

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 370 486**

51 Int. Cl.:  
**C22C 38/24** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- 96 Número de solicitud europea: **03730978 .8**  
96 Fecha de presentación: **06.06.2003**  
97 Número de publicación de la solicitud: **1511873**  
97 Fecha de publicación de la solicitud: **09.03.2005**

54 Título: **ACERO PARA TRABAJO EN FRÍO Y HERRAMIENTA PARA TRABAJO EN FRÍO.**

30 Prioridad:  
**13.06.2002 SE 0201799**  
**29.01.2003 SE 0300200**

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:  
**16.12.2011**

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:  
**16.12.2011**

73 Titular/es:  
**UDDEHOLMS AB**  
**S-683 85 HAGFORS, SE**

72 Inventor/es:  
**SANDBERG, Odd y**  
**JOHANSSON, Börje**

74 Agente: **Polo Flores, Carlos**

**ES 2 370 486 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 para trabajo en frío y herramienta para trabajo en frío.

### 5 ÁMBITO DE LA INVENCION

La invención se refiere a un acero para trabajo en frío, es decir, un acero destinado a usarse para trabajar un material en el estado frío del material. Como ejemplos típicos del uso del acero se pueden citar punzones y cojinetes para forja en frío y otras herramientas de prensado en frío, herramientas extrusión en frío y cojinetes de roscar laminados, además de herramientas de corte, p. ej., cuchillas de cizallamiento para cortar planchas, cuchillas circulares y similares. La invención también se refiere al uso del acero para la fabricación de herramientas para trabajo en frío, así como a las herramientas hechas de acero.

### 15 ANTECEDENTES DE LA INVENCION

El propósito de la invención es dar a conocer un acero para trabajo en frío que se puede utilizar, entre otras cosas, para las aplicaciones mencionadas anteriormente y que, por consiguiente, debe presentar las siguientes características:

20 • 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 300 mm como mínimo,

25 • Dureza adecuada, como mínimo de 60 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,

30 • 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.

Otras características importantes del producto son:

35 • Buena estabilidad dimensional durante el tratamiento térmico,

• Larga vida a fatiga,

40 • Buena capacidad de amolado, mecanización, mecanización por descarga eléctrica y pulido.

Específicamente, la invención tiene como objetivo dar a conocer una matriz de acero que se pueda utilizar para las aplicaciones mencionadas anteriormente, es decir, un acero que esté esencialmente exento de carburos primarios y que, en condiciones de uso, presente una matriz constituida por martensita revenida.

### 45 Descripción de la invención

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.

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

El acero de la invención, según se mencionó anteriormente, no debe contener carburos primarios o solo un contenido sumamente bajo de carburos primarios, es decir, debe estar esencialmente exento de carburos primarios, pero, sin embargo, presenta resistencia al desgaste, lo cual resulta adecuado para la mayoría de las aplicaciones. Esto se puede lograr mediante una dureza adecuada dentro del intervalo comprendido entre 57 y 63 HRC, adecuadamente entre 60 y 62 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 contiene al menos el 0,60%, preferentemente al menos el 0,63% y adecuadamente al menos el 0,68% de C. Además el acero debe contener al menos el 0,30%, preferentemente al menos el 0,35% y adecuadamente al menos el 0,42% de V. Esto hace que sea posible que la matriz martensítica, 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 0,85%, preferentemente como máximo el 0,80% y adecuadamente como máximo el 0,78% de C, mientras que el contenido de vanadio puede ascender a un máximo del 0,85%, preferentemente como máximo el 0,60% y adecuadamente como máximo el 0,55%. Nominalmente, el acero contiene el 0,72% de C y el 0,50% 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 0,67%.

Hay silicio presente al menos en una cantidad cuantificable como elemento residual de la fabricación del acero y está presente en una cantidad que varía entre trazas y como máximo el 1,5%. El silicio, sin embargo, merma la tenacidad del acero y, por consiguiente, no debe estar presente en una cantidad superior al 1,0%, preferentemente como máximo el 0,5%. 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. Otro efecto positivo de silicio es que puede mejorar la capacidad de mecanización del acero. Por lo tanto, puede resultar ventajoso que el acero contenga silicio en una cantidad de al menos el 0,1%. 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 1,0%. 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. Por lo tanto, por lo general el acero no debe contener más de un máximo del 1,0%, preferentemente como máximo el 0,3%. 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 de al menos el 3,0%, preferentemente de al menos el 4% 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 M6C, 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 M6C no deseados a expensas de y/o además de la cantidad deseada de carburos MC. El molibdeno, en su parte principal, 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 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 inevitablemente en forma de impurezas procedentes de las materias primas utilizadas, es decir, menos del 0,30%.

Además, 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.

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 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%. 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% (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 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 5 y 50 ppm de Ca y entre 60 y 90 ppm de oxígeno.

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 300 o 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 refundición ESR. La fabricación mediante metalurgia de polvos o la conformación por pulverización son procesos innecesariamente costosos y no ofrece 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 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 200 y 230 HB, normalmente entre 210 y 220 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 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 1100 °C, adecuadamente entre 1020 °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 °C y 70 °C, y un revenido a alta temperatura entre 500 °C y 600 °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 estabilicen 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.

