

EMPLEO DE LA TECNICA DE DESGASIFICACION AL VACIO
EN ACERIA PARA LA OBTENCION DE NUEVAS CALIDADES
EN CHAPA MAGNETICA NO-ORIENTADA

I. Ibarrondo Dr. Ing. Ind.

Profesor Titular de Física Aplicada a la Técnica.

Escuela de Ingeniería Técnica Industrial de San Sebastián.
(Universidad del País Vasco).

1. INTRODUCCION.

Es bien conocido el hecho de que el creciente incremento en los costes de la energía, especialmente desde 1974, ha hecho que el ahorro de la misma adquiriera un singular relieve.

Se hace por ello evidente la necesidad de un cambio progresivo en los criterios de selección de la materia prima. Ya que si bien con anterioridad a la crisis energética de 1974 los costes derivados de la calidad seleccionada para la materia prima eran fundamentales, sin embargo, con posterioridad a dicha fecha, es notoria la mayor incidencia de los costes de explotación o funcionamiento, haciéndose cada vez más patente la necesidad de emplear máquinas eléctricas de mayor rendimiento (1), obtenido éste mediante la combinación del adecuado diseño tecnológico y el empleo de superiores calidades en la materia prima elegida.

Consecuencia de todo ello es la necesidad de modificar los procesos siderúrgicos convencionales e introducir nuevas técnicas, entre las que cabe citar, de manera preferente, la desgasificación al vacío en acería, conducentes a la obtención de nuevas calidades de chapa magnética, así como el desarrollo, a nivel de laboratorio, de nuevos materiales tales como las bandas cristalinas de alto contenido en silicio y materiales amorfos. Todo lo cual ha hecho surgir expectativas completamente nuevas en el dominio de la chapa magnética no-orientada.

2. FUNDAMENTOS FISICO-METALURGICOS.

Sabido es, que la presencia de impurezas en solución sólida, tales como C, O, N, S, da lugar a importantes tensiones locales e irregularidades en la red cristalina que

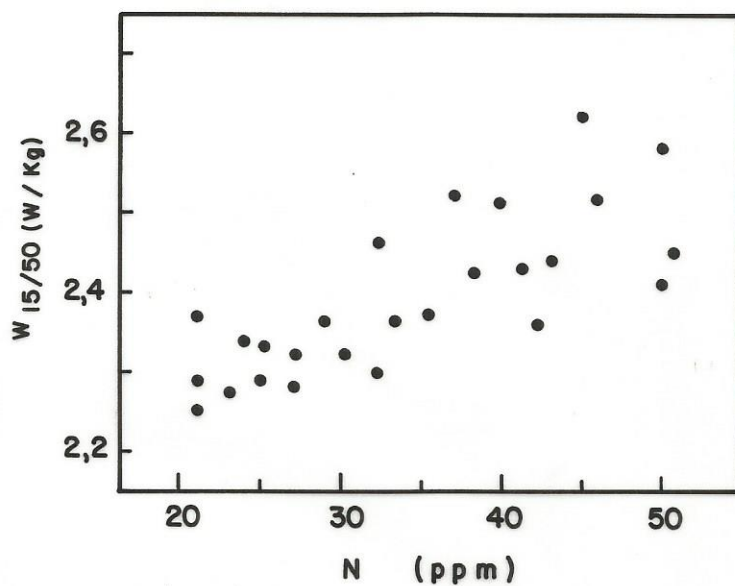
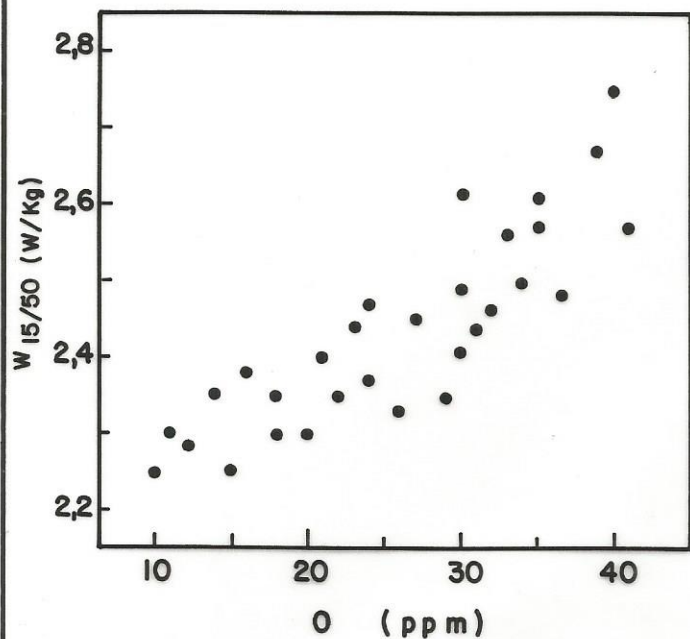
perturban el movimiento de la pared de Bloch (2), dificultando la conmutación magnética e incrementando la cifra de pérdidas por histéresis (3) (4) (5). Asimismo, la presencia de dichas impurezas lleva consigo una dilución magnética del material con la consiguiente disminución en el valor de la magnetización a saturación y permeabilidad a causa de la desimanación local.

En la Figura Nº 1 (A) y (B) puede verse la influencia que dichas impurezas ejercen en los valores de la cifra de pérdidas y campo coercitivo respectivamente.

