio hasta una cantidad máxima del 0,25%. No obstante, la presencia de aluminio en el acero hace necesario que el acero esté muy bien desoxidado y que tenga un contenido muy bajo de nitrógeno, dado que, de lo contrario, se formarían óxidos de aluminio y nitruros de aluminio que reducirían la ductilidad y la tenacidad del acero de forma considerable. En una realización preferente, el acero contiene como máximo el 0,1% y de manera más conveniente como máximo el 0,03% de Al.

Habrá manganeso, cromo y molibdeno en el acero en una cantidad suficiente con el fin de permitir una templabilidad adecuada del acero. El manganeso también tiene la función de ligar esos contenidos sumamente bajos de sulfuro que puedan estar presentes en el acero para formar sulfuros de manganeso. Por lo tanto, habrá manganeso en una cantidad comprendida entre el 0,1% y el 2%, preferentemente en una cantidad entre el 0,2% y el 1,5%. Adecuadamente, el acero contiene al menos el 0,25% y como máximo el 1,0% de manganeso. Un contenido de manganeso nominal es del 0,50%.

Habrá cromo en una cantidad mínima del 3,0%, preferentemente de al menos el 4,0% y adecuadamente de al menos el 4,5%, con el fin de dar al acero una templabilidad deseada cuando el acero contenga manganeso y cromo en cantidades que son características del acero. Como máximo, el acero puede contener el 7,0%, preferentemente como máximo el 6,0% y adecuadamente como máximo el 5,5% de cromo.

También habrá molibdeno en una cantidad adecuada en el acero con el fin de impartir al acero, en combinación con, en primer lugar, el cromo, una dureza deseada y también para aportarle un temple secundario deseado. No obstante, el molibdeno en contenidos muy alto causa la precipitación de carburos M<sub>6</sub>C, que preferentemente no deben estar presentes en el acero. Teniendo en cuenta lo anterior, el acero deberá contener al menos el 1,5% y como máximo el 4,0% de Mo. Preferentemente, el acero contiene al menos el 1,8% y como máximo el 3,2% de Mo, adecuadamente al menos el 2,1% y como máximo el 2,6% de Mo, con el fin de no forzar a que el acero contenga carburos M<sub>6</sub>C no deseados a expensas de y/o además de la cantidad deseada de carburos MC. El molibdeno, completa o parcialmente, se puede reemplazar por tungsteno con el fin de lograr una templabilidad deseada, pero para esto se requiere hasta dos veces la cantidad de tungsteno en comparación con el molibdeno, lo que supone una desventaja. Además de recirculación de los desechos que se producen en relación con la fabricación del acero se hace más complicada si el acero contiene una cantidad sustancial de tungsteno. Por lo tanto, el tungsteno no debe estar presente en una cantidad de más de como máximo el 1,0%, preferentemente como máximo el 0,3%, adecuadamente como máximo el 0,1%. De manera más conveniente, el acero no debería contener ninguna cantidad de tungsteno añadido intencionadamente, lo que en la realización más preferida no debería tolerarse más que como una impureza en la forma de un elemento residual procedente de las materias primas que se usan en la fabricación del acero.

Además de los elementos citados, por lo general el acero no tiene que contener ningún otro elemento de aleación añadido intencionadamente. El cobalto, por ejemplo, es un elemento que normalmente no es necesario para la consecución de las características deseadas del acero. Sin embargo, el cobalto puede estar presente opcionalmente en una cantidad de como máximo el 2,0%, preferentemente como máximo el 0,7%, con el fin de mejorar aún más la

- resistencia al revenido. Normalmente, sin embargo, el acero no contiene cobalto por encima del nivel de impurezas. Otro elemento que normalmente no tiene por qué existir en el acero pero que, opcionalmente, puede estar presente, es el níquel, con el fin de mejorar la ductilidad del acero. No obstante, con contenidos muy altos de níquel, se corre el riesgo de formación de austenita retenida. Por lo tanto, el contenido de níquel no debe superar como máximo el
- 5 2,0%, preferentemente como máximo el 1,0%, adecuadamente como máximo el 0,7%. Si se considera que es deseable que el acero presente un contenido efectivo de níquel, el contenido, p. ej., puede estar comprendido entre el 0,30 y el 0,70%, adecuadamente alrededor del 0,5%. En una realización preferida, cuando se considere que el acero presenta una ductilidad y tenacidad suficiente también sin la adición de níquel, el acero, por motivos de coste, no debe contener níquel en cantidades que excedan el contenido de níquel que el acero debe contener
- 10 inevitablemente en forma de impurezas procedentes de las materias primas utilizadas, es decir, menos del 0,30%. Además, el acero, de una manera conocida *per se*, se puede alear opcionalmente con un contenido muy bajo de elementos diferentes con el fin de mejorar las características del acero en varios aspectos, p. ej., su templabilidad, o con el fin de facilitar la fabricación del acero. Por ejemplo, el acero puede estar aleado opcionalmente con boro en cantidades de hasta 30 ppm con el fin de mejorar la ductilidad en caliente del acero.
- 15 Por el contrario, otros elementos son explícitamente no deseados. Por consiguiente, el acero no contiene ningún otro formador de carburos importante aparte del vanadio. De este modo, el niobio, el titanio y el circonio son explícitamente no deseados. Sus carburos son más estables que los carburos de vanadio y requieren una temperatura más alta que el carburo de vanadio para lograr su disolución en la operación de temple. Mientras que los carburos de vanadio comienzan a disolverse a 1000 °C y se disuelven completamente a 1100 °C, los carburos de
- 20 niobio no comienzan a disolverse hasta aproximadamente 1050 °C. Los carburos de titanio y de circonio son aún más estables y no empiezan a disolverse hasta que se alcanzan temperaturas superiores a 1200 °C y no se disuelven por completo hasta el estado fundido del acero. Por consiguiente, los formadores de carburos y nitruros importantes aparte del vanadio, en particular el titanio, el circonio y el niobio, no deben estar presentes en cantidades superiores al 0,1%, preferentemente como máximo el 0,03%, adecuadamente como máximo el 0,010%.
- 25 De manera más conveniente, el acero no contiene más de como máximo el 0,005% de cada uno de los citados elementos. De igual modo, el contenido de fósforo, azufre, nitrógeno y oxígeno se mantiene a un nivel muy bajo en el acero con el fin de maximizar la ductilidad y la tenacidad del acero. De este modo, el fósforo puede estar presente como una impureza inevitable en una cantidad máxima del 0,035%, preferentemente como máximo del 0,015%, adecuadamente como máximo del 0,010%. El oxígeno puede estar presente en una cantidad máxima del 0,0020%
- 30 (20 ppm), preferentemente como máximo del 0,0015% (15 ppm), adecuadamente como máximo del 0,0010% (10 ppm). El nitrógeno debe estar presente en una cantidad como máximo del 0,030%, preferentemente como máximo del 0,015%, adecuadamente como máximo del 0,010%.