5 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.

#### BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

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

La figura 1 a la figura 5 muestran investigaciones de aceros fabricados a escala de laboratorio, en donde la figura 1 es un gráfico que ilustra la influencia de la temperatura de revenido sobre los aceros examinados,

15 La figura 2 es un gráfico que ilustra la dureza de los aceros examinados,

20 La figura 3 es un gráfico que ilustra la ductilidad en términos de la tenacidad de impacto de los materiales examinados en comparación con la dureza de las muestras templadas en un horno de vacío con diferentes tiempos de enfriamiento,

La figura 4 es un diagrama de barras que muestra la ductilidad y la dureza del acero examinado después de un tratamiento térmico específico, y

25 La figura 5 es un gráfico que ilustra la ductilidad en caliente de aceros examinados en el estado colado y forjado, respectivamente, del acero, y

30 La figura 6 y la figura 7 muestran exámenes de los aceros fabricados a escala de producción, en donde la figura 6 muestra la ductilidad de muestras de los aceros examinados, tomadas en algunas posiciones diferentes de las barras fabricadas, y

La figura 7 muestra la microestructura de un acero según la invención después del tratamiento térmico.

#### DESCRIPCIÓN DE LOS EXPERIMENTOS REALIZADOS

35 Experimentos a escala de laboratorio

##### **Materiales**

40 Se fabricaron cuatro aleaciones de acero en forma de lingotes de laboratorio con una masa de 50 kg. En la tabla 1 se presentan las composiciones químicas. El contenido de azufre no se pudo mantener en un nivel deseablemente bajo debido a las limitaciones de la técnica de fabricación. No se ha analizado el contenido de oxígeno y de otras impurezas distintas de las que se muestran en la tabla. Se aplicó la siguiente secuencia de proceso: tratamiento de homogeneización durante 10 horas a 1270 °C/aire, forja a 60x60 mm, tratamiento de regeneración a 1050 °C/2 h/aire y recocado blando a 850 °C/2 h, refrigeración a 10 °C/h hasta 600 °C y, a continuación, al aire.

45

Tabla 1 Composición química en % en peso de los materiales fabricados a escala de laboratorio

Acero	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	Ti ppm	Nb ppm	O	N ppm	Resto
1	0,68	0,87	0,65	0,005	0,006	2,82	2,34	0,52	33	<10	n.a.	14	Fe + otras impurezas
2	0,68	0,19	0,39	0,004	0,006	4,93	2,37	0,37	29	<10	n.a.	28	"-
3	0,71	0,90	0,49	0,004	0,006	5,09	2,36	0,56	39	<10	n.a.	19	"-
4	0,63	1,38	0,35	0,007	0,006	4,25	2,87	1,81	42	<10	n.a.	18	"-

n.a. = no analizado

Tabla 8 Composición química en % en peso (S, B y O en ppm), resto de Fe e impurezas, de los materiales fabricados a escala de producción

Acero	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	W	Co	V	Ti	Nb	Cu	Al	N	B	O
10	0,71	0,19	0,49	0,009	6	4,96	0,07	2,28	0,003	0,010	0,50	0,0016	0,001	0,062	0,017	0,011	10	7
11	0,71	0,19	0,49	0,009	8	4,98	0,07	2,30	0,003	0,011	0,50	0,0015	0,001	0,062	0,15	0,011	10	5
12	0,74	0,99	0,76	0,007	10	2,55	0,06	2,09	0,01	0,01	0,50	0,003	0,01	0,07	0,037	0,007	30	8

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 y del revenido, la templabilidad, la tenacidad de impacto, la resistencia al desgaste y la ductilidad en caliente. 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 que se reflejan en la tabla 2.

**Tabla 2**

Composición química, en % en peso, de las aleaciones estudiadas mediante Thermo-Calc								
Acero	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V
5	0,72	1,00	0,75	0,02	0,005	2,60	2,25	0,50
6	0,71	0,20	0,50	0,02	0,005	5,00	2,30	0,55
7	0,74	1,00	0,50	0,02	0,005	5,00	2,30	0,55
8	0,65	1,50	0,40	0,02	0,005	4,20	2,80	1,80

En la tabla 3 se indica el contenido de carbono disuelto a la temperatura de austenización,  $T_A$ , y el % en volumen de MC a la  $T_A$ .

Los ejemplos 1-5, 7 y 8 no forman parte de la invención y se incluyen meramente a modo de ejemplos de referencia.

**Tabla 3**

	$T_A$ (°C)	%C a la $T_A$	% vol. de MC a la $T_A$
5	1050/30 min	0,63	1,01
6	1050/30 min	0,65	0,72
7	1050/30 min	0,64	1,04
8	1150/10 min	0,38	2,87

### Dureza de recocido

En la tabla 4 se indican la dureza de recocido blando y la dureza Brinell (HB) de las aleaciones 1-4 examinadas.

**Tabla 4**

Dureza de recocido	
Acero	Dureza (HB)
1	218
2	208
3	217
4	222

### Microestructura

Se examinó la microestructura en el estado recocido blando después del tratamiento térmico entre 60 y 61 HRC. Estos estudios demostraron que la microestructura en el estado templado y revenido consistió en martensita revenida. Solamente se observaron carburos primarios en el acero 4. Estos carburos fueron de tipo MC. No se detectaron carburos, nitruros y/o carbonitruros de titanio en ninguna aleación.