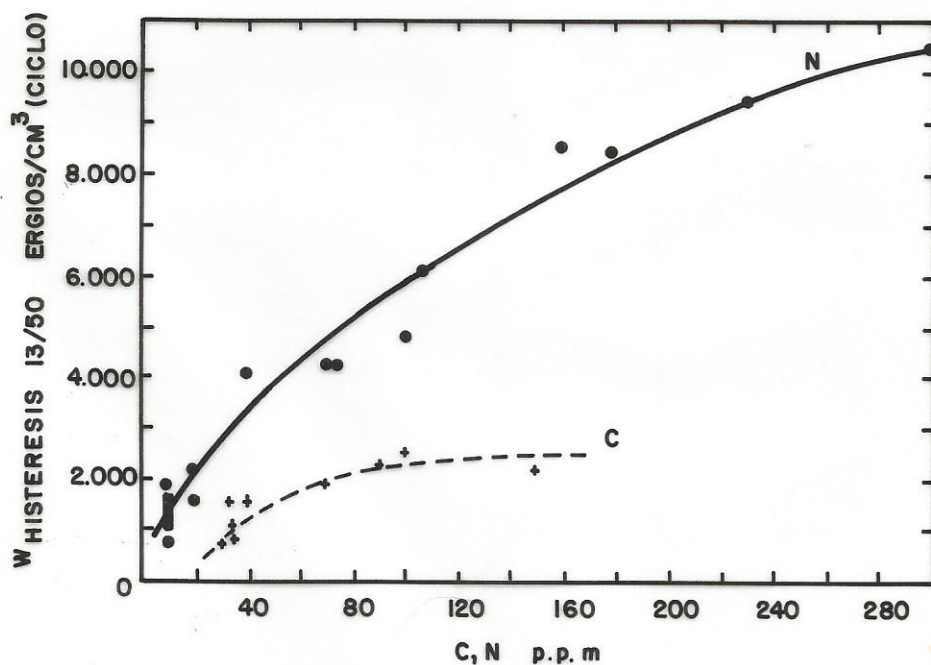
A la vista de estos resultados, es de hacer notar la superior incidencia del nitrógeno en las propiedades magnéticas, debiendo señalarse que la cifra de pérdidas totales puede ser reducida en un 10-15% rebajando los contenidos de nitrógeno desde 50 a 20 p.p.m.

Debe mencionarse asimismo que la mayor o menor incidencia de estas impurezas no sólo hace referencia a su aspecto cuantitativo, sino que está estrechamente relacionada con la morfología y distribución de sus precipitados (6).

Por todo ello, la eliminación de estas impurezas mediante las modernas técnicas de degasificación al vacío en acería (7) (8), hasta los niveles señalados en la Tabla I, permite, además de minimizar los efectos negativos que sobre las propiedades magnéticas ejercen dichas impurezas, optimizar los procesos siderúrgicos obteniendo asimismo nuevas calidades.

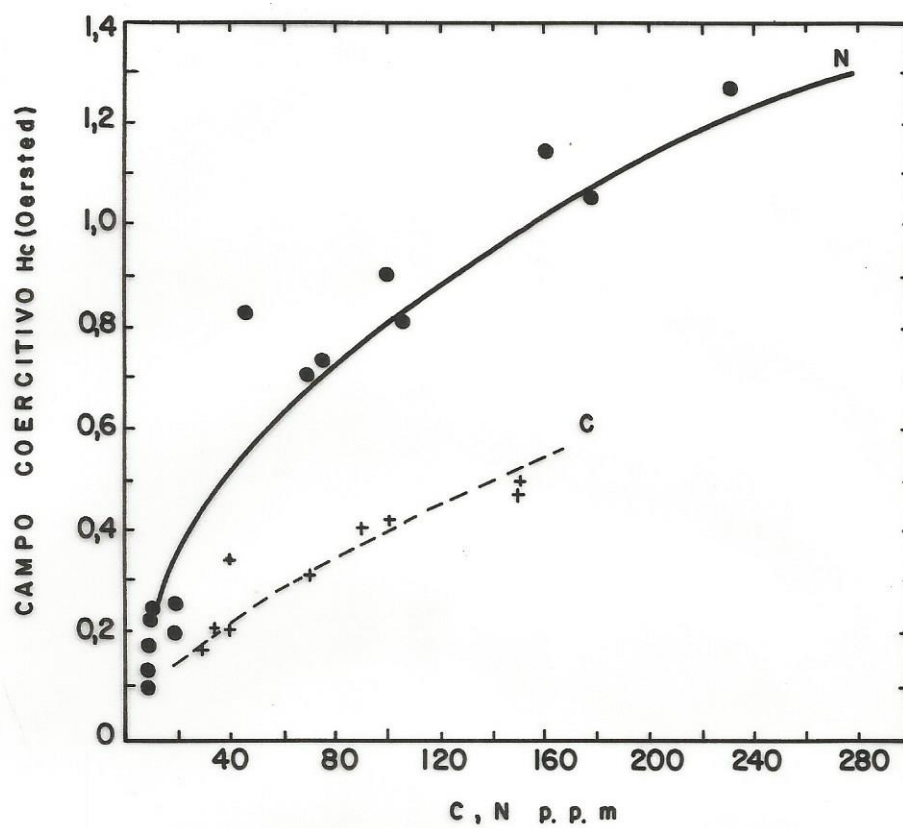


- Si : 3,1 % , Al : 0,39-0,61 % , S : 0,003 %



- Si : 2,83% , P: 0,012 % , Al : 0,003 %
S : 0,008% , O: 0,003 %.

Fig Nº 1.A : EFECTO DE LAS IMPUREZAS C, O, N EN LA
CIFRA DE PERDIDAS



-Si : 2,83% , P : 0,012% , Al : 0,003%

S : 0,008% , O : 0,003%

Fig Nº 1. B : EFECTO DE LAS IMPUREZAS C, N, EN EL VALOR DEL CAMPO COERCITIVO

TABLA I

Composición Química en Acería
después de los Procesos de Desgasificación
al Vacío y Desulfuración del Material

C	:	0,01 - 0,02%
Si	:	0,70 - 2,50%
Al	:	0,4 - 0,7% (*)
S	≤	0,005%
O	:	0,001-0,003%
N	≤	0,003%

(*) Sólo en los grados más altos.

3. RESULTADOS OBTENIDOS MEDIANTE LA APLICACION DE ESTA TECNICA. NUEVAS CALIDADES OBTENIDAS.

3.1. Chapa de Acero Dulce al Carbono Decarburada para Aplicaciones Eléctricas.

Este tipo de materiales, chapa de acero dulce al carbono decarburada para aplicaciones eléctricas, es aún en la actualidad ampliamente utilizado a nivel mundial en la fabricación de núcleos de motores pequeños (1-50 h.p.) y fraccionarios (< 1 h.p.), pudiendo señalarse, a modo de ejemplo, que representó el 50% del volumen total de chapa producida con destino a aplicaciones eléctricas en los Estados Unidos en el período 1976-1979.

En la Figura Nº 2 se muestran los esquemas de los procesos siderúrgicos empleados en la fabricación de chapa de acero dulce decarburada para aplicaciones eléctricas.

