



19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

11 Número de publicación: **2 364 034**

51 Int. Cl.:
H02G 9/06 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Número de solicitud europea: **01953156 .5**

96 Fecha de presentación : **21.05.2001**

97 Número de publicación de la solicitud: **1287598**

97 Fecha de publicación de la solicitud: **05.03.2003**

54 Título: **Procedimiento de apantallamiento del campo magnético generado por una línea de transmisión de energía eléctrica y línea de transmisión de energía eléctrica.**

30 Prioridad: **31.05.2000 EP 00111645**
06.06.2000 US 209483 P

73 Titular/es: **PRYSMIAN S.p.A.**
Viale Sarca 222
20126 Milano, IT

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:
23.08.2011

72 Inventor/es: **Donazzi, Fabrizio y**
Maioli, Paolo

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:
23.08.2011

74 Agente: **Carpintero López, Mario**

ES 2 364 034 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín europeo de patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Procedimiento de apantallamiento del campo magnético generado por una línea de transmisión de energía eléctrica y línea de transmisión de energía eléctrica.

5 La presente invención versa acerca de un procedimiento para apantallar el campo magnético generado por una línea de transmisión de energía eléctrica. La presente invención también versa acerca de una línea magnéticamente apantalla de transmisión de energía eléctrica.

10 Generalmente, una línea de transmisión de energía eléctrica de gran potencia está diseñada para soportar tensiones del orden de cientos de kV (típicamente de 400 kV) y corrientes del orden de miles de amperios (típicamente 500-2000 A). La energía eléctrica transportada en estas líneas puede alcanzar valores del orden de miles de MVA, típicamente 1000 MVA. Normalmente, la corriente transportada es una corriente alterna de baja frecuencia, en otras palabras, generalmente por debajo de 400 Hz, y típicamente de 50-60 Hz. En general, estas líneas se usan para transferir energía de una central de energía eléctrica a una ciudad a distancias del orden de decenas de kilómetros (normalmente, 10-100 km).

15 En una configuración típica, una línea trifásica comprende tres cables enterrados en una zanja con una profundidad de 1-1,5 m. En el espacio que rodea inmediatamente los cables, el campo magnético H puede alcanzar valores del orden de 10^3 A/m. A nivel del suelo, la inducción magnética medible puede alcanzar valores del orden de 20-60 μ T, dependiendo de la disposición mutua de los cables.

20 Aunque no se ha demostrado aún ningún efecto biológico debido a la exposición a campos magnéticos de esta intensidad generados por fuentes de baja frecuencia (50 Hz), hay actualmente un debate en la comunidad científica sobre un posible "umbral de seguridad", que ha de ser adoptado por ley, por debajo del cual puede reducirse a un mínimo, si no eliminarse, la probabilidad de daño biológico. Un umbral de inducción magnética en el que la comunidad científica parece haber alcanzado un acuerdo, y sobre el que tienden a armonizarse algunas legislaciones nacionales, es 0,2 μ T. Así, el valor en cuestión es aproximadamente 100 veces menor que el formulado previamente. Ciertamente, ha de considerarse preferible la reducción de los niveles de la inducción magnética a menos de 0,2 μ T.

El solicitante ha abordado el problema de apantallar el campo magnético generado por una línea de transmisión de energía eléctrica de gran potencia que comprende cables enterrados en una zanja con el objetivo de lograr valores de inducción magnética a nivel del suelo de aproximadamente 0,2 μ T o menos.

30 El artículo de P. Argaut, J. Y. Daurelle, F. Protat, K. Savina y C. A. Wallaert, "Shielding technique to reduce magnetic fields from buried cables", A 10.5, JICABLE 1999, describe algunas soluciones para el apantallamiento de campos magnéticos generados por tres cables enterrados. En particular, formula los resultados de algunas simulaciones llevadas a cabo con blindajes de sección abierta (por ejemplo, una lámina de material ferromagnético colocada encima de los cables) y blindajes de sección cerrada (por ejemplo, un conducto de sección rectangular fabricado de material ferromagnético colocado alrededor de tres cables). Se analiza la dependencia de la eficiencia del apantallamiento con respecto a diversos factores, como la permeabilidad magnética relativa del material de apantallamiento, el grosor del material que va a usarse y las posiciones relativas de los cables y el blindaje magnético. Según los autores, la material óptimo debería tener una permeabilidad magnética relativa en el intervalo de 700 a 1000 y un espesor en el intervalo de 3 a 5 mm; en el caso de un blindaje de sección cerrada, la posición relativa óptima es aquella en la que los cables están a aproximadamente a 1/3 del camino hacia abajo desde la parte superior del blindaje. También según los autores, pueden obtenerse factores de atenuación de aproximadamente 5 - 7 con blindajes de sección abierta, puede obtenerse factores de aproximadamente 15 - 20 con blindajes de sección cerrada, pueden obtenerse factores de aproximadamente 30 - 50 cuando el blindaje de sección cerrada está formado muy cerca de los cables (por ejemplo, a partir de una lámina de material ferromagnético enrollada directamente alrededor de tres cables).

45 La solicitud de patente (Kokai) JP 10-117083, en nombre de Nippon Steel Co., proporciona una solución para el apantallamiento del campo magnético generado por un cable de transmisión de energía eléctrica, que consiste en un tubo de material ferromagnético, fabricado enrollando una tira de material magnético en espiral, preferentemente sobre un soporte tubular, por ejemplo un tubo metálico o de resina. En el ejemplo descrito, la tira está fabricada de acero de granos orientados y tiene una permeabilidad magnética que es mayor en una dirección paralela a la dirección del enrollamiento que en la dirección perpendicular al mismo.

La patente EP 606884, también a nombre de Nippon Steel, describe un procedimiento para producir acero al silicio con granos orientados, en el que el acero es sometido a complejos procesos de laminado y de etapas subsiguientes de recocido, con tiempos y temperaturas predeterminados, en presencia de inhibidores de recristalización.

55 El solicitante ha observado que las soluciones descritas en el artículo de Argaut et al. citado más arriba no permiten el logro de factores de apantallamiento muy elevados, como los necesarios para apantallar el campo magnético generado por una línea de transmisión eléctrica.

El solicitante también ha observado que la solución descrita en la solicitud de patente JP 10-117083, citada más arriba, contempla el uso de un acero con granos orientados. En este tipo de acero, los granos tienen una dirección de orientación paralela a la dirección del bobinado: esto hace posible obtener una densidad muy elevada de flujo magnético. Se produce mediante complejos procedimientos de producción, que hacen posible orientar los granos únicamente en láminas delgadas, que tienen espesores del orden de una décima de milímetro (véase, por ejemplo, la patente EP 606884 citada más arriba). Puesto que el espesor es tan pequeño, el tubo de apantallamiento puede ser producido solamente enrollando una tira de acero en espiral alrededor de un soporte, tal como se describe en la solicitud de patente JP 10-117083, para garantizar una resistencia mecánica a la compresión suficiente. Todo esto hace que el procedimiento de producción de un tubo de apantallamiento resulte sumamente complicado.

Por otra parte, el solicitante ha descubierto que es posible apantallar, con un factor de atenuación del orden de 100 o mayor, el campo magnético generado por una línea de transmisión de energía eléctrica insertando los cables en un conducto que comprende al menos una capa de material ferromagnético de granos no orientados que tiene una elevada permeabilidad magnética relativa en el intervalo de valores del campo magnético por debajo de 1000 A/m. El conducto de apantallamiento puede ser producido ventajosamente mediante procedimientos de extrusión o laminado normales, sin hacer uso de procedimientos complejos de producción para orientar los granos, ni bobinado como en la solicitud de patente JP 10-117083, mencionada anteriormente.

Aquí y en el resto de la descripción, la expresión "material de granos no orientados" denota un material en el que, esencialmente, los dominios cristalinos (granos) no tienen ninguna dirección de alineamiento preferente. El grado de alineamiento puede evaluarse mediante procedimientos conocidos, por ejemplo por medio de análisis microscópico, o por medio de análisis difractométrico de rayos X. En otras palabras, el material no ha sido sometido a procedimientos especiales de laminado ni recocido, según los procedimientos usados en la producción de acero con granos orientados, y la única orientación que puede estar presente en el material es la causada por un procedimiento normal de extrusión o laminado.

En un primer aspecto, la invención se relaciona con un procedimiento de apantallamiento del campo magnético generado por una línea de transmisión de energía eléctrica que comprende al menos un cable eléctrico, comprendiendo dicho procedimiento las etapas de:

- insertar dicho cable en un conducto que comprende al menos una capa de un material ferromagnético, caracterizado porque

dicho material ferromagnético es de granos no orientados y tiene una curva magnética con un valor máximo de permeabilidad magnética relativa (μ_{\max}) correspondiente a un valor ($H_{\mu_{\max}}$) del campo magnético inferior a 1000 A/m.

Preferentemente, la curva magnética del material tiene un valor máximo de permeabilidad magnética relativa (μ_{\max}) correspondiente a un valor ($H_{\mu_{\max}}$) del campo magnético en el intervalo de 10 A/m a 800 A/m.