### Temple y revenido

Los aceros 1-3 fueron austenizados a 1050 °C/30 min, mientras que el acero 4 fue revenido a 1150 °C/10 min, refrigerado al aire hasta temperatura ambiente y recocido dos veces a diferentes temperaturas de revenido, cada vez durante 2 horas. La influencia de la temperatura de revenido sobre la dureza se muestra en la figura 1. Esta figura indica que los aceros 2 y 3 tienen el potencial de alcanzar una dureza deseada después del revenido a alta temperatura entre 500 °C y 600 °C, preferentemente entre 520 °C y 560 °C, adecuadamente entre 520 °C y 540 °C. Se alcanza un grado óptimo de dureza máxima tras un revenido a una temperatura de aproximadamente 525 °C, por cuanto a los aceros 2 y 3 se refiere. Esto resulta particularmente importante en el caso de los aceros de matriz, que requieren nitruración o recubrimiento superficial a una temperatura del orden de 500 °C o superior para lograr la resistencia al desgaste que resulta necesaria para ciertas aplicaciones de herramientas. Por consiguiente, a estas temperaturas se consigue un temple secundario pronunciado debido a la precipitación de los carburos MC. Como se desprende de la tabla de la figura 1, el temple, incluso a una temperatura de hasta aproximadamente 580 °C, garantiza una dureza superior a 60 HRC, lo cual resulta ventajoso ya que hace posible llevar a cabo el recubrimiento superficial dentro de un intervalo de temperaturas bastante amplio sin que la dureza de la herramienta sea



demasiado baja. Si se busca una mayor dureza, se ha de añadir a la aleación más carbono y más elementos formadores de carburos. Sin embargo, esto podría entrañar un riesgo de formación de carburos primarios, que no se pueden disolver mediante el recocido. Esto se ejemplifica en el acero 4, que requiere una temperatura de austenización muy alta, lo que provoca una serie de inconvenientes: la necesidad de que el fabricante de herramientas aplique una técnica de temple poco convencional, las tensiones de temple, los cambios dimensionales y el riesgo de fisuras.

### Templabilidad

En la figura 2 se muestra una comparación de la templabilidad de las aleaciones 1-4 examinadas, en la que se utiliza una representación de los datos procedentes de diagramas de transformación en condiciones de enfriamiento continuo (CCT). Como se muestra en el diagrama, el acero nº 2 tiene la mejor templabilidad, pero también el acero nº 3 presenta mejores condiciones para la formación de martensita cuando el acero se enfría lentamente desde la temperatura de austenización en comparación con el acero nº 1 y, definitivamente, en comparación con el acero nº 4.

### Ductilidad

En la figura 3 se 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 con diferentes tiempos de enfriamiento, y revenidas a diferentes durezas. La mejor tenacidad, cuando la dureza superó los 60 HRC, se logró para el acero nº 2, y este efecto fue aún más pronunciado cuando la dureza superó los 61 HRC. Con el fin de analizar con mayor profundidad las condiciones de tenacidad a las citadas durezas, los aceros 1-4 también se compararon en un gráfico de barras, en la figura 4. En este caso, los aceros 1-4 se enfriaron desde la temperatura de austenización mencionada durante 706 segundos desde 800 °C hasta 500 °C, y después de un enfriamiento continuo hasta temperatura ambiente, los aceros fueron objeto de revenido a 525-540 °C/2x2 h. La figura 4 muestra que la mejor tenacidad, cuando las durezas fueron comparables, se logró con el acero 2.

### Ductilidad en caliente

La ductilidad en caliente es un parámetro importante para, entre otras cosas, la eficiencia económica de la producción de un acero. Se llevaron a cabo ensayos de ductilidad en caliente después de un tratamiento de homogeneización durante 10 horas a 1270 °C/aire de los aceros en el estado colado y forjado, respectivamente. En el estado forjado, también se aplicó un tratamiento de regeneración a 1050 °C/2 h y un recocido blando. El tiempo de mantenimiento a la temperatura del ensayo fue de 4 minutos, a excepción de los aceros 1 y 3 en sus estados colados, y para temperaturas iguales o superiores a 1200 °C en el caso de los materiales forjados. La razón de esto es que estos dos aceros sufrieron una gran oxidación, lo que imposibilitó la realización de una medición correcta de la contracción superficial. Por otra parte, el acero 2, que tenía un contenido bajo de silicio, no dio lugar a una oxidación notable. Este acero también presentó una mejor ductilidad en caliente que los aceros nº 1 y 3, tanto en el estado colado como en el estado forjado. En el caso del acero 2 se pudo aplicar una temperatura de ensayo unos 50 °C más alta. Los resultados se ilustran en la figura 5.

### Desgaste por abrasión

La resistencia al desgaste se examinó por medio de un ensayo de perno contra disco con SiO<sub>2</sub> como agente de desgaste por abrasión. El acero 4 mostró la mejor resistencia al desgaste. Las restantes aleaciones de acero fueron igualmente buenas.