Tradicionalmente, en este tipo de materiales, la decarburación del mismo se lleva a cabo en la etapa de recocido decarburante, donde se produce simultáneamente la recristalización y decarburación del material, empleándose a tal fin las instalaciones de recocido decarburante en continuo o bien las de bobina abierta (recocido open-coil).

En el caso de los aceros dulces al carbono para aplicaciones eléctricas, contrariamente a lo que sucede con la chapa magnética al silicio, especialmente en los contenidos medio y alto, no se hace aconsejable el empleo del recocido decarburante en continuo, ya que en este caso la decarburación a temperaturas inferiores a A_1 nos conduce a velocidades de decarburación lentas y por ende a productividades bajas. Por otra parte, la decarburación a temperaturas superiores a A_1 nos conduce a un proceso de difusión del carbono

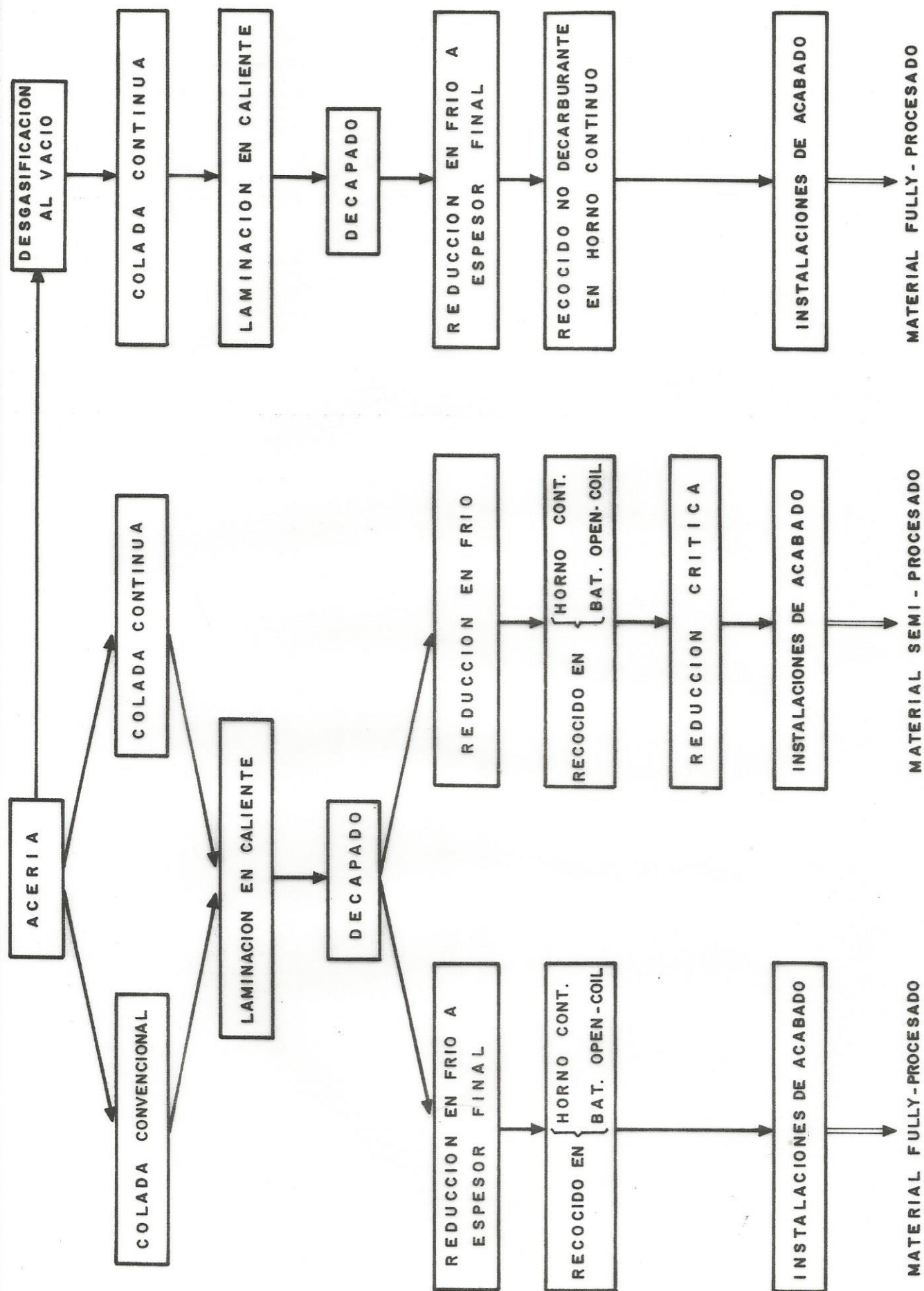


Fig N°2: ESQUEMAS DE LOS PROCESOS SIDERURGICOS EMPLEADOS EN LA FABRICACION DE CHAPA DE ACERO DULCE DECARBURADA PARA APLICACIONES ELECTRICAS

en un medio bifásico ($\alpha + \gamma$), disminuyendo el coeficiente de difusión del carbono y produciéndose simultáneamente una estructura de grano columnar (9) (10) origen de malas características magnéticas (Figura Nº 3).

Por otra parte, el recocido decarburante en bobina abierta (11) (12) evita esta estructura columnar de grano, aunque conlleva el empleo de ciclos de recocido muy largos con la consiguiente falta de productividad.

Todos estos inconvenientes pueden obviarse mediante la modificación al proceso siderúrgico convencional que incorpora la desgasificación al vacío en acería (13), alcanzándose niveles de carbono comprendidos en el rango $0,002 < C < 0,02\%$, siendo posible en estas condiciones suministrar al material un recocido final no decarburante en continuo (760° – 815°C , 2 minutos, H.N.X.) de alta productividad.

En la Tabla II se muestran las características magnéticas y mecánicas medias de los materiales así obtenidos comparándolos a los procesados mediante procedimiento convencional.

3.2. Chapa Magnética de Grano No-Orientado.

En la Figura Nº 4, se muestran los esquemas convencionales así como el esquema del proceso siderúrgico más reciente para la fabricación de los grados medio (1,00–2,25% Si) y alto ($> 2,25\%$ Si) de la chapa magnética de grano no-orientado, que incluye la eliminación de las impurezas en acería mediante las etapas de desgasificación al vacío y desulfuración del material hasta los niveles señalados en la Tabla I.