Aún más preferentemente, la curva magnética tiene un valor máximo de permeabilidad magnética relativa (μ_{\max}) correspondiente a un valor ($H_{\mu_{\max}}$) del campo magnético en el intervalo de 30 A/m a 650 A/m.

Ventajosamente, el valor máximo de permeabilidad magnética relativa (μ_{\max}) es de al menos 500, estando preferentemente en el intervalo de 700 a 5000.

Típicamente, el procedimiento según la invención comprende la etapa de enterrar el conducto en una zanja de profundidad predeterminada.

La capa de apantallamiento puede ser producida por extrusión, o mediante el doblado de una plancha de dimensiones predeterminadas, por ejemplo una producida por laminado y la soldadura subsiguiente de sus caras longitudinalmente opuestas.

En una realización preferente, el procedimiento según la invención comprende, además, la etapa de disponer el cable o los cables en el conducto de tal modo que el centro de gravedad de una sección transversal del cable esté en la proximidad del centro geométrico de una sección correspondiente del conducto.

Ventajosamente, el procedimiento según la invención puede comprender, además, la etapa de enrollar al menos un elemento alargado, por ejemplo un cordón, alrededor de dicho al menos un cable.

En un segundo aspecto, la invención se relaciona con una línea de transmisión de energía eléctrica que comprende:

- un conducto que comprende al menos una capa de un material ferromagnético,
 - al menos un cable eléctrico dentro de dicho conducto,
- caracterizada porque

- dicho material ferromagnético es del tipo de granos no orientados y tiene una curva magnética que tiene un valor máximo de permeabilidad magnética relativa (μ_{\max}) correspondiente a un valor ($H_{\mu_{\max}}$) del campo magnético inferior a 1000 A/m.

5 Preferentemente, la curva magnética del material tiene un valor máximo de permeabilidad magnética relativa (μ_{\max}) correspondiente a un valor ($H_{\mu_{\max}}$) del campo magnético en el intervalo de 10 A/m a 800 A/m.

Aún más preferentemente, la curva magnética tiene un valor máximo de permeabilidad magnética relativa (μ_{\max}) correspondiente a un valor ($H_{\mu_{\max}}$) del campo magnético en el intervalo de 30 A/m a 650 A/m.

Ventajosamente, el valor máximo de permeabilidad magnética relativa (μ_{\max}) es de al menos 500, estando preferentemente en el intervalo de 700 a 5000.

10 En un primer ejemplo, el material ferromagnético es un acero cuyo contenido total de impurezas no supera el 1,5%.

Preferentemente, el contenido total de impurezas no supera el 1%, y aún más preferentemente no supera el 0,5%. Dicho acero con un contenido bajo de impurezas puede ser un acero pobre en carbono: preferentemente, el contenido de carbono no supera el 0,16%, y aún más preferentemente no supera el 0,03%.

15 Dicho acero con un contenido bajo de impurezas puede ser un acero pobre en manganeso: preferentemente, el contenido de manganeso no supera el 1%, y aún más preferentemente no supera el 0,5%.

Ventajosamente, la resistividad del acero con un contenido bajo de impurezas es menor de 20 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$. Para mejorar el efecto de apantallamiento, el índice G del tamaño del grano de dicho acero, medido según el estándar ASTM E-112, es menor de 9.

20 En un segundo ejemplo, el material ferromagnético es un acero al silicio. Preferentemente, el contenido de silicio está en el intervalo del 1% al 4%.

Ventajosamente, la línea de transmisión de energía eléctrica según la invención puede comprender un soporte para el cable o los cables dentro del conducto.

25 En una realización preferente, la línea de transmisión de energía eléctrica comprende al menos un elemento alargado enrollado en espiral alrededor de dicho al menos un cable, por ejemplo un cordón fabricado de material dieléctrico. Preferentemente, el material dieléctrico está seleccionado de un grupo que comprende fibras de nailon, fibras de aramida y fibras de poliéster.

Características y ventajas adicionales serán más claramente evidentes a la luz de la descripción detallada de algunos ejemplos de la presente invención. Esta descripción, proporcionada a continuación, se relaciona con los dibujos adjuntos, proporcionados únicamente a título de ejemplo y sin propósito restrictivo, en los cuales:

30 – la Fig. 1 muestra esquemáticamente en corte transversal un ejemplo de una línea de transmisión según la presente invención;

– la Fig. 2 muestra esquemáticamente una curva magnética μ -H típica de un material ferromagnético, que muestra las coordenadas del pico de la curva (μ_{\max} , $H_{\mu_{\max}}$);

35 – la Fig. 3 muestra un gráfico de la inducción magnética B encontrada a nivel del suelo cuando se usan conductos fabricados de diferentes tipos de acero;

– la Fig. 4 muestra un gráfico de las pérdidas eléctricas en el conducto para diferentes tipos de acero;

– la Fig. 5 muestra las curvas magnéticas μ -H de diferentes tipos de acero;

– la Fig. 6 muestra un gráfico de la inducción magnética B encontrada a nivel del suelo cuando se usa un conducto fabricado de acero al silicio con granos no orientados como una función del espesor del conducto;

40 – la Fig. 7 muestra un gráfico de la inducción magnética B encontrada a nivel del suelo como una función del diámetro de un cordón enrollado alrededor de los cables;

– la Fig. 8 muestra una vista microscópica de los dominios cristalinos de un acero con granos no orientados.

45 Con referencia a la Fig. 1, una línea 100, adecuada para la transmisión de energía eléctrica de gran potencia, comprende un conducto 101 fabricado de material ferromagnético, que tiene preferentemente una sección transversal cerrada, y al menos un cable eléctrico. La sección del conducto es, generalmente, esencialmente circular: no se excluyen secciones de forma diferente, como una sección cuadrada. Típicamente, se colocan tres cables 102a, 102b, 102c dentro del conducto 101, llevando cada uno de ellos una corriente alterna (típicamente, 50-60 Hz), en una línea trifásica. Preferentemente, los cables 102a, 102b, 102c están dispuestos en una configuración

de trébol, en otras palabras, de tal forma que sus centros geométricos están situados aproximadamente en los vértices de un triángulo (visto en sección). Ventajosamente, los cables están en contacto mutuo.

Por ejemplo, los cables 102a, 102b, 102c pueden estar fabricados de conductores Milliken de cobre esmaltado, con una sección transversal de 2500 mm^2 , aislados con un polímero extrudido, por ejemplo polietileno reticulado (XLPE).

- 5 También puede colocarse un revestimiento metálico en la superficie exterior del cable, para protegerlo de la humedad. El diámetro externo total de cada cable está típicamente en el intervalo de 100 a 150 mm.

- 10 Preferentemente, los cables 102a, 102b, 102c están elevados de la parte inferior del conducto 101 y están soportados por un medio 103 de soporte situado dentro del conducto 101, de tal forma que se reduzca la distancia entre el centro de gravedad de una sección transversal del trébol de cables y el centro geométrico de una sección correspondiente del conducto 101. En una realización preferente, el medio 103 de soporte es un elemento alargado enrollado en espiral alrededor del trébol de cables.

Alternativamente, los cables 102a, 102b, 102c pueden ser soportados mediante contacto directo con la parte inferior del conducto 101.

- 15 El espacio 104 dentro del conducto 101 que no está ocupado por el trébol de cables 102a, 102b, 102c y el soporte 103 puede dejarse en su espacio lleno de aire, o puede introducirse en el mismo un fluido, por ejemplo un gas inerte. Preferentemente, se proporciona una sobrepresión dentro del conducto para impedir la entrada de humedad desde el exterior del conducto 101. Por ejemplo, es posible introducir nitrógeno seco en el espacio interior 104 y someter el conducto a una pequeña sobrepresión interna de aproximadamente 50 kPa. Así puede prescindirse del revestimiento metálico a prueba de humedad colocado sobre la superficie exterior de cada cable.

- 20 La línea 100 está típicamente enterrada en una zanja, que generalmente tiene una profundidad de no más de 0,5 m (típicamente 1-1,5 m). La pared exterior del conducto 101 está cubierta de un material protector capaz de evitar la corrosión, por ejemplo polietileno o asfalto.

- 25 El grosor del conducto 101 puede elegirse de una gama de 2 a 14 mm, y preferentemente de 4 a 10 mm; aún más preferentemente, es de aproximadamente 8 mm. En general, el grosor del conducto 101 se escoge de tal manera que permita que el conducto soporte tensiones del tipo mecánico (tales como el impacto accidental de maquinaria de excavación, por ejemplo) y también que soporte el peso del suelo que tiene encima.

El diámetro interno del conducto 101 puede de un intervalo de 2,3 a 2,8 veces el diámetro del cable que lleva cada fase individual, de tal forma que los cables puedan ser traccionados con suficiente facilidad durante el tendido de la línea.