Si el acero no está sulfurado con el fin de mejorar la capacidad de mecanización del acero, el acero contiene como máximo el 0,03% de azufre, preferentemente como máximo el 0,010% de S, adecuadamente como máximo el

35 0,003% (30 ppm) de azufre. Sin embargo, se puede contemplar la mejora de la capacidad de mecanización del acero mediante la adición intencionada de azufre en una cantidad por encima del 0,03%, preferentemente por encima del 0,10% hasta un máximo del 0,30% de azufre. Si el acero está sulfurado, también puede contener, de una manera conocida *per se*, entre 5 y 75 ppm de Ca y entre 50 y 100 ppm de oxígeno, preferentemente entre 50 y 50 ppm de Ca y entre 60 y 90 ppm de oxígeno.

- 40 Durante la fabricación del acero, se producen lingotes o piezas con una masa superior a 100 kg, preferentemente de hasta 10 toneladas, y grosores superiores a 200 mm, preferentemente de hasta por lo menos 350 mm. Preferentemente, se aplica una fabricación metalúrgica de fusión convencional mediante colada en lingote o, adecuadamente, colada en sifón. Además, se puede emplear la colada continua, siempre que esté seguida de la refundición hasta las dimensiones deseadas de acuerdo con lo descrito anteriormente, p. ej., por refusión ESR. La
- 45 fabricación mediante metalurgia de polvos o la conformación por pulverización son procesos innecesariamente costosos y no ofrecen ninguna ventaja que justifiquen el mayor coste. Los lingotes producidos se trabajan en caliente hasta las dimensiones deseadas, momento en el que también se disgrega la estructura de colada.

La estructura del material trabajado en caliente se puede normalizar de diferentes formas mediante tratamiento térmico con el fin de optimizar la homogeneidad del material, p. ej., mediante un tratamiento de homogeneización a

50 alta temperatura, adecuadamente entre 1200 °C y 1300 °C. Por lo general, el fabricante suministra el acero al cliente en el estado recocido blando del acero, con una dureza comprendida entre 160 y 220 HB, normalmente entre 190 HB. Las herramientas se fabrican normalmente mediante operaciones de mecanización en el estado recocido blando del acero, pero también es concebible *per se* la fabricación de las herramientas mediante operaciones de mecanización convencional o mediante mecanización por descarga eléctrica en el estado templado y revenido del

55 acero.

El tratamiento térmico de las herramientas fabricadas normalmente lo realiza el cliente, preferentemente en un horno de vacío, mediante una operación de temple a una temperatura comprendida entre 950 °C y 1075 °C, adecuadamente entre 1000 °C y 1050 °C, para la completa disolución de los carburos presentes, durante un período comprendido entre 15 min y 2 h, preferentemente durante entre 15 y 60 min, seguido de un enfriamiento a entre 20

60 °C y 70 °C, y un revenido a alta temperatura entre 500 °C y 570 °C, adecuadamente entre 520 °C y 560 °C. En el estado recocido blando del acero, el acero presenta una matriz ferrítica que contiene carburos pequeños distribuidos uniformemente que pueden ser de diferentes tipos. En el estado templado y no revenido, el acero posee una matriz compuesta de martensita no revenida. En términos de cálculo mediante cálculos teóricos conocidos, el acero en equilibrio contiene alrededor del 0,6% en volumen de carburos MC. Durante el revenido a alta temperatura, se

obtiene una precipitación adicional de carburos MC que imparte al acero la dureza deseada. Estos carburos tienen un tamaño submicroscópico. Por consiguiente, es imposible determinar la cantidad de carburos mediante estudios microscópicos convencionales. Si la temperatura aumenta demasiado, se provoca que los carburos MC sean más gruesos y se vuelvan inestables, lo que provoca que se establezcan los carburos de cromo de rápido crecimiento, un efecto no deseado. Por estas razones, es importante que el revenido se realice a las temperaturas y tiempos de mantenimiento mencionados anteriormente en cuanto a la composición de la aleación del acero de la invención se refiere.

Otras características y aspectos de la invención serán evidentes a partir de las reivindicaciones de patente y de la siguiente descripción de los experimentos realizados, así como de la discusión posterior.

10 BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

En la siguiente descripción de los experimentos realizados, se hará referencia a los dibujos adjuntos, en los que

La figura 1 es un gráfico que ilustra la dureza tras el temple de los aceros examinados frente a la temperatura de austenización,

La figura 2 es un gráfico que ilustra la dureza frente a la temperatura de revenido dentro de un intervalo de 15 temperaturas limitado,

La figura 3 es un gráfico que ilustra la dureza de los aceros examinados,

La figura 4 muestra un diagrama que ilustra la ductilidad en términos de la energía de impacto en función del tiempo de enfriamiento para muestras templadas en horno de vacío seguido por un revenido hasta aproximadamente 55 HRC, y

20 La figura 5 y la figura 6 son microfotografías que muestran, con gran ampliación, las superficies de fracturas de dos aceros examinados.

DESCRIPCIÓN DE LOS EXPERIMENTOS REALIZADOS

Materiales

Se fabricaron ocho aleaciones de acero en forma de lingotes de laboratorio con una masa de 50 kg. En la tabla 1, 25 aceros 1A-8A, se muestran las composiciones químicas de estos lingotes, que fueron fabricados a escala de laboratorio. Los aceros 1A-6A son aceros experimentales, mientras que los aceros 7A y 8A son materiales de referencia. En la tabla 1 se indican también las composiciones objetivo, 1R-6R, de los aceros experimentales y las composiciones nominales, aceros 7N y 8N, de los materiales de referencia, así como uno de los aceros comerciales mencionados en el preámbulo, acero 9N. El contenido de azufre de los lingotes de 50 kg no se pudo mantener en un 30 nivel deseablemente bajo en la mayoría de las hornadas de laboratorio, debido a las limitaciones de la técnica de fabricación. En todos los aceros experimentales, el contenido de titanio fue del orden de 30 ppm y el contenido de niobio del orden de 10 ppm. El contenido de circonio fue inferior a 10 ppm. Se aplicó el siguiente proceso: tratamiento de homogeneización durante 10 horas a 1270 °C/aire, forja hasta un Ø de 60x60 mm, tratamiento de regeneración a 1050 °C/2 h/aire y recocido blando a 850 °C/2 h, refrigeración a 10 °C/h hasta 600 °C y, a 35 continuación, refrigeración libre al aire.

**Tabla 1. Composición química, % en peso, de las aleaciones experimentales y materiales de referencia, el resto de Fe e impurezas inevitables**

<b>R: Composición objetivo de las aleaciones experimentales</b>										
<b>N: Composición nominal de los materiales de referencia</b>										
<b>Acero</b>	<b>C %</b>	<b>Si %</b>	<b>Mn %</b>	<b>P %</b>	<b>S %</b>	<b>Cr %</b>	<b>Mo %</b>	<b>V %</b>	<b>N %</b>	<b>O (ppm)</b>
1R	0,42	0,20	0,50	<0,01	≤0,005	5,00	2,30	0,35	-	-
1A	0,41	0,22	0,47	0,004	0,006	4,97	2,33	0,36	0,016	71
2R	0,44	1,00	0,50	<0,01	≤0,005	5,00	2,30	0,35	-	-
2A	0,43	0,88	0,46	0,004	0,006	4,97	2,29	0,37	0,013	71
3R	0,43	0,20	0,50	<0,01	≤0,005	5,00	2,30	0,55	-	-
3A	0,41	0,19	0,40	0,003	0,006	4,89	2,34	0,51	0,020	75
4R	0,44	0,20	0,50	<0,01	≤0,005	5,00	2,30	0,52	-	-
4A	0,43	0,11	0,44	0,004	0,004	4,80	2,32	0,48	0,02	93
5R	0,48	0,20	0,50	<0,01	<0,005	5,00	2,30	0,52	-	-