### DISCUSIÓN

Se llevaron a cabo estudios comparativos de los aceros examinados para la evaluación de los resultados documentados anteriormente. La tabla 5 muestra el contenido de carbono disuelto, en % en peso, y el contenido de carburos MC, en % en vol, a 1050 °C, cuando se supone que se aplica el equilibrio para los aceros 1-3 y 5-7, y a 1150 °C para los aceros 4 y 8. En la tabla se incluyen a modo de referencia los valores de las composiciones objetivo de los aceros 5-8. Cabe destacar que el acero 2 presenta un contenido de MC sustancialmente menor que el contenido objetivo debido a que el contenido de vanadio es menor que el correspondiente a la composición nominal de ese acero, representada por el acero 6, que contenía el 0,65% en volumen de MC a la T<sub>A</sub>.

Tabla 5

Contenido de carbono disuelto, en % de peso, y fracción de carbono, en % en volumen, a la temperatura de austenización indicada para las aleaciones 1-4 examinadas en comparación con las composiciones objetivo 5-8 de estas aleaciones.			
Acero	T <sub>A</sub> óptima (°C)	% C a la T <sub>A</sub>	% MC a la T <sub>A</sub>
5	1050/30 min	0,64	0,89
1	1050/30 min	0,60	0,87
6	1050/30 min	0,65	0,65
2	1050/30 min	0,66	0,32
7	1050/30 min	0,65	0,97
3	1050/30 min	0,63	0,95
8	1150/30 min	0,37	2,83
4	1150/30 min	0,30	2,71

5 En la tabla 6 se incluye una comparación de las características de las aleaciones 1-4 examinadas. En esta tabla, se han otorgado calificaciones a las aleaciones que varían entre 1 y 4, donde 1 = valor más bajo y 4 = el mejor valor.

Tabla 6

Comparación de las características de los examinados de acero				
N.º de acero:	1	2	3	4
Templabilidad	2	4	3	1
Estabilidad dimensional durante el tratamiento térmico	2	4	3	1
Dureza después del temple a alta temperatura	4	4	4	4 (sin embargo, solo después del temple a alta temperatura)
Ductilidad / tenacidad	2	4	3	1
Resistencia al desgaste	2	2	2	4
Vida a fatiga	4	4	4	2
Resistencia a la presión	4	4	4	4
Capacidad de amolado	4	4	4	2
Capacidad de mecanización	4	3	4	2
Capacidad de mecanización por descarga eléctrica	4	4	4	4
Capacidad de pulido	4	4	4	3
Eficiencia económica de la producción	3	4	4	2

10 Como se desprende de la tabla 6, el acero nº 2 presenta una mejor combinación de características que los demás materiales examinados y evaluados. En particular, es mejor en términos de las características más importantes del producto. Posiblemente, el menor contenido de carburos MC es un aspecto desfavorable del acero 2, ya que este hecho podría reducir la resistencia contra el crecimiento del grano. Por lo tanto, se puede concluir a partir de los  
 15 experimentos que el contenido de vanadio debería aumentarse del 0,40% nominal al 0,50% con el fin de brindar un margen más amplio contra el crecimiento del grano durante el tratamiento térmico. Los experimentos también indican que existe un estrecho margen para el contenido de vanadio de cara a lograr una resistencia deseada contra el crecimiento del grano sin que el contenido de carburo sea demasiado alto en relación con la tenacidad del acero, y también que el contenido de carbono se debe aumentar hasta el 0,72% nominal y permanecer dentro de un intervalo bastante estrecho alrededor de ese contenido con el fin de lograr una dureza entre 60 y 62 HRC después  
 20 del tratamiento térmico. El contenido de P, S, N, y O se debe mantener en un nivel muy bajo con el fin de maximizar la ductilidad y la tenacidad. De manera más conveniente, se debe limitar el contenido de otros formadores de carburos y nitruros, como Ti, Zr y Nb, a un máximo del 0,005%. En este contexto, un acero para trabajo en frío según la invención debe tener la composición nominal que figura en la tabla 7.

25

Tabla 7

Composición nominal, % en peso, de un acero de acuerdo con la invención, acero n.º 9, y cantidad de C disuelto y cantidad de carburos, % en volumen, a 1050 °C											
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	N	O	C*	MC* % en vol.
0,72	0,20	0,50	≤ 0,010	0,0010	5,0	2,30	0,50	≤ 0,010	≤ 0,0010	0,67	0,6
El resto está formado por hierro e impurezas inevitables											
* Calculado teóricamente en el equilibrio de acuerdo con el método Thermo-Calc.											

Experimentos a escala de producción

5 Se fabricó una colada de producción de 65 toneladas en un horno de arco eléctrico, correspondiendo la composición objetivo del colada a la del acero nº 9 de la tabla 7. Se fabricó una serie de lingotes a partir del metal fundido, y los lingotes se forjaron en forma de barras de diferentes dimensiones, incluidas las barras con dimensiones de 330 mm y 254 mm de diámetro, fabricadas respectivamente con el acero n.º 10 y n.º 11, que se recogen en la tabla 8. En la misma tabla, también se ofrece la composición química de un material de referencia, el acero nº 12. El material tenía la forma de una barra de forja con dimensiones 330 mm de diámetro. En la tabla 8, no solo el fósforo y el azufre son las impurezas. Además de ellos, las impurezas contienen tungsteno, cobalto, titanio, niobio, cobre, aluminio, nitrógeno y oxígeno en las cantidades indicadas. Hay otras impurezas que no están indicados, si bien se encuentran por debajo de los niveles permitidos. El resto está formado por hierro.