La introducción de estas técnicas en el proceso de fa-

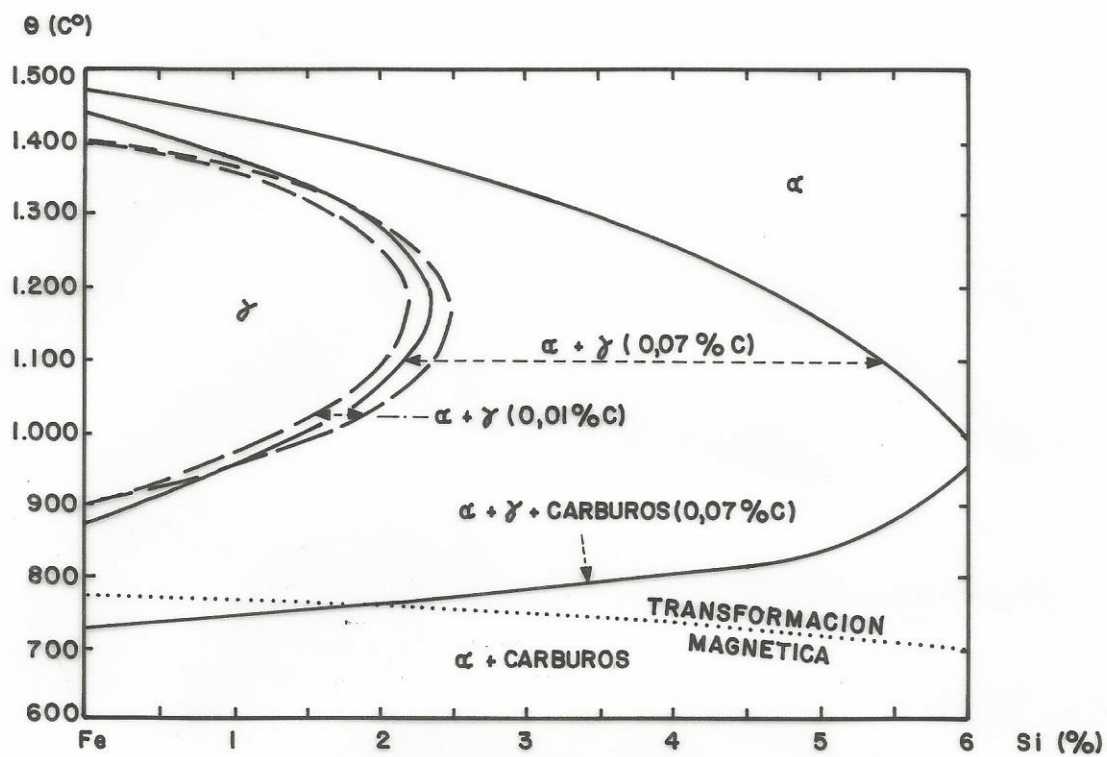


Fig. Nº 3 : DIAGRAMA Fe - C - Si

T A B L A N° II

CARACTERISTICAS MAGNETICAS Y MECANICAS DE LA CHAPA DE ACERO DULCE DECARBURADA PARA APLICACIONES ELECTRICAS.-

TIPO DE MATERIAL	e m.m.	CARACTERISTICAS MAGNETICAS			CARACTERISTICAS MECANICAS		
		10000 W50	15000 W50	15000 Gauss/Oe	R Kgr/mm ²	E Kgr/mm ²	A% ISO 80x 20
FULLY-PROCESADO (*)	0'5	3'2	6'9	2.900	29-31	18-20	35-36
" (***)	"	3'7	8'7	2.700	30-33	18-24	32-37
" (***)	"	4'7	10'1	1.800	42-47	40-45	6-9
" (*****)							
DESGASTIFICADO AL VACIO	0'65	-	10'4	1.560	-	-	-
SEMI-PROCESADO	0'5	2'8	6'4	3.300	A VOLUNTAD DEL COMPRADOR		

(*) Recocido Final a 780° C, Atm. H.N.X., 12 Horas

(~~***~~) " " 580° C, " " , "

(~~***~~) Recocido de recrist.

parcial " 450° C, " " , "

(~~***~~) Recocido Final en
continuo no decarburado 760°-815° C, Atm. H.N.X., 2 Minutos