## ES 2 385 336 T3

5A	0,46	0,11	0,45	0,004	0,005	4,90	2,31	0,49	0,02	-
6R	0,48	1,00	0,50	<0,01	≤0,005	5,00	2,30	0,55	-	-
6A	0,47	0,98	0,47	0,004	0,006	5,13	2,32	0,55	0,017	64
7N	0,60	0,35	0,80	<0,02	≤0,005	4,50	0,50	0,20		
7A	0,59	0,32	0,72	0,004	0,006	4,44	0,54	0,28	0,013	59
8N	0,55	1,00	0,75	<0,02	≤0,005	2,60	2,25	0,88		
8A	0,52	1,01	0,71	0,004	0,006	2,68	2,25	0,87	0,016	60
9N	0,53	0,30	0,70	<0,02	≤0,005	3,25	1,50	0,35		

Los materiales se examinaron con el fin de determinar la dureza después del recocido blando, la microestructura después de diferentes tratamientos térmicos, la dureza después del temple desde diferentes temperaturas de austenización, la dureza después del temple a diferentes temperaturas de revenido, la templabilidad, la tenacidad de impacto y la resistencia al desgaste. A continuación se presentan los resultados de estas investigaciones. Además, los cálculos de los equilibrios teóricos se realizaron mediante el método Thermo-Calc con referencia al contenido de carbono disuelto y la fracción de carburo a la temperatura de austenización indicada para los aceros que tienen las composiciones objetivo 1R-6R y las composiciones nominales 7N-9N de los aceros de referencia, respectivamente, mostrados en la tabla 2.

10 **Tabla 2. Contenidos de carbono disuelto en % en peso, a la temperatura de austenización, T<sub>A</sub>, MC % en volumen a T<sub>A</sub>**

Acer	T <sub>A</sub> óptima (°C)	% C a la T <sub>A</sub>	% MC a la T <sub>A</sub>	% M7C3 a la T <sub>A</sub>
1R	1020	0,41	0,14	-
2R	1020	0,41	0,42	-
3R	1020	0,38	0,56	-
4R	1020	0,39	0,52	-
5R	1020	0,42	0,59	-
6R	1020	0,40	0,93	-
7N	960	0,52	0,13	1,23
8N	1050	0,39	1,67	-
9N	960	0,47	0,64	-

### Dureza de recocido

En la tabla 3 se indican la dureza de recocido blando y la dureza Brinell (HB) de las aleaciones 1A-8A. Las tablas 1 y 15 3 muestran que un contenido bajo de silicio reduce la dureza por recocido blando.

**Tabla 3. Dureza de recocido**

Acero	Dureza (HB)
1A	174
2A	199
3A	176
4A	171
5A	181
6A	212
7A	191
8A	222

## Microestructura

Se examinó la microestructura en el estado recocido blando y después del tratamiento térmico hasta una dureza de entre 55 y 58 HRC de las aleaciones 1R-8R. La microestructura consistió en martensita revenida en el estado templado y revenido del acero. No se detectaron carburos primarios. Tampoco se detectaron carburos, nitruros y/o carbonitruros de titanio en ninguna aleación.

## Temple y revenido

Los aceros 1A-6A fueron austenizados por calentamiento durante 30 minutos a diferentes temperaturas entre 1000 y 1050 °C, mientras que los aceros de referencia 7A y 8A fueron austenizados durante 30 minutos a 960 °C y 1050 °C, respectivamente, que son las temperaturas de austenización óptimas de estos aceros conocidos. En la figura 1 se muestra la influencia de la temperatura de austenización sobre la dureza de los aceros 1A-6A, y también se muestra la dureza de los materiales de referencia 7A y 8A después de dicho tratamiento de austenización.

Se examinó la influencia de la temperatura de revenido sobre la dureza de los aceros 1A-8A después de la austenización a 1025 °C de los aceros 1A-6A, a 960 °C del acero 7A, y a 1050 °C del acero 8A, durante 30 minutos. Se observó un típico temple secundario a una temperatura entre 450 °C y 600 °C para todos los aceros, excepto para el acero 7A. La figura 2 muestra la dureza frente a la temperatura de revenido dentro del intervalo de temperaturas de interés comprendido entre 500 °C y 600 °C. Todos los aceros se sometieron a revenido durante 2 x 2 horas a las temperaturas indicadas. El acero 6A mostró la mejor resistencia al revenido de los materiales examinados hasta una temperatura de revenido de 550 °C. El acero 2A presentó una resistencia al revenido que era igual de buena que la del material de referencia 8A hasta 525 °C, mientras que los aceros 1A y 3A-5A mostraron una resistencia al desgaste en un nivel inferior al de la resistencia al revenido del acero 8A, pero significativamente más alta que la resistencia al revenido del acero 7A. Por lo tanto, se puede considerar que la resistencia al revenido de las aleaciones experimentales 1A-6A es buena, lo cual es importante para una matriz de acero que pueda requerir una resistencia al revenido a una temperatura de hasta aproximadamente 500 °C con el fin de obtener una resistencia al desgaste necesaria para algunas aplicaciones de herramientas. En otras palabras, a una temperatura de entre 450 °C y 600 °C, más exactamente a una temperatura de entre 500 °C y 560 °C, se obtiene un pronunciado temple secundario por precipitación de carburos MC. La resistencia al desgaste se ve favorecida por un alto contenido de silicio, pero también si el contenido de silicio es bajo, como ocurre en el acero 5A, es posible mantener una dureza superior a 56 HRC después de un revenido a alta temperatura hasta aproximadamente 540 °C. Esto resulta ventajoso, ya que hace posible llevar a cabo el tratamiento superficial dentro de un intervalo de temperaturas bastante amplio sin que la dureza de la herramienta sea demasiado baja.

## Templabilidad

En la figura 3 se muestra una comparación de la templabilidad en términos de dureza Vickers (HV10) frente al tiempo necesario para enfriar de 800 a 500 °C, en la que se utiliza una representación de los datos procedentes de diagramas de transformación en condiciones de enfriamiento continuo (CCT) para las aleaciones examinadas 1A-8A. Como se desprende de la tabla, todas las aleaciones experimentales 1A-6A poseen una templabilidad mejor que los aceros de referencia 7A y 8A.

En especial, el acero 5A posee una dureza muy buena, mientras que el material de referencia 8A solamente alcanza 52 HRC en el estado templado a  $t_{8-5} = 1000$  s. El acero de referencia 7A alcanza 55 HRC, mientras que todas las aleaciones experimentales 1A-6A alcanzan una dureza  $> 56$  HRC a dicha velocidad de enfriamiento.

