

04.83.05

CNEA-NT 3/83.

PMTM/I-6

REPUBLICA ARGENTINA
COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA
Dependiente de la Presidencia de la Nación

ENDURECIMIENTO POR TRABAJO DE
ACEROS INOXIDABLES AUSTENITICOS

Perla ALVAREZ y Alfredo M. HEY

Buenos Aires
1983

ENDURECIMIENTO POR TRABAJADO DE ACEROS INOXIDABLES AUSTENITICOS

Perla ALVAREZ⁽¹⁾

y

Alfredo M. HEY⁽²⁾

R E S U M E N

El endurecimiento por trabajado de varios aceros inoxidables austeníticos se ha analizado utilizando métodos masivos de deformación, como laminación y se ha comparado con el endurecimiento superficial introducido por procesos de maquinado. Se analizó la influencia de distintas variables de deformación, inclusive temperatura, así como los tratamientos térmicos para eliminación del daño. Se cuantificó el efecto a través de ensayos metalográficos, mecánicos y no destructivos (respuesta magnética). Se hacen consideraciones sobre la influencia del daño superficial en la aparición de fallas en componentes maquinados.

(1) Investigadora
Dto. Materiales - CNEA

(2) Jefe Div. Trat. Termomecánicos
Dto. Materiales - CNEA
ARGENTINA

WORK HARDENING OF AUSTENITIC
STAINLESS STEELS

Perla ALVAREZ and Alfredo M. HEY

ABSTRACT

The work hardening of several austenitic stainless steels was analyzed using methods for massive deformation, (rolling) and was compared with the surface hardening introduced. The influence of deformation variables, including temperature was considered, as well as the thermal treatments required to eliminate the damage. The effect was quantified by metallographic, mechanical and non destructive (magnetic response) testing. Comments are made about the influence of surface damage on the failure of machined components.

1. INTRODUCCION:

Los Aceros Inoxidables Austeníticos presentan un apreciable grado de endurecimiento por deformación. Esta característica es afectada por la relativa estabilidad estructural del material, es decir, por su mayor o menor tendencia a generar estructuras de tipo martensítico en función de su composición, temperatura y cantidad de deformación, etc. Las características de ductilidad son asimismo afectadas dando lugar a distintas respuestas a la fractura ante los diversos procesos de deformación.

Los procesos de trabajado con arranque de viruta dejan una secuela de deformación superficial que depende del tipo de proceso y de su modo de realización. Esta capa deformada, además de afectar la resistencia a la corrosión o a la fragilización por hidrógeno, puede también afectar el comportamiento mecánico del material. En efecto, la presencia del material endurecido y de ductilidad disminuída puede dar lugar a la formación de fisuras superficiales pasibles de propagarse por otros mecanismos, tales como fatiga, dando lugar a la falla del componente. Esto puede ocasionar situaciones de riesgo en sistemas de recipientes y tuberías de presión en instalaciones químicas, petroquímicas, nucleares, etc.

No existe uniformidad de criterios en cuanto a los tipos de aceros más convenientes y es así que en tanto en Europa se favorecen los aceros con carbono estabilizado con elementos como Nb, Ti, etc., en América se prefiere el uso de aceros no estabilizados con contenidos relativamente más bajos de carbono.

Resulta así de interés establecer las características de comportamiento de los aceros comunes ante distintos procesos de deformación, particularmente de deformación superficial, las consecuencias que los mismos tienen sobre la estructura y propiedades del material, los posibles métodos para detectar, de manera no destructiva, la magnitud del daño introducido y la posibilidad de eliminarlo a través de tratamientos térmicos adecuados.

En el presente trabajo se analizan las características de deformación de tres de los aceros inoxidables austeníticos más comunes, así como su respuesta a tratamientos de restauración. Se determina la alteración estructural a través de métodos destructivos y se evalúa la posibilidad de hacerlo a través de métodos no destructivos. Se comparan con los resultados obtenidos en trabajado superficial a través de procesos de distinta naturaleza y severidad.