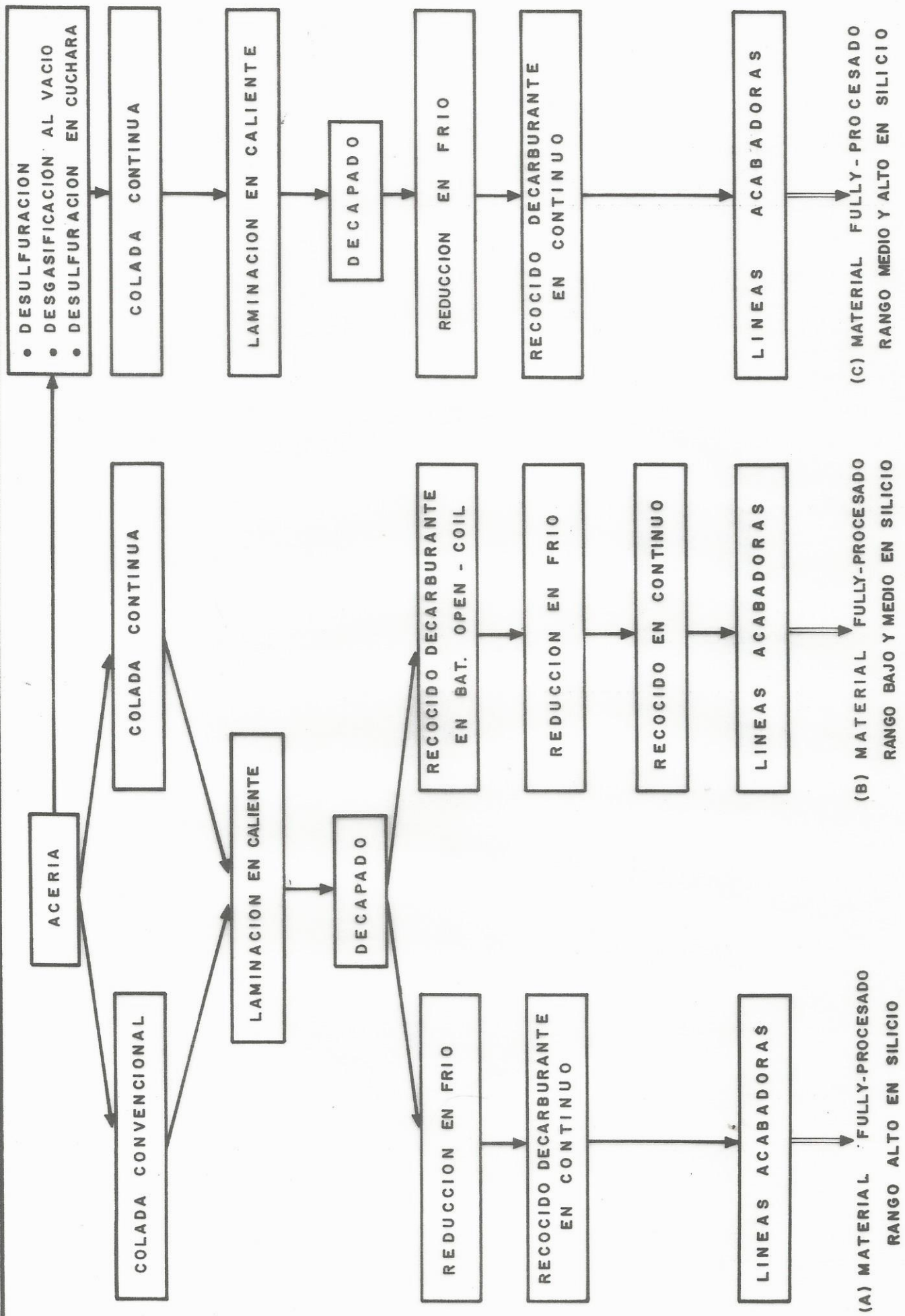


Fig. Nº4 : ESQUEMA DE LOS PROCESOS SIDERURGICOS EMPLEADOS EN LA FABRICACION DE CHAPA MAGNETICA DE GRANO NO-ORIENTADO

bricación de estos materiales, además de minimizar los efectos negativos que sobre las propiedades magnéticas ejercen estas impurezas, permite:

- Mejorar el rendimiento de las ferroaleaciones en cuchara.
- Evita, al igual que en el caso de la chapa de acero dulce al carbono, el desarrollo, para contenidos medios y bajos en silicio, de una estructura de grano columnar durante el proceso de recocido en continuo posibilitando al mismo tiempo un aumento en la productividad de la línea.
- Como consecuencia del menor grado de decarburación requerido durante el proceso decarburante en continuo, se hace posible eliminar parcialmente la subcapa de óxidos generada en la interfase gas-metal en el transcurso del mencionado proceso (14) (15), dando como resultado una disminución en la cifra de pérdidas por histéresis.
- Se hace posible asimismo promover el adecuado crecimiento de grano (A.S.T.M. 3-5) mediante la anulación del mecanismo que inhibe el crecimiento del mismo, estando ligado esto último a la presencia de precipitados de nitruro de aluminio y oxisulfuro de manganeso, señalándose en los trabajos de K.M. Browne (6) e I. Goto et al (17) la dependencia del tamaño, morfología y distribución de dichos precipitados con la temperatura de recalentamiento del slab y contenidos de S, Mn, O y N.

3.3. Chapa Magnética de Grano No-Orientado con Textura.

Muy recientemente se han desarrollado a nivel industrial chapas magnéticas de grano no-orientado con textura, para la inducción de la cual se hace necesario rebajar los contenidos de impurezas en acería hasta niveles muy bajos, posibilitándose de esta forma el alcanzar valores en las características magnéticas superiores a cualesquiera de las calidades existentes hasta fechas recientes en el mercado. Todo lo cual hace que estos materiales constituyan una auténtica innovación tecnológica.

- Calidad Fully-Procesada. Rango Alto en Silicio.

En la Figura Nº 5 se muestra un esquema resumen del proceso siderúrgico (18) (19) que posibilita el desarrollo de las texturas cubo orientadas al azar favorables $\{100\}$ $\langle u_1 v_1 w_1 \rangle$, $\{110\}$ $\langle u_2 v_2 w_2 \rangle$ e impide parcialmente el crecimiento de las desfavorables $\{111\}$ $\langle u_3 v_3 w_3 \rangle$, $\{211\}$ $\langle u_4 v_4 w_4 \rangle$.

Asimismo en dicha Figura se exponen las características magnéticas correspondientes a estos aceros, siendo las mismas superiores a las requeridas para los grados M.15 de la especificación norteamericana A.I.S.I. o S.09 de la japonesa J.I.S., lo cual les convierte en los aceros de mejores características mundiales dentro de la chapa magnética de grano no-orientado.

- Calidad Semi-Procesada. Rango Medio en Silicio.

Otro tipo de chapa magnética no-orientada, muy adecuada para su uso en máquinas rotativas, es la obtenida en la calidad semi-procesada y rango medio en silicio mediante la

CARACTERISTICAS MAGNETICAS
(Ref. N° 46)

COMP. QUIMICA EN ACERIA (%)	c (mm.)	50 Hz W watt/Kgr.		IND. MAGNET. (T)			
		10.000	15.000	B ₁₀	B ₂₅	B ₅₀	B ₁₀₀
C : 0,01 - 0,02 (*)							
Si : 3,10 - 3,20							
Mn : 0,18 - 0,21	0,35	0,89	2,10	1,49	1,59	1,69	1,80
Al : 0,40 - 0,60 δ 1,10							
S : 0,002 - 0,003	0,50	1,10	2,45	1,49	1,60	1,70	1,81
N : 0,0022 - 0,0025							
O : 0,0014 - 0,0017							