## 40 Ductilidad

En la figura 4 se muestra la ductilidad en términos de energía de impacto absorbida por barras de ensayo sin muescas a 20 °C correspondiente a barras de las aleaciones 1A-8A enfriadas en un horno de vacío frente al tiempo de enfriamiento entre 800 °C y 500 °C. Los tiempos de enfriamiento mostrados son tiempos de enfriamiento realistas para herramientas de moldeo para el moldeo de plástico de tamaño completo. Todos los aceros se someten a revenido hasta un valor objetivo de 55 HRC. La mejor ductilidad se obtuvo con las aleaciones experimentales 3A, 4A y 5A, que contienen aproximadamente entre el 0,1% y aproximadamente el 0,2% de Si y aproximadamente el 0,5% de V. Esto también se ilustra en la tabla 4, que muestra la ductilidad en términos de energía de impacto absorbida por barras de ensayo sin muescas a 20 °C, templadas en un horno de vacío y enfriadas a una velocidad correspondiente a  $t_{8-5} = 1190$  s y revenidas hasta una dureza de 55 + 0,8 HRC. Las correspondientes variantes con un menor contenido de vanadio presentan una ductilidad inferior. Los estudios comparativos de las superficies de fractura muestran que las variantes con el menor contenido de vanadio tienen mayores tamaños de grano austenítico, figura 5, que puede explicarse por el hecho de que estas aleaciones presentan un contenido inferior de crecimiento de grano austenítico, que evita la aparición de carburos de vanadio en la matriz, en comparación con las variantes que poseen un contenido ligeramente mayor de vanadio. Las figuras 5 y 6 muestran las superficies de fractura de las barras de ensayo fabricadas con las aleaciones 1A y 3A, respectivamente. La microfotografía de la figura 6 muestra una fractura dúctil de una barra de ensayo fabricada con un acero con una composición de la aleación adecuada según la invención, que tiene un tamaño de grano austenítico fino, algo que es un requisito previo para una buena ductilidad.

**Tabla 4. Ductilidad en términos de energía de impacto absorbida en la dirección transversal de las barras de ensayo sin muescas a 20 °C; dureza 55 + 0,8 HRC**

Acero	Ductilidad (J)
1A	195
2A	80
3A	245
4A	255
5A	275
6A	180
7A	175

**Resistencia al desgaste**

- 5 Se llevó a cabo un ensayo de espiga sobre espiga con SiO<sub>2</sub> como un agente de desgaste por abrasión para la aleaciones examinadas 1A-8A. El acero 7A mostró la menor resistencia al desgaste. A durezas comparables, los demás aceros presentaron una resistencia al desgaste igualmente buena. Sin embargo, aquellas aleaciones que tenían un contenido de silicio superior tenían una resistencia al desgaste algo mejor.

**DISCUSIÓN**

- 10 El objetivo del trabajo llevado a cabo en conexión con el desarrollo de la presente invención es lograr un acero que posea una combinación de características deseada, tal como se indica en la columna de la izquierda de la tabla 5. En esta tabla se utilizan calificaciones varían entre 1 y 3, donde 1 = valor más bajo y 3 = el mejor valor. La aleación experimental que resulta más cercana a la ideal es el acero 5A. Este acero se ha comparado con el material de referencia 8A. Esta comparación reveló que el acero 5A, en términos de su uso para herramientas de moldeo para el moldeo de plástico, no presenta inconvenientes graves, sino numerosas ventajas. En comparación con el material de referencia 7A, es una ventaja importante que el acero se pueda someter a revenido a alta temperatura, mientras que el acero 7A requiere un revenido a baja temperatura, con los consiguientes inconvenientes conocidos en relación con la mecanización por descarga eléctrica, la retención de elevadas tensiones después del tratamiento térmico y las restricciones en cuanto a la elección del tratamiento superficial. Las calificaciones correspondientes a la vida a fatiga se calculan haciendo referencia a la pureza de los aceros. La resistencia a la presión se calcula sobre la base de la temperatura de revenido y la dureza de los materiales después del revenido. La capacidad de amolado, capacidad de mecanización y capacidad de pulido se han calculado sobre la base de la ductilidad, la dureza por recocido blando y el contenido de carburos de los materiales. La capacidad de soldadura está relacionada con el contenido de carbono y el contenido de elementos de aleación. La eficiencia económica de la producción se ha considerado con referencia a la posibilidad de fabricar los aceros de una manera convencional sin problemas.
- 25

**Tabla 5. Combinación de características deseada; comparación de las características de los aceros examinados**

Parámetros y características	Combinación ideal de características	Acero 8A	Acero 7A	Acero 5A
Templabilidad	3	1	2	3
Estabilidad dimensional durante el tratamiento térmico	3	1	2	3
Dureza tras el revenido (56-58 HRC)	3	3	3	3
Tenacidad al impacto	3	2	1	3
Resistencia al desgaste	2	2	3	3
Vida a fatiga	3	3	3	3
Resistencia a la presión	3	3	3	3
Capacidad de amolado	3	3	3	3



Capacidad de mecanización	3	3	3	2
Capacidad de mecanización por descarga eléctrica	3	3	2	3
Capacidad de soldadura	2	2	1	2
Capacidad de pulido	3	3	3	3
Eficiencia económica de la producción	3	3	2	3

En comparación con la combinación ideal de características, el acero 5A posee una dureza algo baja después del temple y revenido a alta temperatura. Sobre la base de las experiencias obtenidas mediante estos experimentos, se estima que el contenido de silicio de una composición de acero óptima debe ser de aproximadamente el 0,2% y que el contenido de carbono disuelto a 1020 °C en tal acero debe ser de aproximadamente el 0,45%. Sin embargo, el contenido de silicio no debe exceder del 0,25% en la composición óptima con el fin de aportar una óptima ductilidad y tenacidad de la aleación. En ese caso, el valor objetivo del contenido de carbono del acero debe ser del 0,49% con el fin de brindar una dureza objetivo de 57-58 HRC después del temple y revenido a alta temperatura. Se estima que un contenido de vanadio adecuado de la composición óptima es del 0,52%, con el fin de obtener un margen más amplio contra el crecimiento del grano en relación con el tratamiento térmico. El contenido de fósforo, azufre, nitrógeno y oxígeno se debe mantener en un nivel muy bajo con el fin de maximizar la ductilidad y la tenacidad. El acero no debe contener ningún otro formador de carburos añadido intencionadamente, aparte del vanadio. Los demás formadores de carburos, tales como titanio, circonio y niobio, están limitados cada uno a un máximo del 0,005% en la aleación óptima. El aluminio puede estar presente como un elemento residual de la fabricación del acero y está limitado como máximo al 0,030, preferiblemente a un máximo del 0,015%.

Por consiguiente, una aleación óptima para los aceros de moldeo para el moldeo de plástico debe presentar la composición que se indica en la tabla 6.