15 Se extrajeron barras de ensayo de las barras fabricadas. En la figura 7 se ilustra la microestructura del acero en una muestra tomada en el centro de la barra del acero nº 11. La muestra se templó mediante austenización a 1025 °C/30 min, se refrigeró al aire y posteriormente fue objeto de recocido a 525 °C/2x2 h. Como se desprende de la figura, el acero presentó una microestructura uniforme constituida por martensita revenida sin ningún tipo de carburos primarios.

20 Se evaluó la ductilidad mediante ensayos de impacto realizados sobre las barras de ensayo sin muescas extraídas de las barras en las posiciones más críticas y la dirección más crítica, respectivamente. Las barras de ensayo de los aceros nº 10 y nº 11 se templaron hasta 61,0 HRC (dureza Rockwell) y 60,5 HRC, respectivamente, por austenización a 1025 °C/30 min, refrigeración al aire y revenido a 525 °C/2x2 h. Las muestras del acero nº 12 se templaron hasta 60,2 HRC por austenización a 1050 °C/30 min, refrigeración al aire y revenido a 550 °C/2x2 h. Las energías de impacto absorbidas se muestran en el gráfico de barras de la figura 6. En el gráfico, se emplean las denominaciones CR1 y CR2, en donde CR1 se refiere a una barra de ensayo procedente de una barra redonda, tomada en la superficie de la barra en la dirección longitudinal de la barra y con la dirección de impacto en la dirección transversal de la barra (próximo a las condiciones más desfavorables), y CR2 se refiere a una barra de ensayo procedente de una barra redonda, tomada del centro de la barra y por lo demás según CR1 (condiciones más desfavorables).

30 Como se desprende del diagrama de la figura 6, los aceros según la invención presentaron una ductilidad mucho mejor en comparación con el material de referencia cuando la dureza de los aceros de la invención fue igual o incluso ligeramente superior a la dureza del material de referencia, como resultado de un ensayo de impacto comparable con las muestras templadas y revenidas, sin muescas, de los aceros fabricados a escala de producción.

35

**REIVINDICACIONES**

1. Un acero para trabajo en frío trabajado en caliente, caracterizado porque tiene la siguiente composición en % en peso o en ppm si así se especifica:
- 5 0,60 a 0,80 de C  
de trazas a 0,5 (Si + Al)  
0,1 a 2,0 de Mn  
4,5 a 5,5 de Cr
- 10 1,5 a 2,6 de (Mo + W/2); al menos 1,5 de Mo, como máximo 1,0 de W  
0,42 a 0,65 de V  
como máximo 0,1 de cada uno de Nb, Ti y Zr  
como máximo 2,0 de Co  
como máximo 2,0 de Ni
- 15 opcionalmente
- hasta 30 ppm de B  
0,10 a 0,30 de S
- 20 y además opcionalmente
- de 5 a 75 ppm de Ca y de 50 a 100 ppm de O si el acero contiene de 0,10 a 0,30 S siendo el resto hierro e impurezas inevitables.
- 25 2. Acero para trabajo en frío según la reivindicación 1, **caracterizado porque** contiene al menos 0,63, adecuadamente al menos de 0,68 de C.
- 30 3. Acero para trabajo en frío según la reivindicación 2, **caracterizado porque** contiene como máximo 0,78 de C.
4. Acero para trabajo en frío según cualquiera de las reivindicaciones 1-3, **caracterizado porque** contiene como máximo 0,60, adecuadamente como máximo 0,55 de V.
- 35 5. Acero para trabajo en frío según cualquiera de las reivindicaciones 1-4, **caracterizado porque** contiene como máximo 0,72 de C y 0,50 de V.
6. Acero para trabajo en frío según cualquiera de las reivindicaciones 1-5, caracterizado porque contiene al menos 0,05 de Si.
- 40 7. Acero para trabajo en frío según la reivindicación 6, **caracterizado porque** contiene al menos 0,1, preferentemente al menos 0,2 y como máximo 0,5 de Si.
8. Acero para trabajo en frío según cualquiera de las reivindicaciones 1-7, **caracterizado porque** contiene como máximo 0,3, adecuadamente como máximo 0,1 y de manera más conveniente como máximo 0,03 de Al.
- 45 9. Acero para trabajo en frío según cualquiera de las reivindicaciones 1-8, **caracterizado porque** contiene al menos 1,8 de Mo.
- 50 10. Acero para trabajo en frío según la reivindicación 9, **caracterizado porque** contiene al menos 2,1 de Mo.
11. Acero para trabajo en frío según la reivindicación 9 o 10, **caracterizado porque** contiene como máximo 0,3, adecuadamente como máximo 0,1 de W.
- 55 12. Acero para trabajo en frío según la reivindicación 11, **caracterizado porque** no contiene tungsteno por encima del nivel de impurezas.
13. Acero para trabajo en frío según cualquiera de las reivindicaciones 1-12, **caracterizado porque** contiene como máximo 0,7 de Co.
- 60 14. Acero para trabajo en frío según la reivindicación 13, **caracterizado porque** no contiene cobalto por encima del nivel de impurezas.
15. Acero para trabajo en frío según cualquiera de las reivindicaciones 1-13, **caracterizado porque** el contenido de cada uno de los elementos titanio, circonio y niobio no supera el 0,1%.
- 65 16. Acero para trabajo en frío según cualquiera de las reivindicaciones 1-15, **caracterizado porque** contiene como

## ES 2 370 486 T3

máximo 1,0 de Ni.