(*) EL CONTENIDO DE CARBONO FINAL DESPUES
DE DECARBURADO ES : 0,003 - 0,005 %

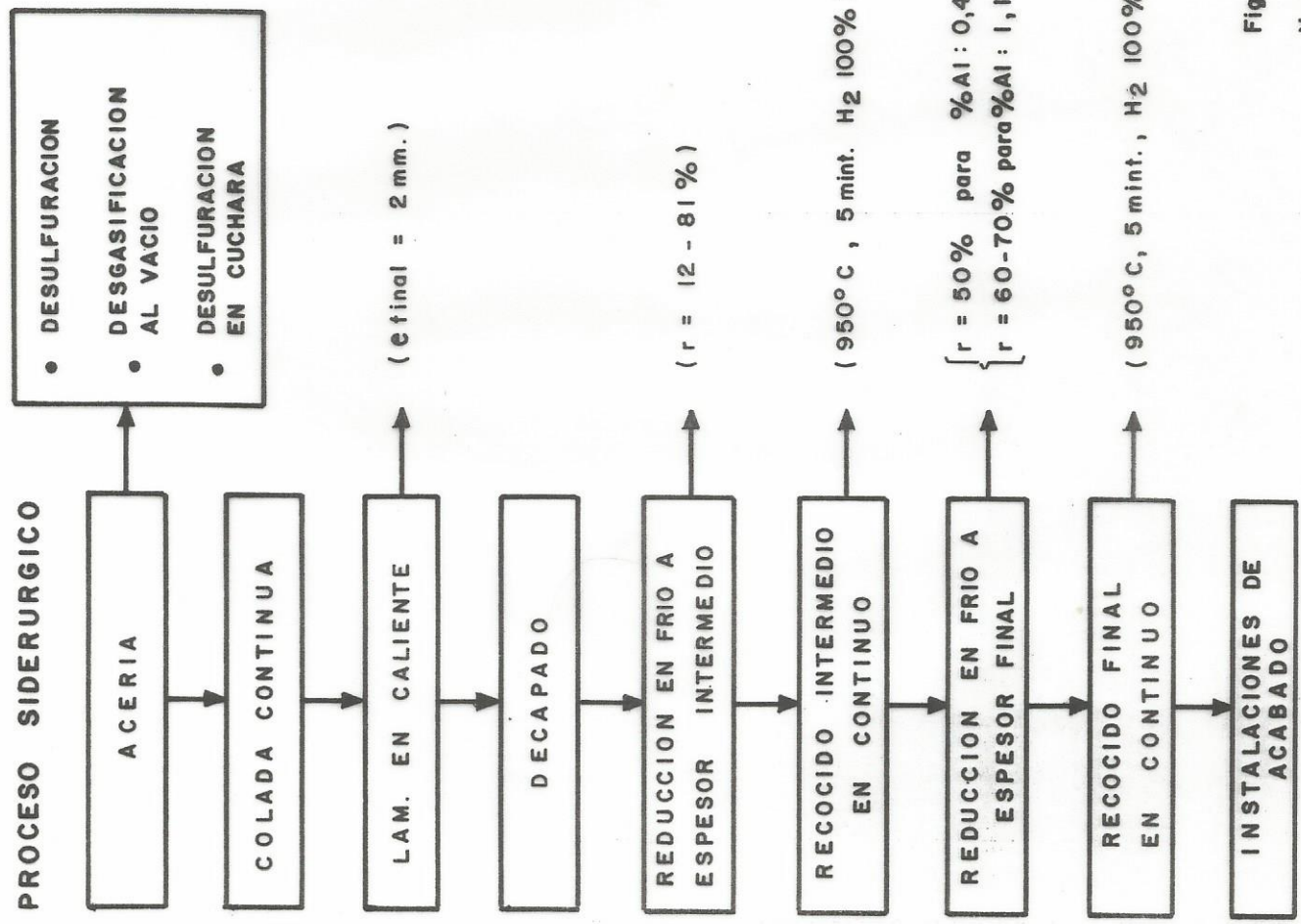


Fig. N° 5: ESQUEMA DEL PROCESO SIDERURGICO
Y CARACTERISTICAS MAGNETICAS OBTENIDAS EN
CHAPA MAGNETICA NO-ORIENTADA CON TEXTURA
Y ALTO CONTENIDO EN SILICIO, FULLY-PROCESADA

inducción de la textura apropiada.

Sabido es, que cuando una banda en caliente de este material es procesada en frío y recocida se produce la recristalización del mismo, dando lugar al desarrollo de una componente final de textura $\{111\} \langle 211 \rangle$ muy acusada y origen de malas características magnéticas que se nuclea en las subjuntas de grano originarias de la laminación en caliente.

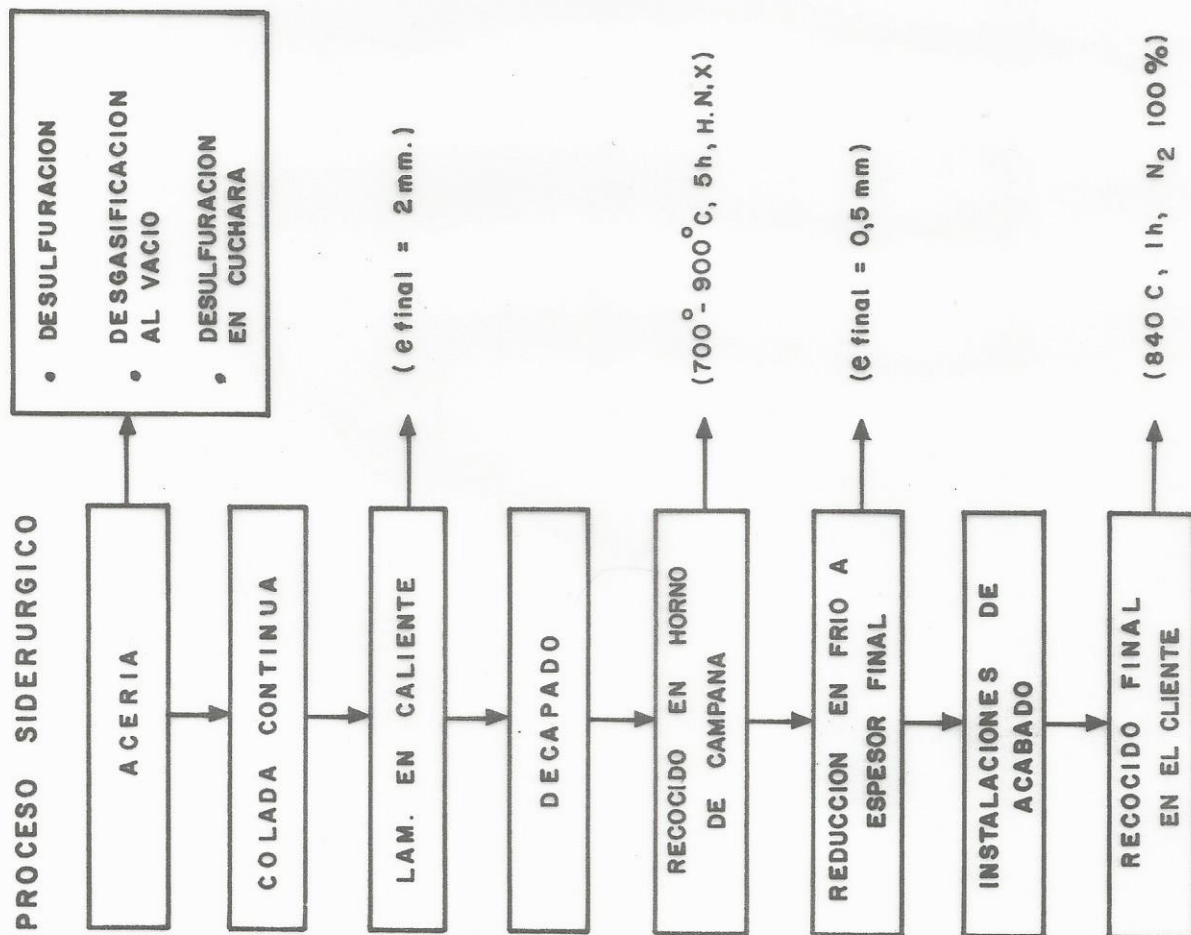
Pues bien, el desarrollo de esta textura no deseable puede evitarse suministrando al material laminado en caliente un recocido en horno de campana previo a la laminación en frío, reforzándose el efecto de eliminación de dicha textura mediante la adición de pequeñas cantidades de Sb (0,04-0,08%) (20).