#### EXPERIMENTOS A ESCALA DE PRODUCCIÓN

Se fabricó un acero 10P según la invención en un horno de arco eléctrico. La composición objetivo fue la composición de acuerdo con la tabla 6. La hornada alcanzó un peso de 65 toneladas. La composición analizada tan solo difirió muy levemente de la composición objetivo. Los únicos elementos que se encontraron fuera de la norma propuesta fueron azufre y nitrógeno, cuyo contenido ascendió al 0,011% y el 0,013%, respectivamente, en vez del valor máximo del 0,010%. En la tabla 7 se incluye la composición completa del acero 10P, en la que también se indican el contenido de las impurezas más importantes. En la misma tabla, también se muestra la composición de los tres materiales de referencia examinados, 7P, 8P y 9P, tomados de la producción del solicitante. Estos aceros se corresponden con los aceros 7N, 8N y 9N, que tienen las composiciones nominales indicadas en la tabla 1. Asimismo, los materiales de referencia se fabricaron en forma de hornadas de 65 toneladas en un horno de arco eléctrico. Todas las hornadas se prepararon por colada en sifón en forma de lingotes. Los lingotes que fueron fabricados a partir del acero 9P también se refinaron mediante refundido ESR. Los lingotes, incluidos los lingotes ESR, se forjaron en la forma de barras de dimensiones variables. Las barras fueron sometidas a diferentes tratamientos térmicos antes de la extracción de las muestras de ensayo. En la tabla 8 se indican las dimensiones y tratamientos térmicos de las barras examinadas.

Seguidamente, se fabricaron en el horno de arco eléctrico otras tres hornadas de producción, con composiciones químicas de acuerdo con la invención, cada una de 65 toneladas. A partir de los aceros, se produjeron electrodos, los cuales fueron sometidos a ESR (refusión por electroescoria). Los lingotes ESR se forjaron en la forma de barras de dimensiones variables. Estas barras también fueron sometidas a diferentes tratamientos térmicos antes de la extracción de las muestras de ensayo. Del mismo modo, en la tabla 7 también se muestran las composiciones químicas de estas barras, los aceros 11P, 12P y 13P, mientras que sus dimensiones y tratamientos térmicos aparecen en la tabla 8.

**Tabla 8. Dimensiones de la barra y tratamientos térmicos**

N.º acero	Dimensiones de la barra, mm	Tratamiento térmico
7P	∅315	TA 960 °C, 30 min Revenido 200 °C, 2x2 h
8P	Barra plana ancha, Grosor 102 mm	TA 950 °C, 30 min Revenido 200 °C, 2x2 h
9P	∅330 mm	TA 1050 °C, 30 min Revenido 575 °C, 2x2 h

## ES 2 385 336 T3

<b>9P</b>	Barra plana, 350x127 mm	-"
<b>10P</b>	Ø3350 mm	TA 1025 °C, 30 min Revenido 525 °C, 2x2 h
<b>10P</b>	Barra plana, 396x136 mm	-"
<b>11P</b>	Barra plana, 396x136 mm	TA 1020 °C, 30 min Revenido 525 °C, 2x2 h
<b>12P</b>	Ø350 mm	TA 1000 °C, 30 min Revenido 550 °C, 2x2 h
<b>13P</b>	Barra plana, 596x346 mm	TA 1000 °C, 30 min Revenido 550 °C, 2x2 h

Tabla 6. Composición de la aleación óptima, % en peso, contenido de carbono disuelto y contenido de carburos a 1020 °C

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	Al	N	O	C	MC % en vol.
Mín.	0,46	0,10	0,40	-	-	4,85	2,20	0,47	-	-	-	0,42	0,51
Valor objetivo	0,49	0,20	0,50	≤0,010	≤0,0010	5,00	2,30	0,52	≤0015	≤0,010	<0,00008	0,44	0,56
Máx.	0,51	0,25	0,60	≤0,010	≤0,010	5,15	2,40	0,57	≤0030	≤0,010	≤0,00008	0,46	0,59

**Tabla 7. Composición química, % en peso, y ppm en peso, respectivamente, de los aceros a escala de producción examinados, resto de Fe e impurezas**

N.º de acero	C %	Si %	Mn %	P ppm	S ppm	Cr %	Ni %	Mo %	W ppm	Co ppm	V %	Ti ppm	Nb ppm	A1 ppm	N ppm	B ppm	O ppm
7P	0,59	0,34	0,81	80	33	4,59	0,07	0,49	100	n.a.	0,25	10	20	250	170	n.a.	<12
8P	0,53	0,34	0,68	190	20	3,11	0,09	1,53	n.a.	n.a.	0,04	20	<20	160	80	n.a.	9
9P	0,55	1,02	0,74	140	2	2,60	0,08	2,23	n.a.	n.a.	0,83	<20	<20	410	80	23	<12
10P	0,51	0,22	0,44	70	11	5,03	0,08	2,32	20	10	0,50	25	<10	260	130	1	8
11P	0,48	0,19	0,48	70	6	5,00	n.a.	2,31	n.a.	n.a.	0,50	n.a.	n.a.	160	160	n.a.	10
12P	0,46	0,18	0,48	70	5	4,96	0,06	2,27	30	90	0,50	17	10	60	100	1	14
13P	0,51	0,13	0,48	80	3	5,02	0,06	2,34	20	80	0,51	16	10	90	110	1	8

n.a. = no analizado

Las muestras que fueron extraídas de las barras de acuerdo con la tabla 8 se examinaron con referencia a la dureza y tenacidad de impacto. Los resultados se recogen en la tabla 9. En esta tabla también se indican el tipo de barra de ensayo (ninguna de las barras de ensayo tenía muescas) y la posición de la barra de ensayo en la barra.

CL2 significa una barra de ensayo procedente de una barra redonda, extraída del centro de la barra en la dirección longitudinal de la barra y con la dirección del impacto en la dirección perpendicular de la barra,

CR2 significa lo mismo que CL2, pero con la dirección del impacto en la dirección longitudinal de la barra (condiciones más desfavorables),

TL2 significa una barra de ensayo procedente de una barra plana y, en otros aspectos, de acuerdo con CR2,

LT2 significa una barra de ensayo procedente de una barra plana y, en otros aspectos, de acuerdo con CL2, y

10 ST2 significa una barra de ensayo procedente de una barra plana, extraída del centro de la barra en la dirección perpendicular más corta y con la dirección del impacto en la dirección longitudinal (condiciones más desfavorables).

**Tabla 9. Dureza y tenacidad de impacto de los aceros examinados fabricados a escala de producción**

N.º de acero, tipo de barra de ensayo y posición	Dureza, HRC	Tenacidad al impacto, J
7P, CL2	58	42
8P, TL2	57	83
9P, CL2	58	60
9P, TL2	58	159
10P, CR2	57,5	58
10P, TL2	57,5	196
11P, LT2	55,9	336
11P, ST2	55,9	216
12P, CR2	57	285
13P, ST2	57,7	239

15 Como se muestra en la Tabla 9, las durezas de los aceros examinadas fueron igualmente buenas, si bien fue necesario, por cuanto respecta a los aceros 7P y 8P, aplicar un revenido a baja temperatura, con los consiguientes inconvenientes conocidos. No obstante, la tenacidad de impacto comparativamente buena del acero 8P debe ser atribuida, en primer lugar, a la dimensión más delgada de la barra plana examinada hecha de ese acero. En el caso del acero 9P, solo se logró una tenacidad de impacto moderadamente buena, a pesar de que el acero se sometió a refinado ESR. El valor medido de la tenacidad de impacto de la barra redonda del acero 10P, J 58, fue solo ligeramente menor que el valor medido de la tenacidad de impacto de la barra redonda del acero 9P, 60 J, a pesar de la desfavorable dirección de impacto. Además, se puede observar que, en el caso de pruebas iguales de tenacidad de impacto de las barras planas de los aceros 9P y 10P, claramente la mejor la tenacidad de impacto, 196 J, se observó en el caso del acero 10P según la invención, que se debe comparar con 159 J para el acero 9P. En esta comparación, se debe considerar en particular que el acero 9P se sometió a refinado ESR, algo que normalmente mejora la tenacidad. Finalmente, cabe señalar que la tenacidad de impacto de los aceros 11P, 12P y 13P de la invención se ha visto fuertemente mejorada mediante el refundido ESR, en comparación con el material no sometido a refundido ESR, acero 10P.