2. METODO EXPERIMENTAL:

Los ensayos se realizaron sobre aceros comerciales tipo 347, 304 y 316 obtenidos en chapas de distintos espesores y cuyas composiciones se muestran en la Tabla I. Con el fin de uniformar las estructuras iniciales, las muestras se sometieron a un recocido de 1 hora a 1050 °C de temperatura en horno de vacío con enfriamiento al aire.

Las deformaciones por laminación se efectuaron en una laminadora STANAT con cilindros de 120 mm de diámetro y a una velocidad de 27 RPM.

Las deformaciones superficiales se introdujeron por cepillado a baja velocidad utilizando herramientas con distintos ángulos de corte. Se efectuaron también ensayos de rectificado y torneado.

La dureza se midió con durómetro VICKERS y la microdureza con microdurómetro LEITZ.

Las mediciones de respuesta magnética se realizaron utilizando equipos industriales de ensayos no destructivos (corrientes inducidas) y de medición de ferrita delta.

TABLA I

	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	Nb
347	0,05	1,48	0,44	9,88	17,52	0,36	0,044
304	0,07	1,17	0,43	9,86	18,46	0,6	0,015
316	0,05	1,04	0,60	11,48	16,16	2,08	0,015

3. RESULTADOS:

Laminación: Las probetas previamente recocidas fueron laminadas en pasadas sucesivas hasta reducciones máximas de 30%. La temperatura de la laminación se controló sumergiendo las probetas entre pasadas en baños termostatzados a temperaturas entre -70 y +90 °C.

La figura 1 muestra los valores de dureza obtenidos en probetas de los tres aceros en estudio, laminados en esas condiciones.

El grado de transformación inducida por deformación a estructuras martensíticas se evaluó a través de la resuesta magnética utilizando un equipo de corrientes inducidas (AUTONATION INDUSTRIES - MODELO MULTISTEST EM 3300) normalmente usados en ensayos no destructivos y un equipo (Inst Dr. FORSTER MOD 1053) para detección de ferrita delta en soldaduras. Los resultados obtenidos fueron similares por ambos métodos; por su mejor cuantificación se muestran los resultados obtenidos con deltímetro.

La figura 2 muestra el porcentaje de resuesta magnética, en unidades arbitrarias referidas a una estructura totalmente ferrítica, en relación con la cantidad de deformación por laminación para distintas temperaturas de laminación; en tanto la figura 3 muestra los mismos resultados expresados como resuesta magnética en función de temperatura de deformación para distintas deformaciones.

A partir de estructuras iniciales como la de la figura 4 se obtienen, para el acero tipo 347 a distintas deformaciones, estructuras como las de la figura 5.

Restauración: La figura 6 muestra las estructuras obtenidas por tratamientos térmicos de 1 hora a distintas temperaturas. La figura 7 muestra la evolución de la dureza y de la resuesta magnética en función de la temperatura de tratamiento para los diversos aceros.

Deformación Superficial: Con el fin de evaluar las características del daño introducido por maquinado con arranque de viruta se realizaron ensayos sobre probetas recocidas de acero Tipo 347 de 13 mm de ancho. Se removi6 por cepillado una sección en forma de cuña con pasadas de profundidad crecientes utilizándose herramientas con ángulos de ataque positivo, neutro y negativo, según se muestra esquemáticamente en la figura 8. La figura 9 muestra los perfiles de microdureza obtenidos sobre cortes transversales en probetas maquinadas para los distintos tipos de herramientas, la figura 10 muestra la variación de la profundidad del daño producido por las distintas herramientas en función de la profundidad de corte, y la figura 11 muestra la variación de dureza superficial en función de las mismas variables.

Las estructuras que se observan a distintas profundidades en probetas maquinadas se muestran en la figura 12.