17. Acero para trabajo en frío según la reivindicación 16, **caracterizado porque** contiene como máximo 0,7 de Ni.

5 18. Acero para trabajo en frío según la reivindicación 17, **caracterizado porque** no contiene níquel por encima del nivel de impurezas.

19. Acero para trabajo en frío según la reivindicación 15, **caracterizado porque** el contenido de cada uno de los elementos titanio, circonio y niobio no supera el 0,03%.

10 20. Acero para trabajo en frío según la reivindicación 19, **caracterizado porque** el contenido de cada uno de los elementos titanio, circonio y niobio no supera 0,01, preferentemente no supera el 0,005%.

15 21. Acero para trabajo en frío según cualquiera de las reivindicaciones 1-20, **caracterizado porque** el acero no contiene más de como máximo 0,035, preferentemente como máximo 0,015 y adecuadamente como máximo 0,010 de P.

20 22. Acero para trabajo en frío según cualquiera de las reivindicaciones 1-21, **caracterizado porque** el acero contiene como máximo 300, preferentemente como máximo 150 y adecuadamente como máximo 100 ppm de N.

23. Acero para trabajo en frío según la reivindicación 1-22, **caracterizado porque** contiene de 5 a 50 ppm de Ca y de 60 a 90 ppm de O si el acero contiene de 0,10 a 0,30 de S.

25 24. Acero para trabajo en frío según cualquiera de las reivindicaciones 1-23, **caracterizado porque** después del temple y revenido a alta temperatura de 500 a 600 °C, preferentemente de 520 a 560 °C, tiene una dureza de 57 a 63, preferentemente de 60 a 62 HRC.

30 25. Herramienta para trabajo en frío fabricada de un acero para trabajo en frío según cualquiera de las reivindicaciones 1-24.

26. Herramienta para trabajo en frío según la reivindicación 25, **caracterizada porque** después del temple y revenido a alta temperatura de 500 a 600 °C, preferentemente de 520 a 560 °C, tiene una dureza de 57 a 63, preferentemente de 60 a 62 HRC.