**REIVINDICACIONES**

1. Un acero para herramientas trabajado en caliente para el moldeado de plásticos, caracterizado porque tiene la siguiente composición en % en peso o en ppm si así se especifica:

	C	0,46-0,60
5	(Si + Al)	de trazas a 0,25
	Mn	0,1-2,0
	Cr	3,0-7,0
	(Mo + W/2)	1,5-3,1
	Mo	≤ 2,6
10	W	≤ 1,0
	V	0,30-0,70
	Nb	≤ 0,1
	Ti	≤ 0,1
	Zr	≤ 0,1
15	Co	≤ 2,0
	Ni	≤ 2,0
	opcionalmente	
	S	0,10-0,30
	adicionalmente,	si se añade S
20	Ca	5-75 ppm
	O	50-100 ppm

el resto de hierro e impurezas.

en donde el acero después del temple a una temperatura de austenización de 950 a 1025 °C y revenido a alta temperatura

25 de 500 a 570 °C tiene una dureza de 54 a 59 HRC.

2. Un acero según la reivindicación 1, **caracterizado porque** contiene 2,1-3,1 (Mo + W/2).

3. Un acero según cualquiera de las reivindicaciones 1-2, **caracterizado porque** contiene al menos 2,1 % de Mo.

30 4. Un acero según cualquiera de las reivindicaciones 1-3, **caracterizado porque** contiene como máximo el 0,55% de C.

5. Un acero según cualquiera de las reivindicaciones 1-4, **caracterizado porque** contiene al menos 0,40 % de V.

6. Un acero según la reivindicación 5, **caracterizado porque** contiene como máximo el 0,65, adecuadamente como máximo el 0,60% de V.

35 7. Un acero según cualquiera de las reivindicaciones 1-6, **caracterizado porque** contiene aproximadamente 0,49% de C y aproximadamente 0,52% de V.

8. Un acero según cualquiera de las reivindicaciones 1-6, **caracterizado porque** contiene al menos 0,05 % de Si.

9. Un acero según la reivindicación 8, **caracterizado porque** contiene nominalmente 0,2% de Si.

40 10. Un acero según cualquiera de las reivindicaciones 1-9, **caracterizado porque** contiene como máximo el 0,03% de Al.

11. Un acero según las reivindicaciones 1-10, **caracterizado porque** contiene al menos el 1,8% de Mo.
12. Un acero según cualquiera de las reivindicaciones 1-11, **caracterizado porque** contiene como máximo el 0,3% de W.
13. Un acero según la reivindicación 12, **caracterizado porque** no contiene tungsteno por encima del nivel de impurezas.
14. Un acero según cualquiera de las reivindicaciones 1-13, **caracterizado porque** contiene como máximo el 0,7% de Co.
15. Un acero según la reivindicación 14, **caracterizado porque** no contiene cobalto por encima del nivel de impurezas.
- 10 16. Un acero según cualquiera de las reivindicaciones 1-15, **caracterizado porque** contiene como máximo el 1,0% de Ni.
17. Un acero según la reivindicación 16, **caracterizado porque** contiene como máximo el 0,7% de Ni.
18. Un acero según la reivindicación 17, **caracterizado porque** contiene entre el 0,3 y el 0,7% de Ni.
19. Un acero según la reivindicación 18, **caracterizado porque** no contiene níquel por encima del nivel de impurezas.
- 15 20. Un acero según la reivindicación 1-19, **caracterizado porque** el contenido de cada uno de los elementos titanio, circonio y niobio no supera el 0,03%.
21. Un acero según la reivindicación 20, **caracterizado porque** el contenido de cada uno de los elementos titanio, circonio y niobio no supera el 0,01%.
- 20 22. Un acero según cualquiera de las reivindicaciones 1-21, **caracterizado porque** el acero no contiene más de como máximo el 0,035% de P.
23. Un acero según cualquiera de las reivindicaciones 1-22, **caracterizado porque** el acero contiene como máximo 20 ppm de O.
24. Un acero según cualquiera de las reivindicaciones 1-23, **caracterizado porque** el acero contiene como máximo 30 ppm de N.
- 25 25. Un acero según cualquiera de las reivindicaciones 1-24, **caracterizado porque** contiene como máximo el 0,03% de S.
26. Un acero según cualquiera de las reivindicaciones 1-25, **caracterizado porque** se somete a un refundido ESR.
- 30 27. Un acero según cualquiera de las reivindicaciones 1-26, **caracterizado porque** presenta una tenacidad de impacto de entre 195 y 336 J.
28. Una herramienta de moldeo para el moldeo de plástico, fabricada de un acero trabajado en caliente según cualquiera de las reivindicaciones 1-27.