- 30 El solicitante ha descubierto que un conducto que comprenda al menos una capa de material ferromagnético con granos no orientados, caracterizado por una curva magnética que tiene un valor máximo de permeabilidad magnética μ_{max} correspondiente a un valor $H_{\mu_{\text{max}}}$ de campo magnético inferior a 1000 A/m, proporciona un blindaje altamente efectivo contra el campo magnético generado por una línea de transmisión de energía eléctrica que tenga una potencia de 1000 MVA (con una tensión de 400 kV y una corriente de 1500 A), tal como se describe más arriba con referencia a la Fig. 1.

- 35 Aquí y en el resto de la descripción, la expresión “curva magnética” denota una curva que describe la variación de la permeabilidad magnética relativa μ_r de un material como una función de un campo magnético aplicado H, tal como se halla en el estándar IEC 404, “Materiales magnéticos”. En particular, según este estándar, la permeabilidad magnética se mide sumergiendo un anillo de material en un campo magnético dirigido circunferencialmente con respecto al mismo. Se muestra una curva magnética tipo de un material ferromagnético en la Fig. 2, en la que se indican las coordenadas del pico μ_{max} , $H_{\mu_{\text{max}}}$.

Sin desear asociarse con ninguna teoría particular de interpretación, el solicitante considera que la capacidad de apantallamiento del conducto depende del valor que adopte el campo magnético dentro del material de apantallamiento.

- 45 El valor del campo magnético dentro del material se denotará como H_{mat} y el valor del campo magnético generado por los cables solamente como H_c . Dado que el material es ferromagnético, el campo magnético H_{mat} dentro de él es menor que H_c . Según el solicitante puede obtenerse un apantallamiento efectivo fabricando un conducto de un material que tenga un pico de permeabilidad magnética μ_{max} centrado en un valor $H_{\mu_{\text{max}}}$ del campo magnético cercano al valor que tiene el campo magnético dentro del material (H_{mat}); en otras palabras, un valor menor que H_c .
- 50 En la región del pico, la permeabilidad magnética del apantallamiento se vuelve muy alta. Si el campo magnético H_{mat} tiene un valor cercano a $H_{\mu_{\text{max}}}$ dentro del material, el material tiene una permeabilidad magnética elevada y, por lo tanto, gran capacidad para “atrapar” el campo magnético dentro de sí mismo. Esto es equivalente a una capacidad elevada para apantallar el campo magnético producido por los cables.

- 55 El fenómeno descrito en lo que antecede es de un tipo no lineal en grado sumo, debido a la dependencia de la permeabilidad magnética μ_r con respecto al campo magnético aplicado. En general, es imposible predecir el valor

que tendrá el campo magnético H_{mat} dentro de un material ferromagnético inmerso en un campo magnético externo H_c . Según el tipo de material y el campo magnético generado por los cables, el material del conducto tiene un cierto valor H_{mat} del campo magnético y, por lo tanto, un cierto valor de permeabilidad magnética μ_r : a medida que aumenta μ_r , también mejora la capacidad del conducto de atrapar el campo magnético.

- 5 El solicitante también observó que el efecto de apantallamiento se vuelve más efectivo a medida que $H_{\mu_{max}}$ disminuye. Preferentemente, $H_{\mu_{max}}$ está en el intervalo de 10 A/m a 800 A/m. Aún más preferentemente, $H_{\mu_{max}}$ está en el intervalo de 30 A/m a 650 A/m. Ventajosamente, el valor máximo μ_{max} de permeabilidad magnética es mayor que 500, y preferentemente está en el intervalo de 700 a 5000.

- 10 Introduciendo los cables 102a, 102b, 102c de la línea 100 de transmisión en un conducto 101 que comprende al menos una capa de apantallamiento de un material con las características anteriormente mencionadas, es posible obtener valores de inducción magnética del orden de 0,2 μT , o menores, a una distancia de 0,5 m desde la parte superior del conducto.

- 15 Si el valor máximo de la curva magnética del material de la capa de apantallamiento corresponde a valores menores del campo magnético (en torno a valores del campo magnético de 200-250 A/m o menores), la capacidad de apantallamiento aumenta progresivamente de manera exponencial, hasta que los valores de la inducción magnética encontrados a nivel del suelo resultan prácticamente inmedibles con instrumentos ordinarios.

- 20 Sin embargo, la eficiencia del apantallamiento puede disminuir si el material de apantallamiento tiene un pico de permeabilidad magnética correspondiente a valores del campo magnético por debajo de aproximadamente 10 A/m. Esto se debe a que, en los materiales que tienen valores de $H_{\mu_{max}}$ así de bajos, el pico de la permeabilidad magnética puede ser muy estrecho; en otras palabras, fuera de un intervalo limitado de valores del campo magnético, la permeabilidad magnética del material puede disminuir muy rápidamente a valores que puede demostrarse que son insuficientes para apantallar el intenso campo magnético generado por la línea de transmisión.

- 25 Un primer ejemplo de un material con las características magnéticas mencionadas en lo que antecede es un acero que tenga un contenido total de impurezas que no supere aproximadamente el 1,5%, preferentemente que no supere aproximadamente el 1% y aún más preferentemente que no supere aproximadamente el 0,5%.

Aquí y en el resto de la descripción, el término "impurezas" denota todos los elementos distintos del hierro que están presentes en el acero.

- 30 Más en particular, el acero de la capa de apantallamiento es, preferentemente, un acero pobre en carbono. Aquí y en el resto de la descripción, la expresión "pobre en carbono" se relaciona con un contenido de carbono no supera el 0,5% en peso.

Preferentemente, el contenido de carbono no supera aproximadamente el 0,16%, y, aún más preferentemente, no supera aproximadamente el 0,03%.

Además, preferentemente, el acero de la capa de apantallamiento tiene un contenido de manganeso que no supera aproximadamente el 1%, y, aún más preferentemente, no supera aproximadamente el 0,5%.

- 35 Sin desear asociarse con ninguna teoría particular de interpretación, el solicitante considera que las impurezas presentes, y particularmente el manganeso y el carbono, reducen el apantallamiento magnético, dado que están interpuestas, en la red cristalina del acero, entre los granos de hierro, restando continuidad de la estructura magnética del material: así se crean microrregiones de baja permeabilidad magnética dentro del material, haciendo el apantallamiento del campo magnético menos efectivo.

- 40 El solicitante ha observado que, a medida que aumenta el tamaño del grano del acero, hay una correspondiente mejora en la capacidad de apantallamiento de la capa. Según los estándares internacionales, el tamaño del grano de un acero puede determinarse por medio de un índice G adimensional, derivado de un recuento del número de granos presentes dentro de un área predeterminada. Por lo tanto, a medida que aumenta el tamaño del grano, el índice G disminuye. En algunos ejemplos de aceros sometidos a ensayo por el solicitante, el tamaño del grano se evaluó por medio del índice G adimensional según el estándar ASTM E-112. Preferentemente, el tamaño de los granos, evaluados por medio del índice G (ASTM E-112), no supera 9.

Preferentemente, el acero para una capa efectiva de apantallamiento tiene una resistividad eléctrica de menos de 20 $\mu\Omega \cdot cm$. Una baja resistividad facilita el flujo de las corrientes inducidas por el campo magnético generado por los cables en la superficie del conducto, mejorando así el efecto de blindaje magnético del conducto.

- 50 Un segundo ejemplo de un material de apantallamiento con las características magnéticas mencionadas en lo que antecede es un acero al silicio con granos no orientados. Para proporcionar un apantallamiento efectivo, el porcentaje de silicio en el acero puede seleccionarse en un intervalo del 1% al 4%.

Una capa de apantallamiento con las características anteriormente mencionadas puede ser fabricada de forma ventajosa mediante procedimientos convencionales. Por ejemplo, la capa puede ser producida por extrusión, o

doblando una chapa de dimensiones predeterminadas y luego soldándola por sus bordes longitudinales opuestos. Esta chapa puede ser producida, por ejemplo, mediante laminado.

En la realización particularmente preferente mostrada en la Fig. 1, los tres cables 102a, 102b, 102c están dispuestos en una configuración de trébol y elevados de la parte inferior del conducto 101 por al menos un elemento alargado 103, por ejemplo un cordón enrollado en espiral alrededor de los tres cables. La Fig. 7 muestra el resultado de una simulación, llevada a cabo por el solicitante, de un cálculo de la inducción magnética a nivel del suelo, a una distancia de 1,2 m desde la parte superior de un conducto fabricado de acero pobre en carbono, como una función del diámetro del cordón.

Para la simulación se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros: diámetro externo del conducto 400 mm, grosor del conducto 10 mm, diámetro de cada cable 150 mm, corriente 1500 A, tensión 400 kV.

La Fig. 7 muestra la disminución de la inducción magnética a nivel del suelo con el aumento del diámetro (\varnothing) del cordón: puede verse que la inducción magnética alcanza un valor mínimo cuando el diámetro del cordón es de 60 mm, lo que se corresponde con llevar el centro de gravedad de los cables 102a, 102b, 102c al centro geométrico del conducto 101 (visto en sección).