Fig. 1

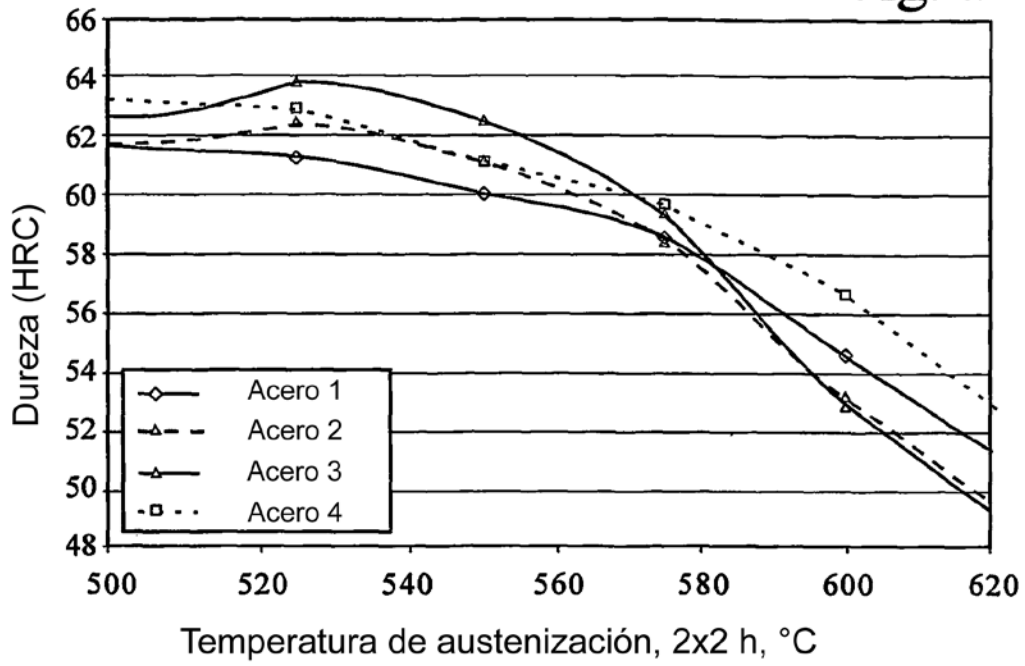


Fig. 2

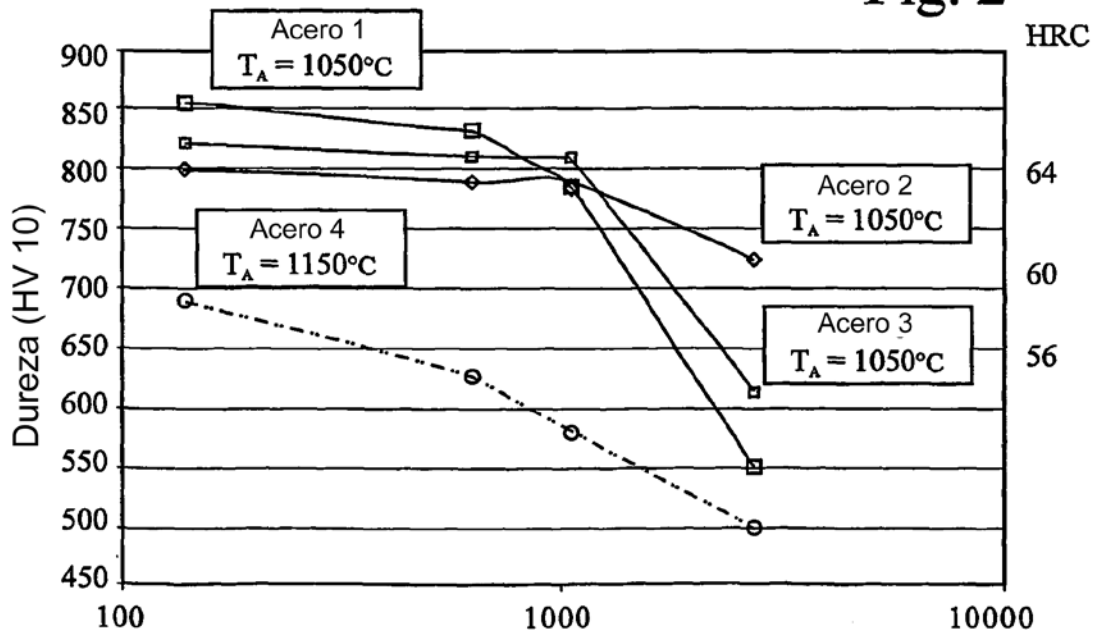


Fig. 3

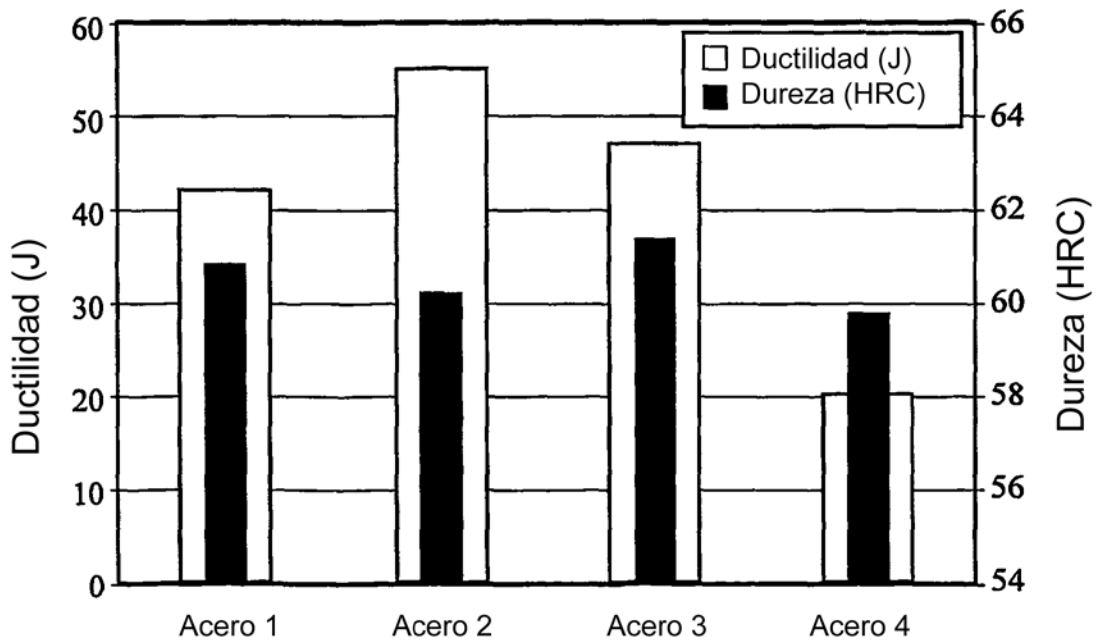
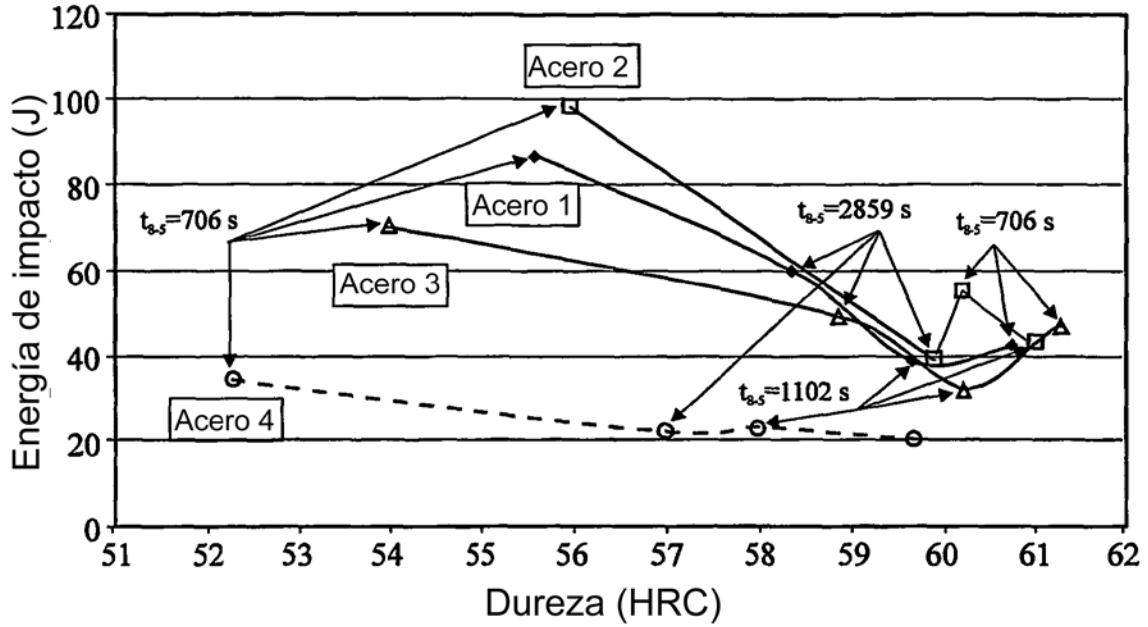