Fig. 1

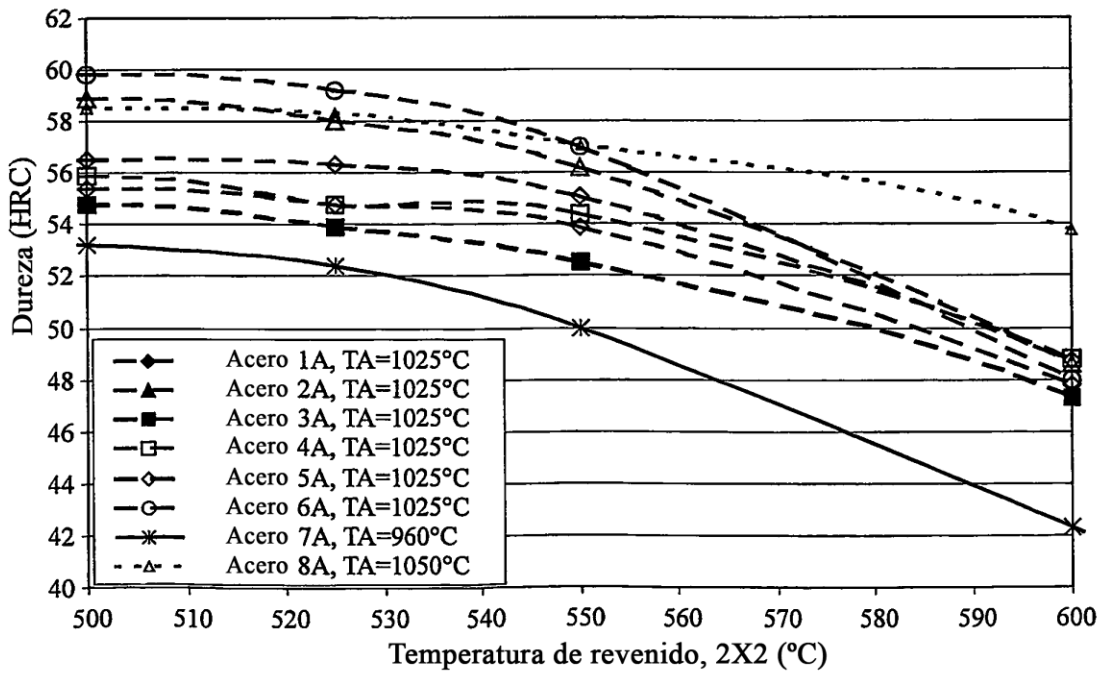
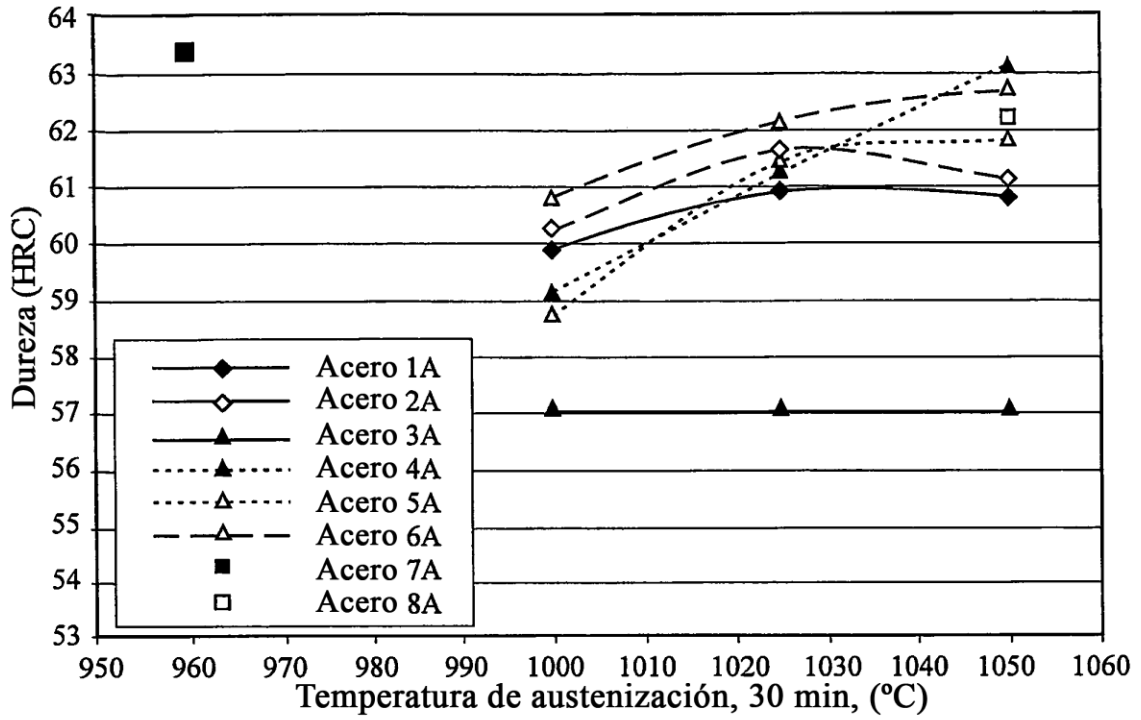
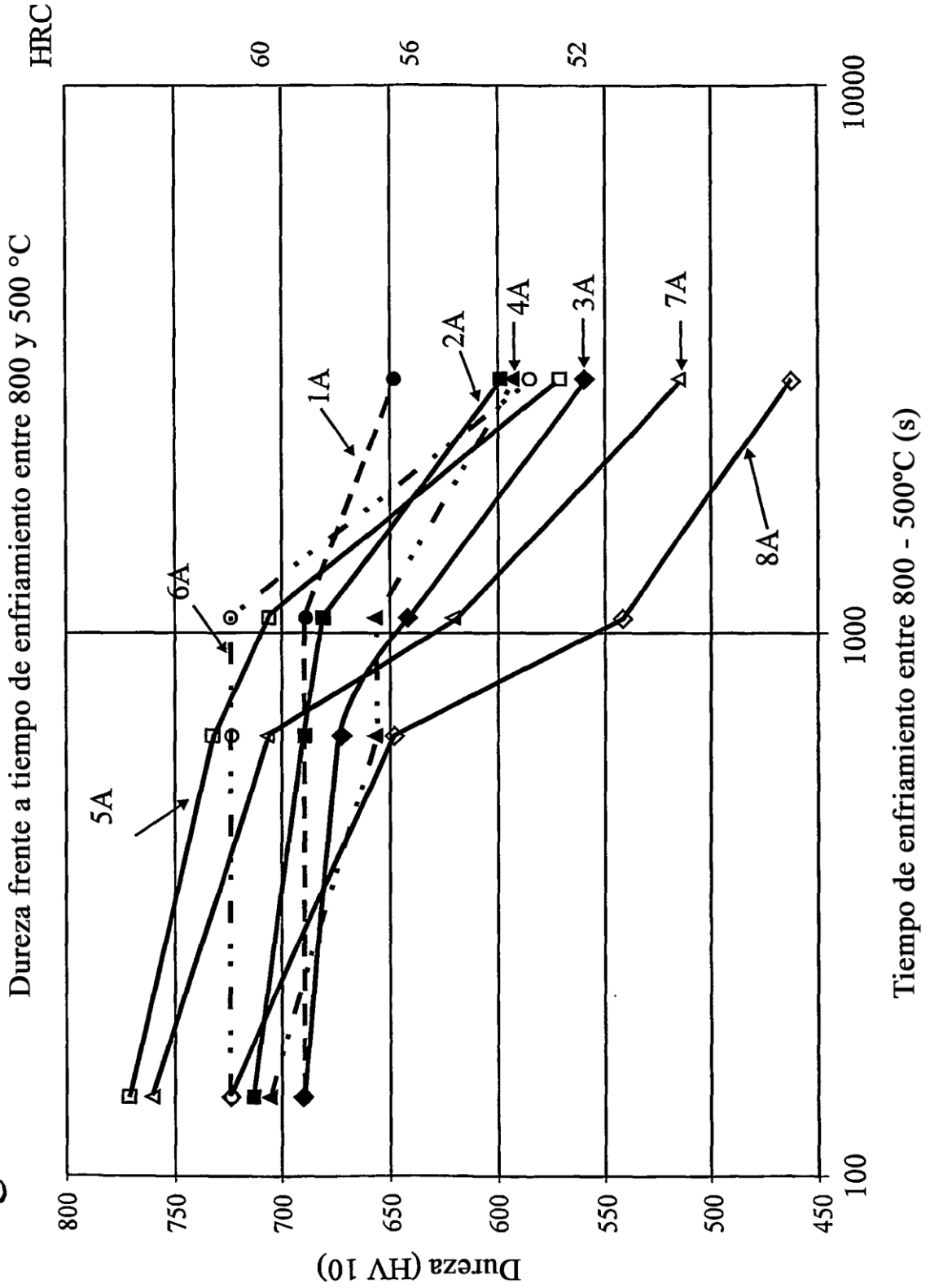