Por otra parte, y dado que las impurezas actúan en el mismo sentido que las subjuntas de grano, nucleando la textura $\{111\} \langle 211 \rangle$, es necesario obtener el material lo más exento posible de impurezas al objeto de optimizar la textura tipo $\{100\} \langle u v w \rangle$.

En la Figura Nº 6 se muestra un esquema del proceso siderúrgico desarrollado para la obtención de estos materiales, así como las características magnéticas obtenidas.

A la vista de estos resultados, es posible afirmar que este tipo de material presenta unas características magnéticas superiores al grado M.27 de la especificación norteamericana A.I.S.I. para la calidad semi-procesada. Especial atención merece el alto valor de su permeabilidad a inducciones elevadas, lo que le convierte en un material muy adecuado para su empleo en una extensa gama de motores (> 50 h.p.) con elevado rendimiento.

PROCESO SIDERURGICO



CARACTERISTICAS MAGNETICAS (Ref. Nº 46)

COMP. QUIMICA EN ACERIA (%)	Sb. (%)	e (mm.)	W 15.000 50 Watt/Kgr.	B50 (T)	15000 μp 50 Gauss/oe
C: 0,01 - 0,02					
Si: 1,80 - 1,90	0,01	0,5	3,00	1,72	2.740
Mn: 0,20 - 0,23					
Al: 0,29 - 0,32	0,04	0,5	2,59	1,74	3.778
S: 0,005 - 0,006					
N < 0,0030					
O < 0,0030	0,08	0,5	2,81	1,75	3.850

Fig. Nº 6: ESQUEMA DEL PROCESO SIDERURGICO
Y CARACTERISTICAS MAGNETICAS OBTENIDAS EN
CHAPA MAGNETICA NO-ORIENTADA CON TEXTURA
Y MEDIO CONTENIDO EN SILICIO, SEMI-PROCESADA

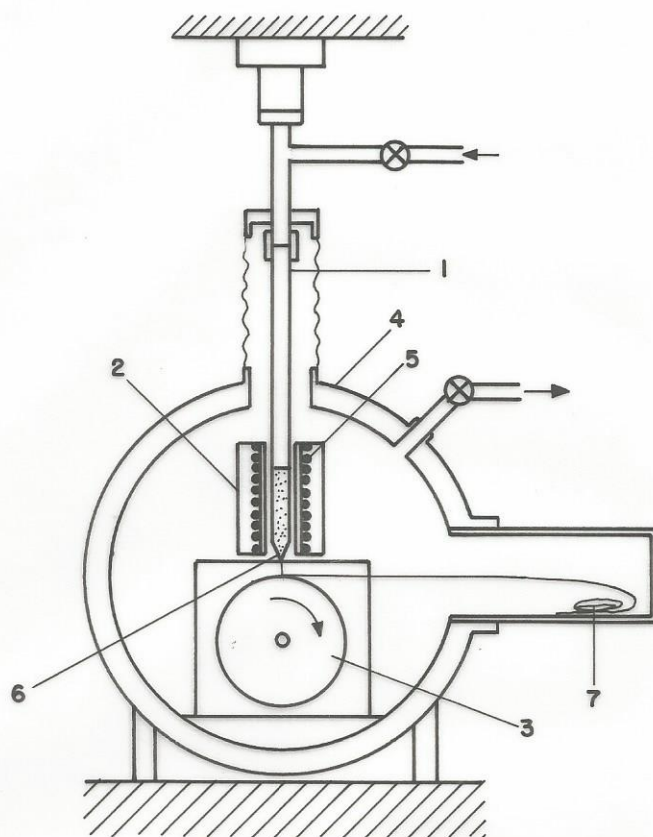
3.4. Nuevos Materiales.

El avance más destacable durante la pasada década, a nivel de laboratorio, ha sido la obtención y desarrollo de una serie de nuevos materiales; bandas cristalinas de alto contenido en silicio (6-6,5% Si) y materiales amorfos, obtenidos directamente desde el estado fundido mediante técnicas especiales (21).

Estas técnicas consisten en la proyección directa del metal fundido sobre un disco giratorio a altas revoluciones, debiendo efectuarse la operación en vacío ($p < 10^{-8}$ Torr.) (Figura Nº 7).

En el caso de las bandas de alto contenido en silicio, posteriormente, y al objeto de mejorar las características magnéticas del material, se somete éste a un recocido al vacío a temperaturas comprendidas en el intervalo 1100-1200°C (0,5-5 horas), obteniéndose como resultado una recristalización terciaria acompañada de un crecimiento en el tamaño de grano y desarrollo de la textura $\{100\} \langle 0 \text{ u } v \rangle$, lo cual confiere al material una alta isotropía plana en lo que a características magnéticas se refiere.