Fig. 4

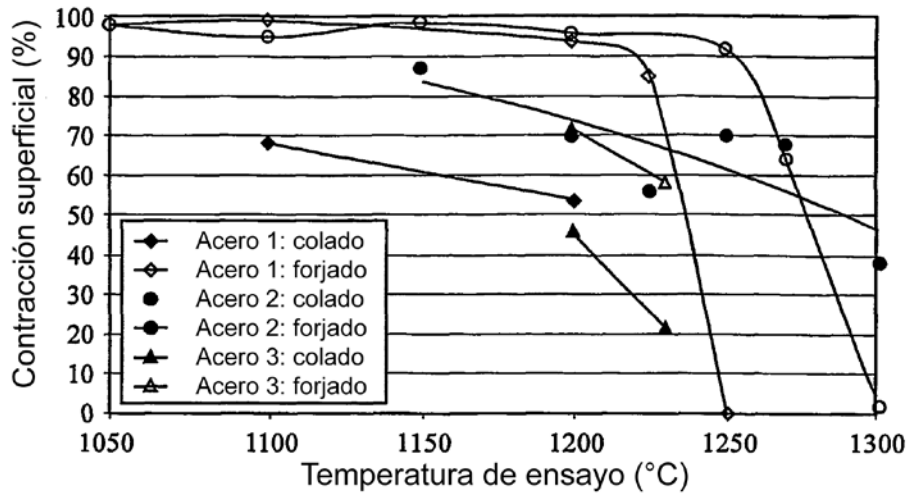


Fig. 5

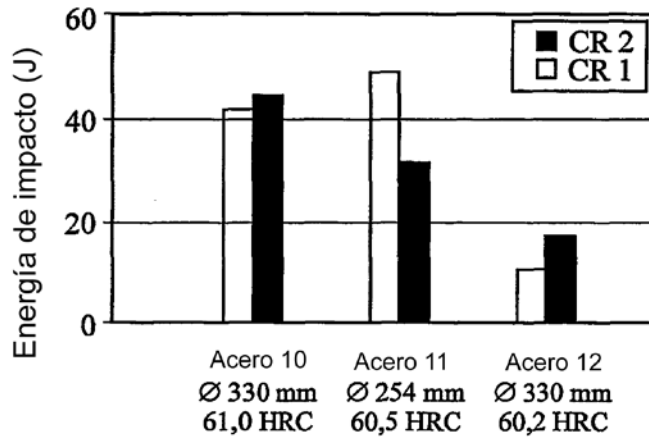


Fig. 6

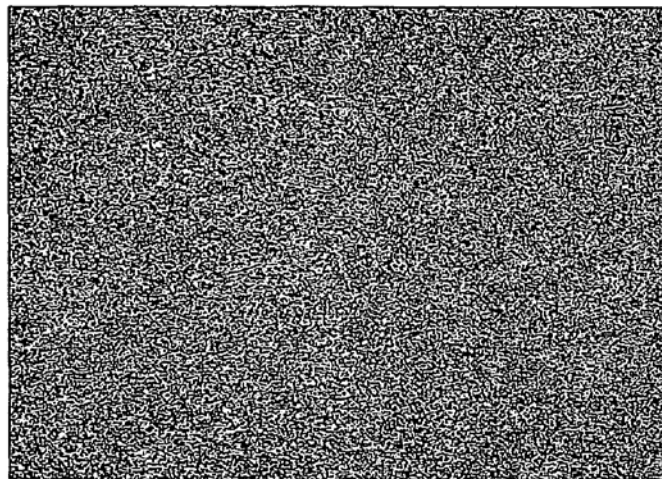


Fig. 7

0 0,15 0,30 mm