Fig. 2



Fig. 3



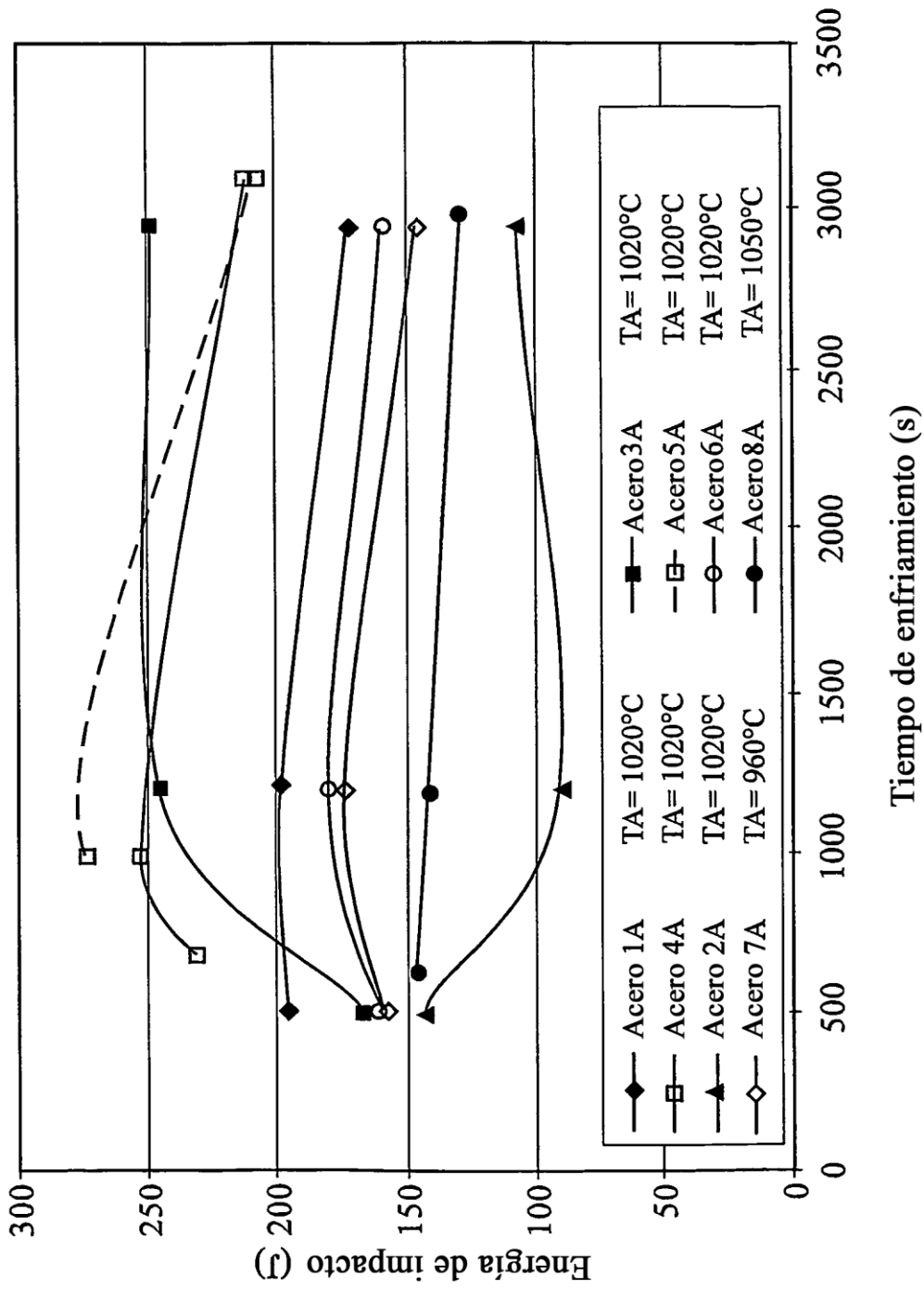


Fig. 4

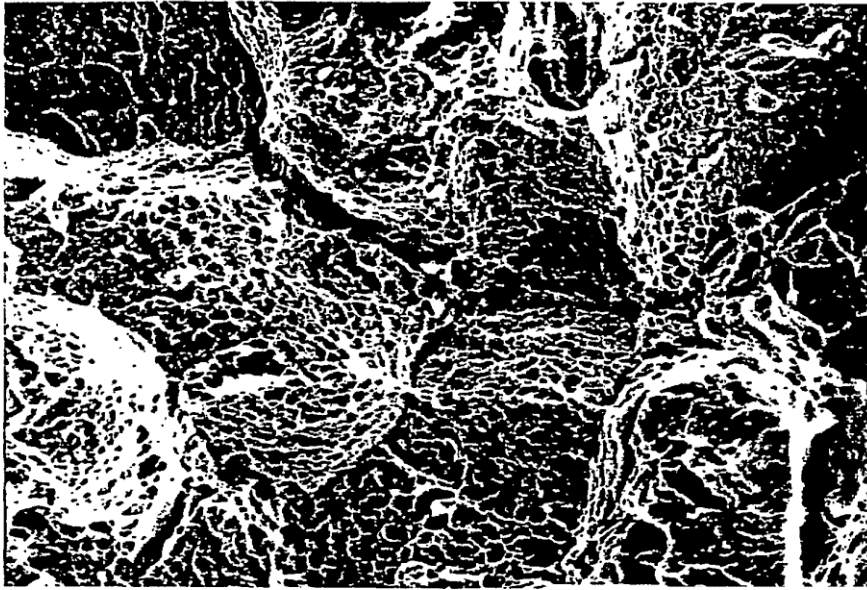
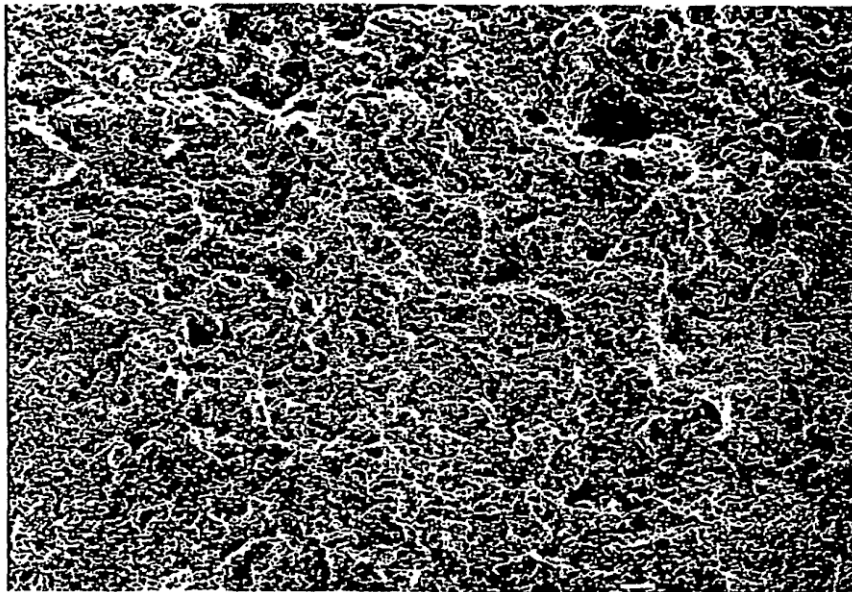


Fig. 5

→ 10 $\mu$ m ←



→ 10 $\mu$ m ←

Fig. 6