La simulación también reveló que, cuando el centro de gravedad de los cables se mueve hacia el centro geométrico del conducto, las líneas de flujo de la inducción magnética tienen a estar más juntas dentro del conducto 101 y a tener una forma más simétrica. La mejora de la simetría del sistema permite una selección aún más efectiva de un acero que tenga un pico de permeabilidad magnética relativa según lo que se ha mencionado previamente, dado que el campo magnético generado por los cables es esencialmente uniforme en toda la superficie interna del conducto, igual que el comportamiento magnético del material del que está fabricado el conducto. En otras palabras, cuando el centro de gravedad de los cables 102a, 102b, 102c se lleva hacia el centro geométrico del conducto 101, el material del conducto llega a tener esencialmente la misma permeabilidad magnética relativa a lo largo de todo el conducto.

El soporte 103 hace posible reducir las pérdidas debidas a las corrientes parásitas, que se localizan en las regiones del conducto 101 próximas a los puntos de contacto de los cables 102a, 102b, 102c, debido a la separación de los dos cables 102b, 102c de la parte inferior del conducto: en la región superior del conducto 101 hay un pequeño aumento en las pérdidas, debido a la correspondiente aproximación del cable 102a. De todos modos, el efecto global es una reducción de las pérdidas.

Ventajosamente, el uso de un elemento enrollado alrededor de los cables 102a, 102b, 102c permite que los cables se mantengan en estrecho contacto mutuo en todo momento, incluso cuando tienden a separarse como resultado de tensiones termomecánicas o electromecánicas. Manteniendo los cables en contacto mutuo, es posible reducir a un mínimo la distancia entre los centros de los cables; en otras palabras, entre los centros de las corrientes que fluyen por los cables, a lo largo del conducto 101, con una consiguiente disminución en la inducción magnética que ha de apantallarse.

El diámetro del cordón 103 de soporte puede seleccionarse de tal manera que lleve el centro de gravedad de los cables más cerca del centro geométrico del conducto 101 (visto en sección) a una distancia que es preferentemente menor de $(D-d)/6$, representando D el diámetro interno del conducto 101 y representando d el diámetro externo de uno de los cables 102a, 102b, 102c. Así, es posible obtener una buena solución de compromiso entre la reducción de la inducción magnética (Fig. 7) y la limitación impuesta por las dimensiones globales del sistema del cordón y los cables dentro del conducto 101.

Para instalar la línea 100, la primera etapa es normalmente tender el conducto 101, excavando una zanja y luego enterrando en sucesión longitudes individuales del conducto. Las longitudes individuales son unidas entonces mediante soldadura u otro procedimiento que garantice la continuidad eléctrica e impida la entrada de humedad. La zanja puede volverse a tapar entonces, permitiendo la rápida restauración del área afectada por el tendido. A continuado, los cables son enhebrados en un extremo del conducto y se los tracciona desde el otro extremo. En la realización ilustrada en la Fig. 1, los cables 102a, 102b, 102c se juntan en una configuración de trébol, y luego el cordón 103 se enrolla en espiral alrededor de ellos para evitar su movimiento mutuo; a continuación, se enhebran en el conducto 101. Cuando han sido enhebrados en el conducto, los cables 102a, 102b, 102c descansan sobre el cordón 103, estando colocados con su centro de gravedad en la proximidad del centro geométrico del conducto 101. Durante la etapa del tendido del cable, el cordón 103 es sometido a una tracción considerable como resultado del peso de los cables 102a, 102b, 102c y de la fricción con la parte inferior del conducto 101: por esta razón, el material del que está fabricado el cordón 103 debe poder soportar tanto la tracción como la abrasión debido al roce. Preferentemente, el cordón está fabricado de material dieléctrico. En una realización construida por el solicitante, el cordón de soporte consiste en fibras de nailon; otros materiales que pueden usarse son fibras de poliéster o fibras de aramida como el Kevlar®.

Ejemplo 1

- 5 Las Figuras 3 y 4 muestran los resultados de una simulación llevada a cabo por el solicitante por medio de un cálculo de elementos finitos: este evaluó la inducción magnética B a nivel del suelo generada por una línea de transmisión de 400 kV 1500 A que comprendía tres cables con una sección transversal de 2500 mm², dispuestos en trébol dentro de un conducto ferromagnético de acero con una sección cerrada dotado de un diámetro externo de 406 mm y un grosor de 10 mm, enterrado en una zanja con una profundidad de 1500 mm. La simulación se llevó a cabo con diferentes tipos de acero con granos no orientados. También se evaluaron las pérdidas eléctricas en el conducto: estas comprenden tanto las pérdidas debidas a las corrientes inducidas en el conducto por la corriente que fluye en los cables como las pérdidas asociadas con la histéresis magnética del material del que está fabricado el conducto.
- 10 La Tabla 1 muestra la composición química (los porcentajes se relacionan con el peso total del acero), la resistividad eléctrica y el índice G (ASTM E-112) que caracteriza el tamaño del grano de los aceros en cuestión. También se muestran las coordenadas del pico de la curva magnética.

Tabla 1

Tipo de acero		I	II	III	IV	V
		Cfr.	Inv.	Inv.	Inv.	Inv.
Elemento						
Carbono	%	0,180	0,130	0,160	0,009	0,010
Manganeso	%	1,460	0,490	0,680	0,200	0,190
Silicio	%	0,270	0,200	0,030	0,030	0,030
Azufre	%	0,018	0,010	0,011	0,005	0,011
Fósforo	%	0,015	0,011	0,007	0,005	0,005
Cromo	%	0,050	0,050	0,013	0,013	0,013
Níquel	%	0,030	0,020	0,023	0,021	0,025
Molibdeno	%	0,020	0,010	0,005	0,005	0,005
Aluminio	%	0,027	0,011	0,055	0,023	0,027
Cobre	%	0,020	0,100	0,025	0,007	0,016
Impurezas totales	%	2,090	1,032	1,009	0,318	0,332
Hierro	%	97,910	98,968	98,991	99,682	99,668
Resistividad eléctrica	Ω•m	2,16E-07	1,74E-07	1,66E-07	1,19E-07	1,17E-07
G (ASTM E-112)		9,5	7,5	9,5	7,0-7,5	6,0-6,5
μ _{max}		482	718	737	956	1114
H _{μmax}	A/m	1350	616	970	540	523

- 15 Para evaluar las pérdidas debidas a la histéresis, también se midió el ángulo de histéresis y se halló que era de aproximadamente 30° para todos los aceros mostrados en la Tabla 1.

La Fig. 8 muestra una fotografía, tomada mediante un microscopio óptico, de una porción de acero de tipo V, que muestra sus granos. Como puede verse, los granos no tienen una dirección preferente de alineamiento.

La Fig. 3 muestra la inducción magnética B al nivel del suelo, en μT , calculada por medio de la simulación para los cinco tipos de acero de la Tabla 1.

- 5 Como puede verse, el conducto fabricado con el acero I es claramente el peor de los cinco considerados, con valores de inducción magnética B de tres a siete veces más elevados que los encontrados con los aceros II a V. Este resultado indica que el acero no es adecuado para apantallar los campos magnéticos generados por una línea de transmisión de gran potencia si se quieren obtener valores de inducción magnética a nivel del suelo de $0,2 \mu\text{T}$ o menos.
- 10 Por otra parte, volviendo a la Fig. 3, puede verse que los aceros II a V son muy efectivos en términos de apantallamiento del campo magnético, proporcionan valores de inducción magnética de solo aproximadamente $0,1-0,2 \mu\text{T}$. Debería hacerse notar que se obtienen valores de inducción magnética de 100 a 200 veces menor que con una configuración consistente en tres cables enterrados sin blindaje magnético.

- 15 La Fig. 4 muestra las pérdidas eléctricas (E) en el conducto, medidas en W/m , para los cinco tipos de acero considerados. Como puede verse, los aceros II a V son también significativamente mejores que el acero de tipo I con respecto a este parámetro, que es fundamental para el diseño de la línea de transmisión, dado que es responsable de cualquier sobrecalentamiento del sistema. De hecho, un aumento en la temperatura del tubo debido al flujo de corrientes parásitas lleva a un calentamiento de los cables, con una consiguiente disminución de la capacidad de los cables para transportar corriente.

- 20 La Fig. 5 muestra las curvas magnéticas medidas para los aceros I-II-III-IV-V; en otras palabras, las curvas que describen la variación de la permeabilidad magnética relativa μ_r como una función del campo magnético aplicado H. La medición se realizó según el estándar IEC 404, "Materiales magnéticos".

- 25 Como puede verse, la abscisa $H_{\mu_{\max}}$ del pico de la curva magnética para los aceros de los tipos II-III-IV-V se corresponde con valores del campo magnético inferiores que los de la abscisa $H_{\mu_{\max}}$ del pico de la curva del acero de tipo I. Los valores (μ_{\max} , $H_{\mu_{\max}}$) para los aceros I a V se muestran en la Tabla 1.

Además, los aceros de los tipos II-III-IV-V tienen un pico de permeabilidad magnética μ_{\max} que es mayor que el pico de la curva del acero de tipo I.