4. DISCUSION:

Los factores metalúrgicos que inciden sobre las características de endurecimiento por trabajo de los aceros inoxidables austeníticos son ampliamente conocidos y han sido revisados recientemente (1). De especial relevancia se consideran la energía de fallas de apilamiento y, particularmente, la mayor o menor tendencia a generar estructuras de tipo martensítico como ϵ o α' . Esta tendencia está determinada por la composición química del material y puede definirse por la temperatura M_s , cuando la transformación se induce térmicamente. La formación de martensita inducida por deformación, suele evaluarse a través de la temperatura $M_d 30$ que es la temperatura a la cual se forma 50% de martensita luego de una deformación verdadera de 0,30. Utilizando la expresión propuesta por Gladman y otros (2)

$$M_d 30 = 497 - 462 (\%C + \%N) - 9,2 (\%Si) - 8,1 (\%Mn) - 13,7 (\%Cr) - 20 (\%Ni) - 18,5 (\%Mo)$$

Se obtienen para los tipos de acero utilizados en el presente trabajo temperaturas del orden de la temperatura ambiente, siendo la correspondiente al 316 sensiblemente mas baja debido al mayor contenido de Ni y al agregado de Mo. Las tolerancias en la especificación de composición introducen una amplitud en los valores de $M_d 30$ del orden de los 150 °C. Según las composiciones de la tabla I se obtienen los siguientes valores para los aceros utilizados en este trabajo:

$$347 = +13^\circ\text{C}, 304 = -10^\circ\text{C}, 316 = -36^\circ\text{C}$$

Estos valores indicativos de la tendencia de los distintos aceros a formar martensita, se ven reflejados en la respuesta de los mismos a la deformación por laminación tanto en términos de dureza como la respuesta magnética. Así se observa que en tanto el acero 347 aumenta de dureza rápidamente aún a bajos valores de deformación (figura 1a), el 316 endurece en forma mucho más paulatina (fig. 1c), mientras que el 304 muestra un comportamiento intermedio entre ambos (fig. 1b). La incidencia del porcentaje de martensita sobre este comportamiento está mostrado en la figura 2, donde se observa la mayor cantidad de martensita generada en el 347 que en el 304 y, más aún, que en el 316 en iguales condiciones de deformación.

La influencia de la temperatura es particularmente relevante, en el entorno de la temperatura ambiente como se observa en las figuras 1, 2 y 13. Tanto la variación de dureza como de respuesta magnética son considerablemente más afectadas por la temperatura para el acero 347 que para el 316 con un comportamiento intermedio para el 304.

De manera similar la dureza y la respuesta magnética evolucionan durante los recocidos de restauración (fig. 7) y es de observar que la caída en respuesta magnética no es en todos los casos simultánea con la de dureza sino que puede precederla a temperaturas menores. Hasta tanto no se complete un estudio estructural más detallado, que se encuentra en marcha, no se intenta justificar este comportamiento particularmente en lo relativo a descomposición de martensita. En este sentido y teniendo en

cuenta que los equipos utilizados en la medición de respuesta magnética no han sido diseñados específicamente para este uso particular y que, en todo caso, los fenómenos involucrados son de compleja interpretación (3), los valores que se presentan deben considerarse relativos y solamente como indicativos de la presencia de estructuras no-austeníticas.

Los ensayos de trabajado superficial fueron realizados en el acero 347 que presenta una mayor respuesta a la deformación. Los valores de dureza medidos muestran que la deformación remanente en la capa subsuperficial alcanza valores sustanciales que pueden considerarse equivalentes a deformaciones por laminación de 20% o más. No habiéndose intentado por el momento un control estricto de la temperatura de la muestra durante el maquinado, una comparación precisa no es posible en virtud de la particular incidencia de la temperatura en el proceso de endurecimiento en este acero. Además de afectar los valores de dureza alcanzados, también la profundidad del daño estructural es drásticamente afectado por el tipo de corte que se realiza, tal como lo muestran las figuras 9, 10 y 11. Se observa así que en el caso de pasadas relativamente profundas con herramientas con ángulos de corte negativos es posible afectar el material hasta varias décimas de milímetro por debajo de la superficie. Es oportuno apuntar que en componentes industriales se han observado profundidades de daño superiores a un milímetro (1 mm)