Este material recocido en vacío a altas temperaturas presenta unas características magnéticas superiores al mejor grado de la chapa magnética no-orientada, e incluso cifra de pérdidas inferiores a la calidad orientada (3% Si), añadiéndose la ventaja adicional de poseer estas propiedades de forma isótropa en el plano de la chapa, lo cual convierte a este material en especialmente adecuado para su empleo en máquinas rotativas. Estando por ello plenamente justificados los actuales esfuerzos en orden a la fabricación de este material en anchos adecuados a las aplicaciones a que van destinados.



- 1). TUBO RECIPIENTE
- 2). HORNO DE FUSION
- 3). DISCO GIRATORIO
- 4). CAMARA DE VACIO
- 5). ALEACION FUNDIDA
- 6). ORIFICIO DE PROYECCION
- 7). CINTA SOLIDIFICADA

Fig N° 7 : EQUIPO PARA LA FABRICACION DE LOS NUEVOS MATERIALES

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. F.E. Werner. "Electrical Steels: 1970-1990". ENERGY EFFICIENT ELECTRICAL STEELS. PROCEEDINGS OF A SYMPOSIUM AT THE T.S.M.-A.I.M.E. FALL MEETING OF THE METALLURGICAL SOCIETY OF A.I.M.E. PITTSBURGH, PENNSYLVANIA, OCTOBER 5-9, 1980, pp. 1-33.
2. K.H. Stewart. "Ferromagnetic Domains". CAMBRIDGE MONOGRAPHS ON PHYSICS. UNIVERSITY PRESS 1954. CHAPTER VI, pp. 108-143.
3. R.M. Bozorth. "Ferromagnetism". D.V. NOSTRAND COMPANY INC. LONDON 1951, pp. 37.
4. D.A. Leak, G.H. Leak. "The Influence of Impurities on the Magnetic Properties of High-Purity 3% Silicon Iron". J. IRON AND STEEL INST. (LONDON), VOL. 187, NOV. 1957, pp. 190-194.
5. H. Shimanaka, Y. Ito, T. Irie, K. Matsumura, H. Nakamura, Y. Shono. "Non-Oriented Si-Steels Useful for Energy Efficient Electrical Apparatus". ENERGY EFFICIENT ELECTRICAL STEELS. PROCEEDINGS OF A SYMPOSIUM AT THE T.S.M.-A.I.M.E. FALL MEETING OF THE METALLURGICAL SOCIETY OF A.I.M.E. PITTSBURGH, PENNSYLVANIA, OCTOBER 5-9, 1980, pp. 193-204.
6. A. Coombs. "A Review of Electrical Steels". STEEL TIMES MAY 1980, pp. 311-321.
7. T.W. Smythe. "Electrical Steels Produced by Vacuum Degassing and Continuous Casting". B.H.P. TECH. BULL. NOV. 1981, 25 (2), pp. 25-30.
8. H.D. Pflipsen, R.A. Weber. "The Operation of Vacuum Degassing Plant in the Bruckhausen and Ruhrort Oxygen Steelworks of Thyssen A.G.". STHAL EISEN 27 JULY 1978, 98, (15), pp. 747-753.

9. P.J. Adzema, D.J. Knight. "Columnar Grain Growth in Low Carbon Steel". TRANS A.S.M., VOL. 56, 1963, pp. 576-582.
10. K.M. Gorman. "Formation of Columnar Grains by Decarburization". INTER-OFFICE CORRESPONDENCE OF BETHLEHEM STEEL, 19 JAN. 1981.
11. I. Ibarrodo. "Contribuciones a la Optimización del Procedimiento Open-Coil". TESIS DOCTORAL, ESCUELA TECNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES DE BILBAO, UNIVERSIDAD DEL PAIS VASCO, MAYO 1980.
12. I. Ibarrodo. "Contribuciones a la Optimización del Procedimiento Open-Coil". V ASAMBLEA GENERAL DEL CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES METALURGICAS. TOMO II (T-74), OCTUBRE 1981, MADRID. REVISTA DYNA Nº 11, NOV. 1982, pp. 25-29.
13. D.A. Chatfield, J.F. Rzepka, A.C. Preble. OFF. GAZ., 17 FEB. 1981, PATENT U.S. 4251294, 22 AUG. 1978.
14. G.P. Huffman and E.B. Stanley. "Effect of Solute Oxidation on the Magnetic Properties of Non-Oriented Electrical Sheet Steel". J. APPL. PHYS. MARCH 1979, 50, (3-11), pp. 2363-2365
15. A.L. Geiger. "Effect of Internal Oxidation and Nitridation on the Magnetic Properties of Non-Oriented Electrical Steels". J. APPL. PHYS. MARCH 1979, 50, (3-11), pp. 2365-2368.
16. K.M. Browne. "The Effect of Sulphur on the Magnetic Properties of Silicon Steel". METALS 77, THE 30th ANNUAL CONFERENCE ON THE AUSTRALASIAN INSTITUTE OF METALS 1977, pp. 3A.7-3A.8.
17. I. Goto, H. Shimanaka, T. Irie, K. Matsumura, H. Nakamura, Y. Shono. "Development of Non-Oriented Electrical Steel

R.M-8 with High Magnetic Induction and Low Core Loss". PAPER PRESENTED AT S.M.M.M., BRATISLAVA CZECHOSLOVAKIA, SEPT. 1977

18. T. Irie, K. Matsumura, H. Nakamura, Y. Shono. "Development of a New Non-Oriented Silicon Steel with High Permeability and Lower Core Loss". KAWASAKI STEEL TECH. REP., VOL. 10, (1), pp. 15-22.
19. Ref. № 5, pp. 193-204.
20. H. Shimanaka, T. Irie, K. Matsumura, H. Nakamura. "A New Non-Oriented Si-Steel with Texture of $\{100\} \langle uvw \rangle$ ". J. MAGN. MAGN. MAT., 19, 1980, pp. 63-64.
21. N. Tsuya, K.I. Arai. "Rapidly Quenched Ribbon-Form Silicon and Silicon-Iron". JPN. J. APPL. PHYS., VOL. 18, 1979, № 1, pp. 207-208.