Ejemplo 2

- 30 La Fig. 6 muestra el resultado de una simulación llevada a cabo por el solicitante en la que el conducto estaba fabricado de un acero, pobre en carbono, con granos no orientados, que contenía aproximadamente el 2% de silicio. La Fig. 6 muestra la variación de la inducción magnética al nivel del suelo como una función del grosor (t) del conducto. Como puede verse, un grosor de solo 3 mm de acero al silicio es suficiente para apantallar el campo magnético lo suficiente como para obtener valores de inducción magnética al nivel del suelo de menor de $0,2 \mu\text{T}$. Con un grosor de 8 mm, es posible lograr valores de inducción magnética del orden de $10^{-3} \mu\text{T}$, en el límite del alcance de los instrumentos de medición.
- 35

REIVINDICACIONES

1. Un procedimiento de apantallamiento del campo magnético generado por una línea (100) de transmisión de energía eléctrica que comprende al menos un cable eléctrico (102a, 102b, 102c), comprendiendo dicho procedimiento las etapas de:
- 5 – insertar dicho cable en un conducto (101) que comprende al menos una capa de un material ferromagnético,
- caracterizado porque**
- dicho material ferromagnético es de granos no orientados y tiene una curva magnética con un valor máximo de permeabilidad magnética relativa (μ_{\max}) correspondiente a un valor ($H_{\mu_{\max}}$) del campo magnético inferior a 1000 A/m.
- 10 2. El procedimiento según la Reivindicación 1 **caracterizado porque** dicha curva magnética tiene un valor máximo de permeabilidad magnética relativa (μ_{\max}) correspondiente a un valor ($H_{\mu_{\max}}$) del campo magnético en el intervalo de 10 A/m a 800 A/m.
- 15 3. El procedimiento según la Reivindicación 1 **caracterizado porque** dicha curva magnética tiene un valor máximo de permeabilidad magnética relativa (μ_{\max}) correspondiente a un valor ($H_{\mu_{\max}}$) del campo magnético en el intervalo de 30 A/m a 650 A/m.
4. El procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones precedentes **caracterizado porque** dicho valor máximo de permeabilidad magnética relativa (μ_{\max}) es al menos 500.
5. El procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones precedentes que, además, comprende la etapa de:
- 20 – enterrar dicho un conducto (101) en una zanja de profundidad predeterminada.
6. El procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones precedentes **caracterizado porque** dicha capa está producida por extrusión.
7. El procedimiento según las Reivindicaciones 1 a 5 **caracterizado porque** dicha capa está producida mediante el doblado de una hoja de dimensiones predeterminadas y la soldadura subsiguiente de sus caras longitudinalmente opuestas.
- 25 8. El procedimiento según la Reivindicación 7 **caracterizado porque** dicha hoja está producida por laminado.
9. El procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones precedentes que, además, comprende la etapa de:
- 30 – disponer dicho al menos un cable en dicho conducto (101) de tal modo que el centro de gravedad de una sección transversal de dicho al menos un cable esté en la proximidad del centro geométrico de una sección correspondiente del conducto (101).
10. El procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones precedentes que, además, comprende la etapa de:
- 35 – enrollar al menos un elemento alargado (103) alrededor de dicho al menos un cable.
11. Una línea (100) de transmisión de energía eléctrica que comprende:
- un conducto (101) que comprende al menos una capa de un material ferromagnético,
- al menos un cable eléctrico (102a, 102b, 102c) dentro de dicho conducto (101),
- caracterizada porque**
- 40 – dicho material ferromagnético es del tipo de granos no orientados y tiene una curva magnética que tiene un valor máximo de permeabilidad magnética relativa (μ_{\max}) correspondiente a un valor ($H_{\mu_{\max}}$) del campo magnético inferior a 1000 A/m.
12. La línea de transmisión de energía eléctrica según la Reivindicación 11 **caracterizada porque** dicha curva magnética tiene un valor máximo de permeabilidad magnética relativa (μ_{\max}) correspondiente a un valor ($H_{\mu_{\max}}$) del campo magnético en el intervalo de 10 A/m a 800 A/m.

13. La línea de transmisión de energía eléctrica según la Reivindicación 12 **caracterizada porque** dicha curva magnética tiene un valor máximo de permeabilidad magnética relativa (μ_{\max}) correspondiente a un valor ($H_{\mu_{\max}}$) del campo magnético en el intervalo de 30 A/m a 650 A/m.
- 5 14. La línea de transmisión de energía eléctrica según las Reivindicaciones 11 a 13 **caracterizada porque** dicho valor máximo de permeabilidad magnética relativa (μ_{\max}) es al menos 500.
15. La línea de transmisión de energía eléctrica según la Reivindicación 11 **caracterizada porque** dicho material ferromagnético es un acero cuyo contenido total de impurezas no supera el 1,5%.
16. La línea de transmisión de energía eléctrica según la Reivindicación 15 **caracterizada porque** dicho acero tiene un total de impurezas que no supera el 1%.
- 10 17. La línea de transmisión de energía eléctrica según la Reivindicación 16 **caracterizada porque** dicho acero tiene un total de impurezas que no supera el 0,5%.
18. La línea de transmisión de energía eléctrica según la Reivindicación 15 **caracterizada porque** dicho acero es un acero pobre en carbono.
- 15 19. La línea de transmisión de energía eléctrica según la Reivindicación 18 **caracterizada porque** dicho acero tiene un contenido de carbono que no supera el 0,16%.
20. La línea de transmisión de energía eléctrica según la Reivindicación 19 **caracterizada porque** dicho acero tiene un contenido de carbono que no supera el 0,03%.
21. La línea de transmisión de energía eléctrica según la Reivindicación 15 **caracterizada porque** dicho acero tiene un contenido de manganeso que no supera el 1%.
- 20 22. La línea de transmisión de energía eléctrica según la Reivindicación 21 **caracterizada porque** dicho acero tiene un contenido de manganeso que no supera el 0,5%.
23. La línea de transmisión de energía eléctrica según la Reivindicación 11 **caracterizada porque** dicho material ferromagnético es un acero al silicio.
- 25 24. La línea de transmisión de energía eléctrica según la Reivindicación 23 **caracterizada porque** dicho acero tiene un contenido de silicio en el intervalo del 1% al 4%.
25. La línea de transmisión de energía eléctrica según las Reivindicaciones 11 a 24 **caracterizada porque** comprende un soporte (103) para dicho al menos un cable (102a, 102b, 102c) dentro de dicho conducto (101).
- 30 26. La línea de transmisión de energía eléctrica según las Reivindicaciones 11 a 24 **caracterizada porque** comprende un elemento alargado enrollado en espiral alrededor de dicho al menos un cable (102a, 102b, 102c).
27. La línea de transmisión de energía eléctrica según la Reivindicación 26 **caracterizada porque** dicho elemento alargado es un cordón fabricado de material dieléctrico.
- 35 28. La línea de transmisión de energía eléctrica según la Reivindicación 27 **caracterizada porque** dicho material dieléctrico está seleccionado de un grupo que comprende fibras de nailon, fibras de aramida y fibras de poliéster.
29. La línea de transmisión de energía eléctrica según las Reivindicaciones 11 a 28 **caracterizada porque** el espesor de dicho conducto (101) está en el intervalo de 2 a 14 mm.
30. La línea de transmisión de energía eléctrica según la Reivindicación 29 **caracterizada porque** el espesor de dicho conducto (101) está en el intervalo de 4 a 10 mm.
- 40 31. La línea de transmisión de energía eléctrica según la Reivindicación 30 **caracterizada porque** el espesor de dicho conducto (101) es de 8 mm.
32. La línea de transmisión de energía eléctrica según las Reivindicaciones 11 a 31, teniendo dichos cables un diámetro externo D_c , teniendo dicho conducto un diámetro interno D_t , **caracterizada porque** D_t está en el intervalo entre $2,3 D_c$ y $2,8 D_c$.
- 45 33. La línea de transmisión de energía eléctrica según la Reivindicación 15 **caracterizada porque** la resistividad de dicho acero es menor de $20 \mu\Omega \cdot \text{cm}$.
34. La línea de transmisión de energía eléctrica según la Reivindicación 15 **caracterizada porque** el índice G del tamaño del grano (ASTM E- 112) de dicho acero es menor de 9.