La estructura metalográfica que se observa, fig. 12, es similar a las obtenidas por otros métodos de deformación, con excepción, especialmente en los casos de maquinados particularmente rústicos, de una pequeña capa superficial que puede presentar características de alta deformación y que está siendo analizada en más detalle. La misma es de naturaleza similar a la que se observa en superficies sometidas a desgaste por fricción. (4)

Las observaciones efectuadas hasta el presente y que están siendo ampliadas a través de otros ensayos en estas y otras composiciones permiten hacer algunas consideraciones de orden práctico, respecto a determinadas variables del proceso de maquinado. Así es notorio la incidencia que sobre la magnitud del daño, tanto en términos de profundidad como de dureza máxima, tiene el diseño de la herramienta siendo posible reducir considerablemente el daño a través de un diseño correcto.

Asímismo al decrecer el daño con la profundidad de corte es posible programar las secuencias finales de terminado utilizando, profundidades de corte decrecientes calculadas de manera tal de disminuir paulativamente la profundidad del daño, al tiempo que cada pasada elimina el daño introducido, por la pasada precedente.

Los apreciables incrementos de temperatura que se generan durante los procesos de maquinado pueden convertirse en un método para el control del endurecimiento, particularmente en los aceros menos estables y que presentan mayor tendencia a la formación de martensita. En estos casos podría ser con

traproducente el uso de líquidos refrigerantes.

Los métodos no destructivos son de escasa validez en la evaluación del daño. Así las mediciones de dureza superficial no dan idea de la profundidad del daño en tanto que la respuesta magnética indica el grado de transformación pero no el de endurecimiento.

La eliminación del daño a través de recocidos de recristalización, aparte del costo, es de aplicación problemática por las temperaturas relativamente altas que se requieren y que podrían provocar fragilización o sensitización.

De ello surge la importancia de programar y controlar cuidadosamente la secuencia final de pasadas en el maquinado de estos aceros.

5. CONCLUSIONES:

La elevada tendencia al endurecimiento por trabajado de los aceros inoxidables austeníticos ocasiona, durante los procesos de maquinado, la formación de una zona endurecida en la superficie.

La magnitud y profundidad del endurecimiento dependen de la composición del material, del tipo de herramienta, de la profundidad de corte y de la temperatura.

Los métodos no destructivos permiten evaluar el daño con limitaciones. La eliminación del daño requiere tratamientos a temperaturas superiores a los 500 °C.

6. AGRADECIMIENTOS:

Se agradece el apoyo brindado por el PMTM-OEA-CNEA y por las empresas FITZNER HNOS. S.A.I.C., Dálmine Siderca y C.B.M.M y la asistencia técnica de los Sres. O. CARPINETA y T. PERALTA.

- Referencias:

1. F.B. PICKERING THE METALLURGICAL EVOLUTION OF STAINLESS STEELS A.S.M. 1979.
2. T. GLADMAN, J. HAMMOND y F.W. MARSH, SHEET METAL INDUSTRIES. Mayo 1974, 51 (s) 219
3. S.S. HECKER, M.G. STOUT, K.P. STAUDHAMMER y J.L. SMITH. MET. TRANS. 13A Abril 1982, 619
4. K.L. HSU, T. MAHN, D.A. RIGNEY, Wear, 60 (1980), 13.