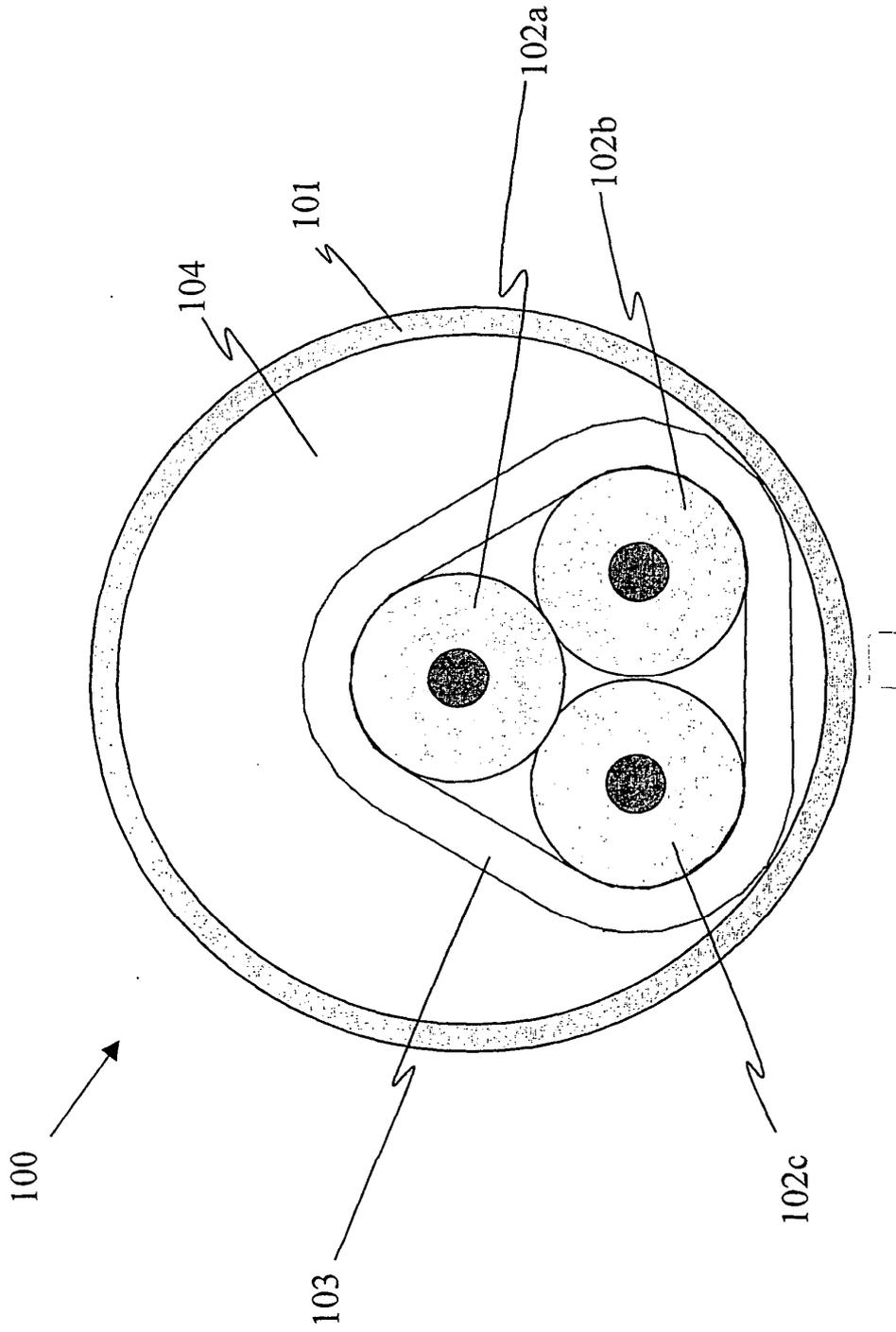


Fig. 1

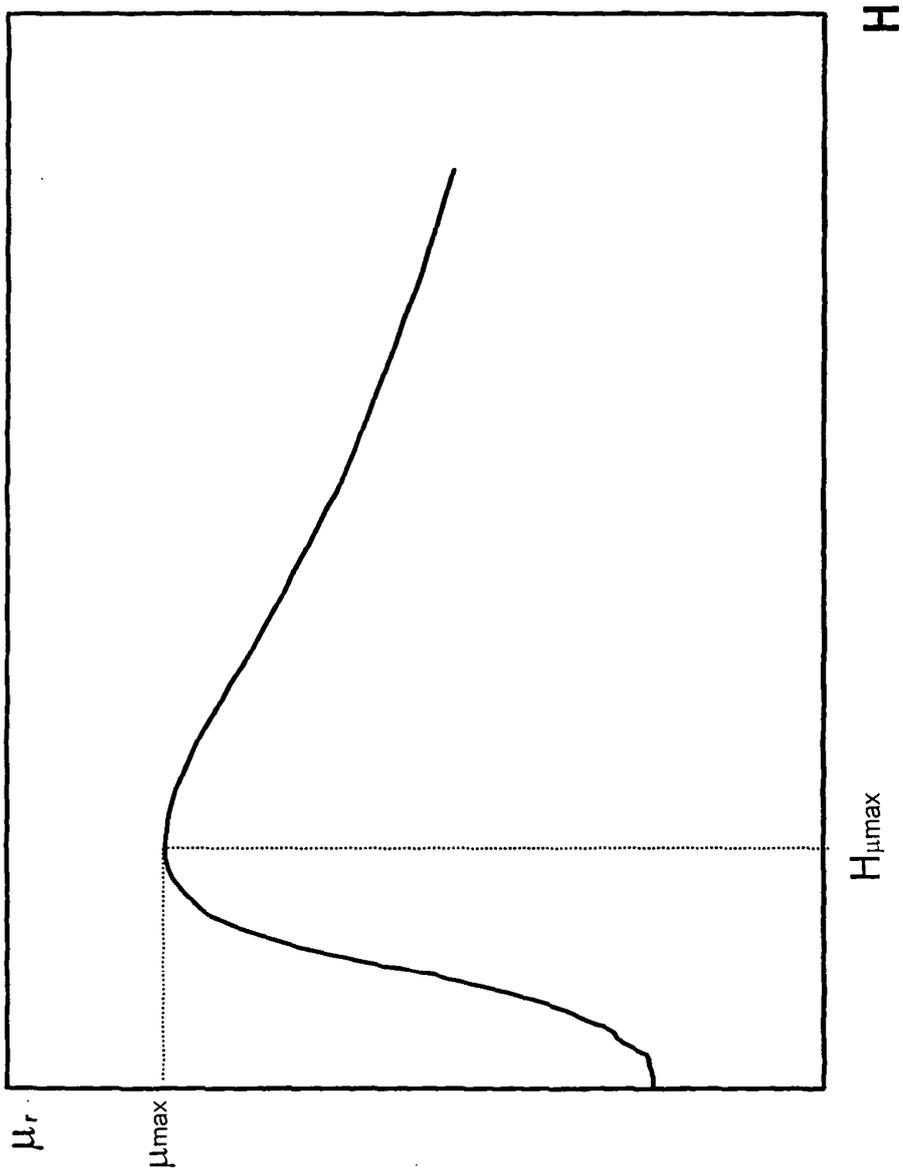


Fig. 2

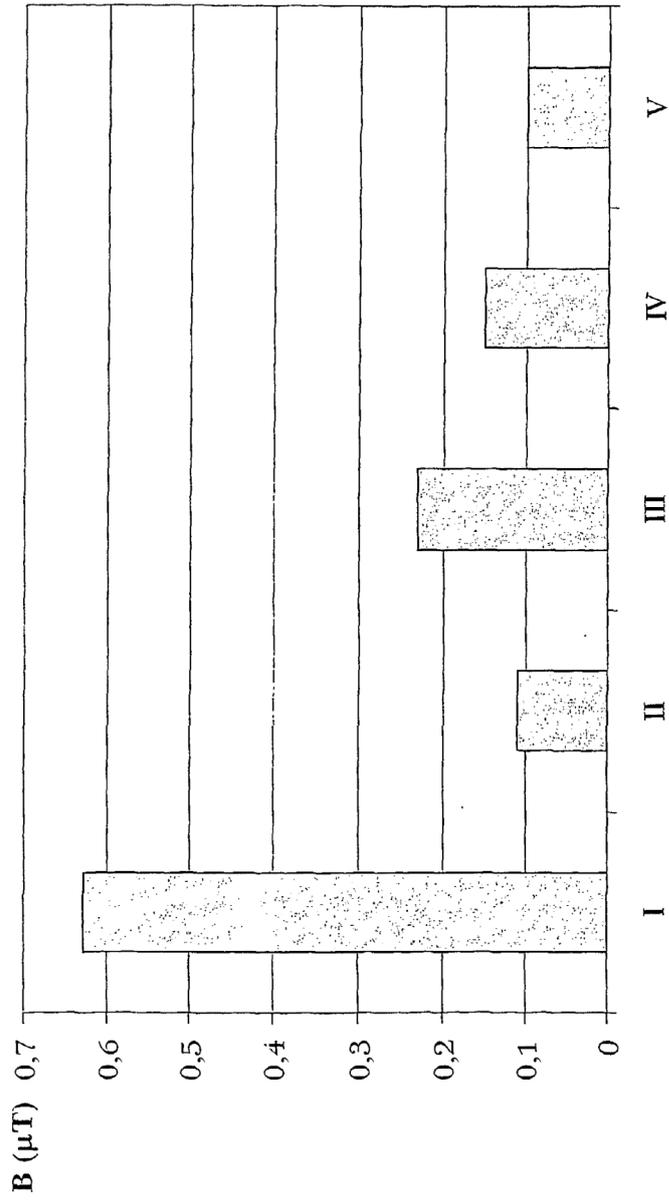


Fig.3

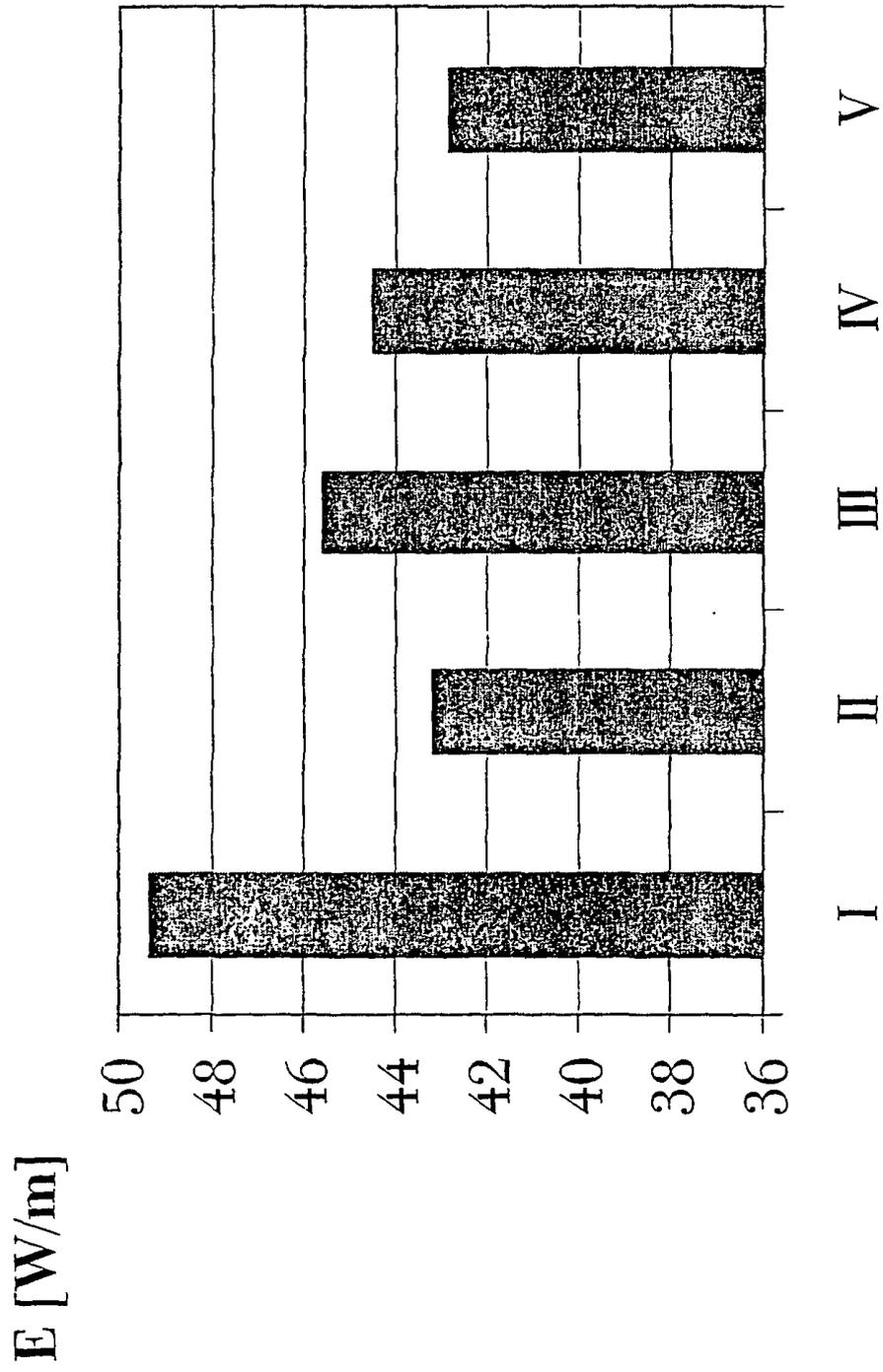


Fig.4

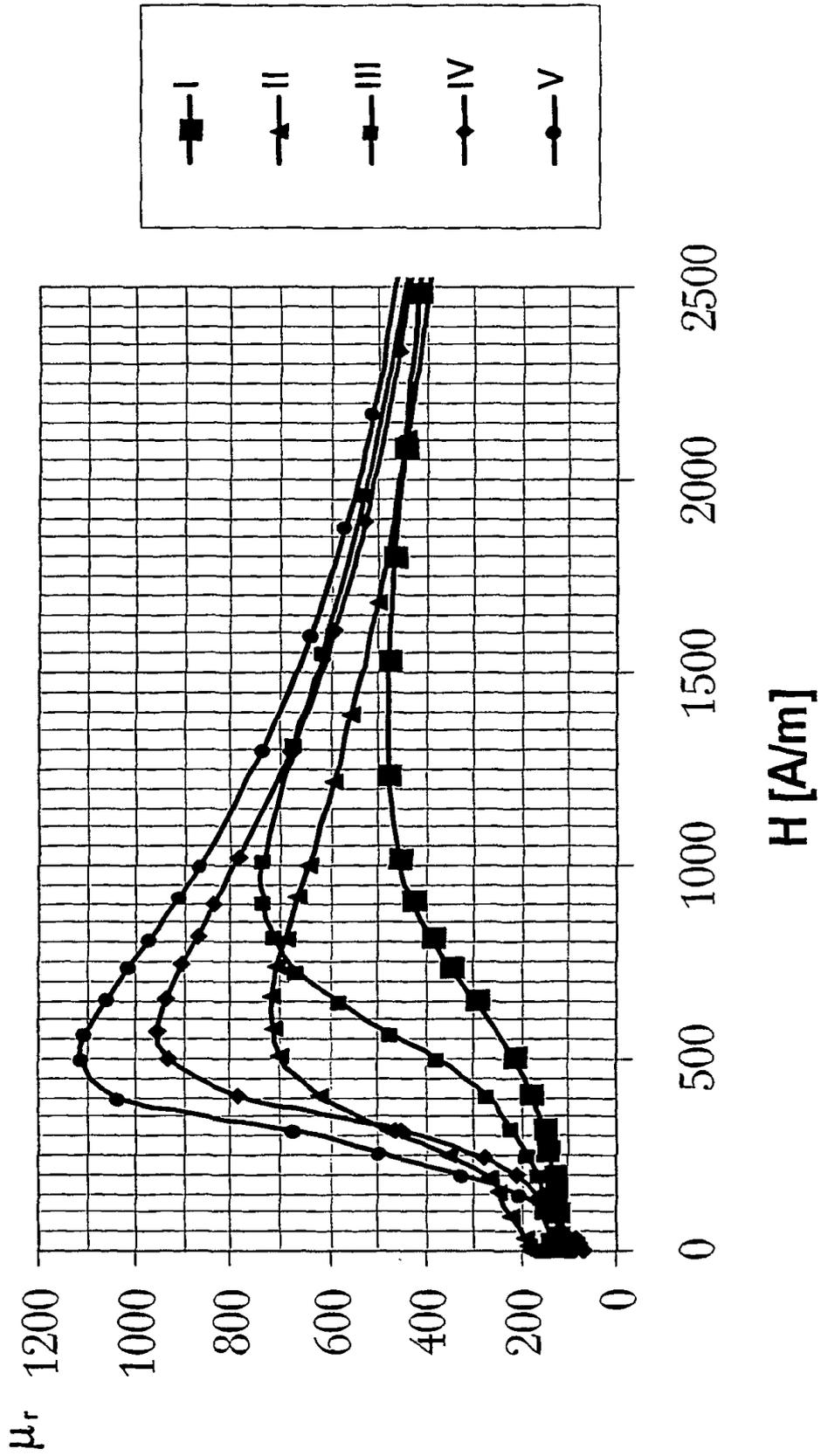


Fig.5

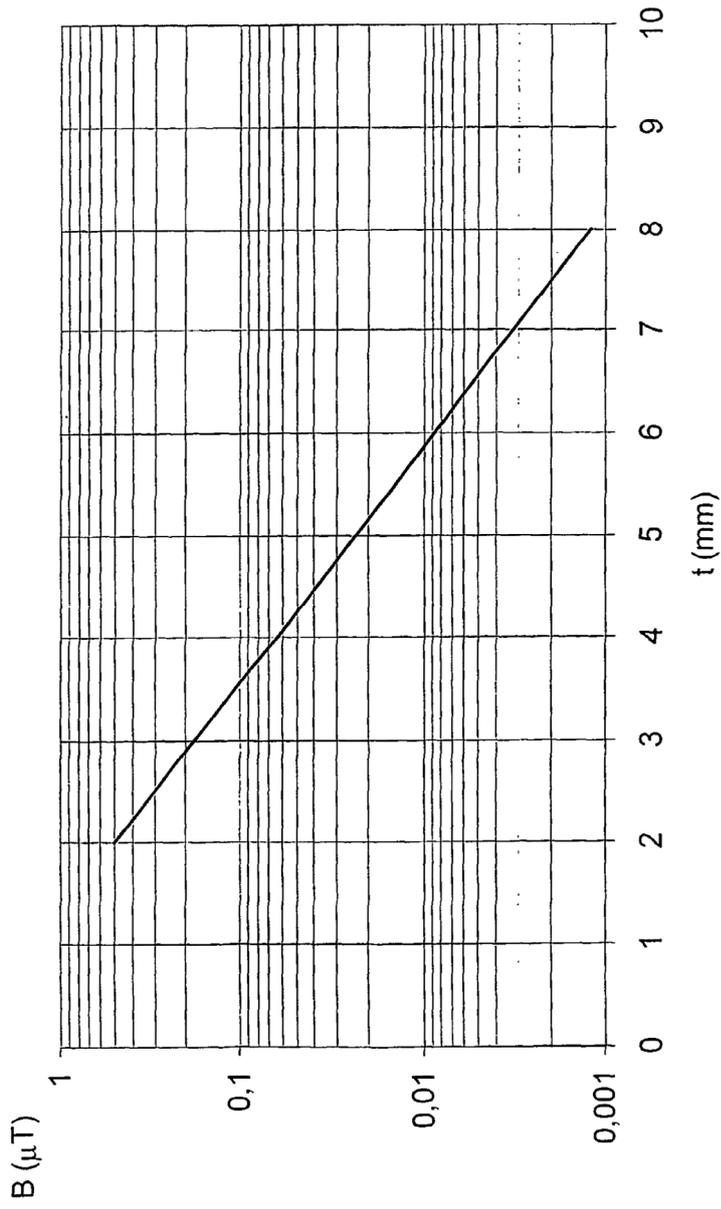


Fig.6

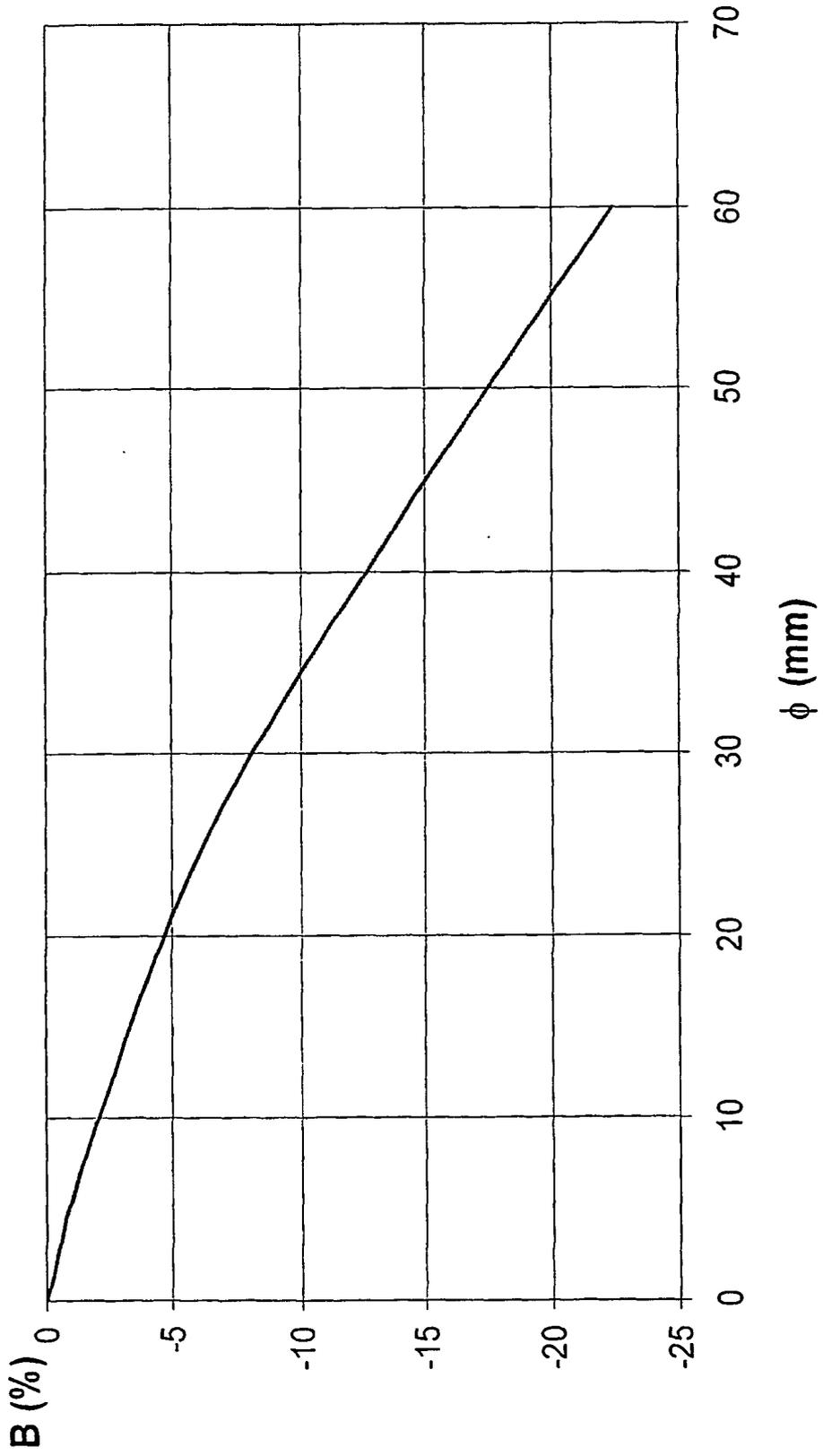
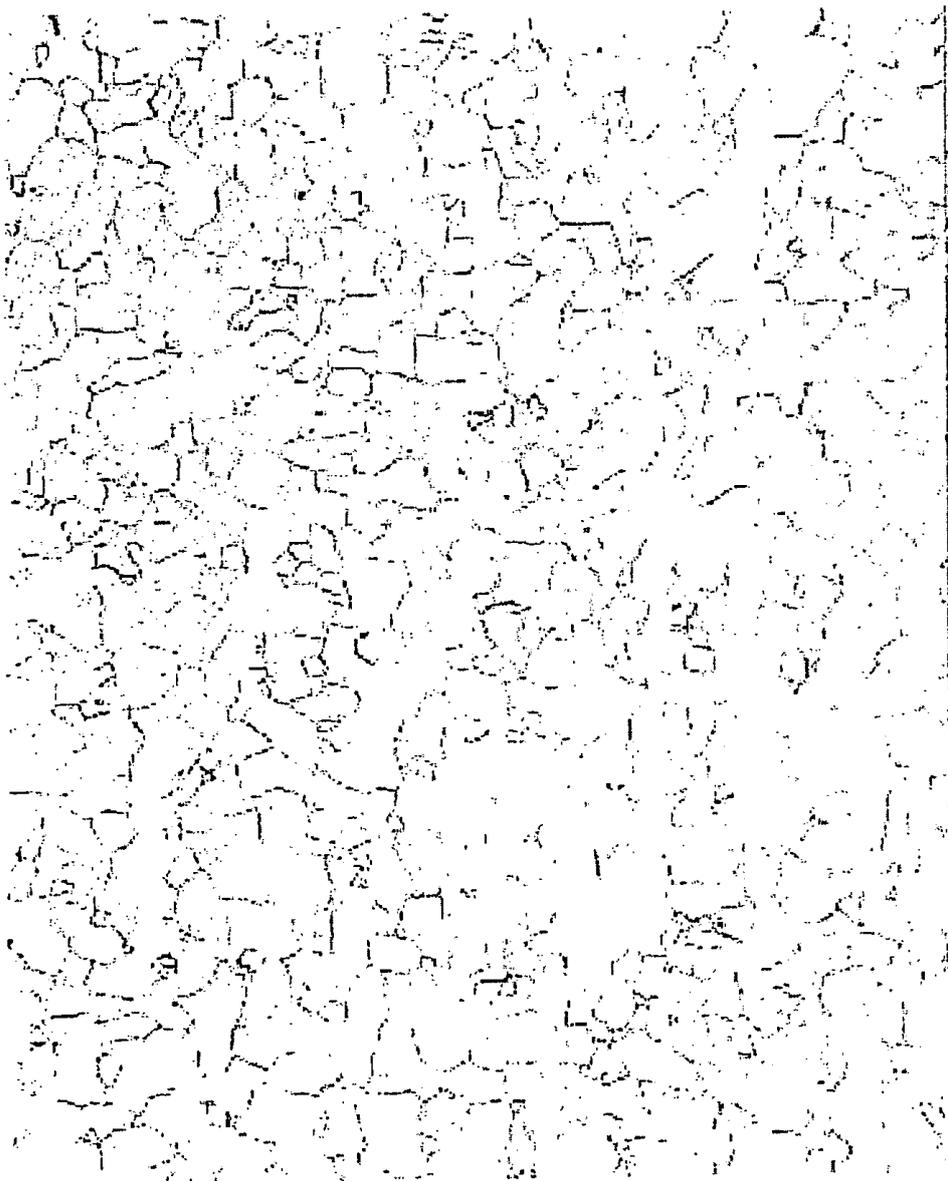


Fig.7



x 100

Fig.8