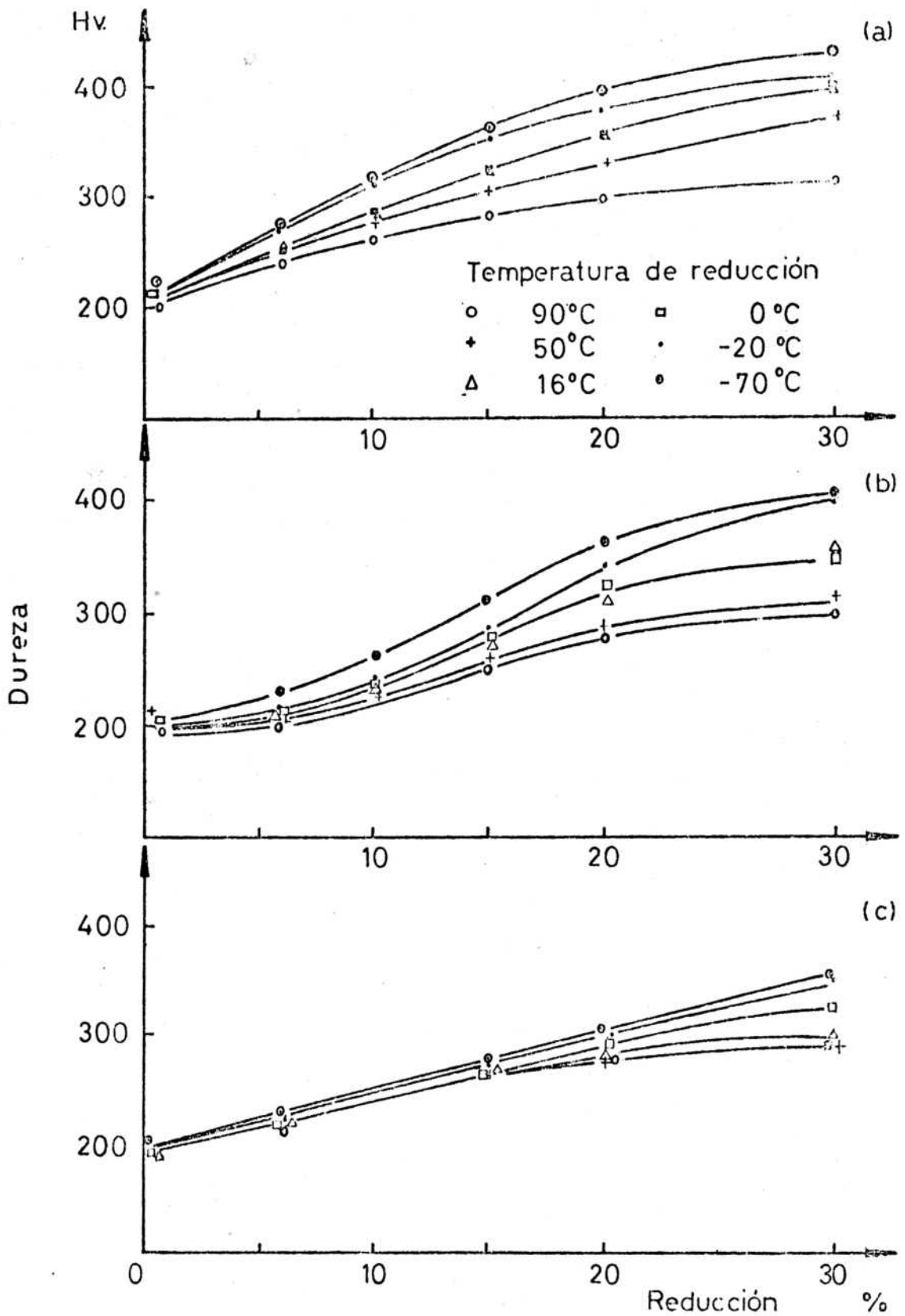


Fig:1 Dureza Vs. Porcentaje de reducción en laminación
a) Acero Tipo 347 b) Tipo 304 c) Tipo 316

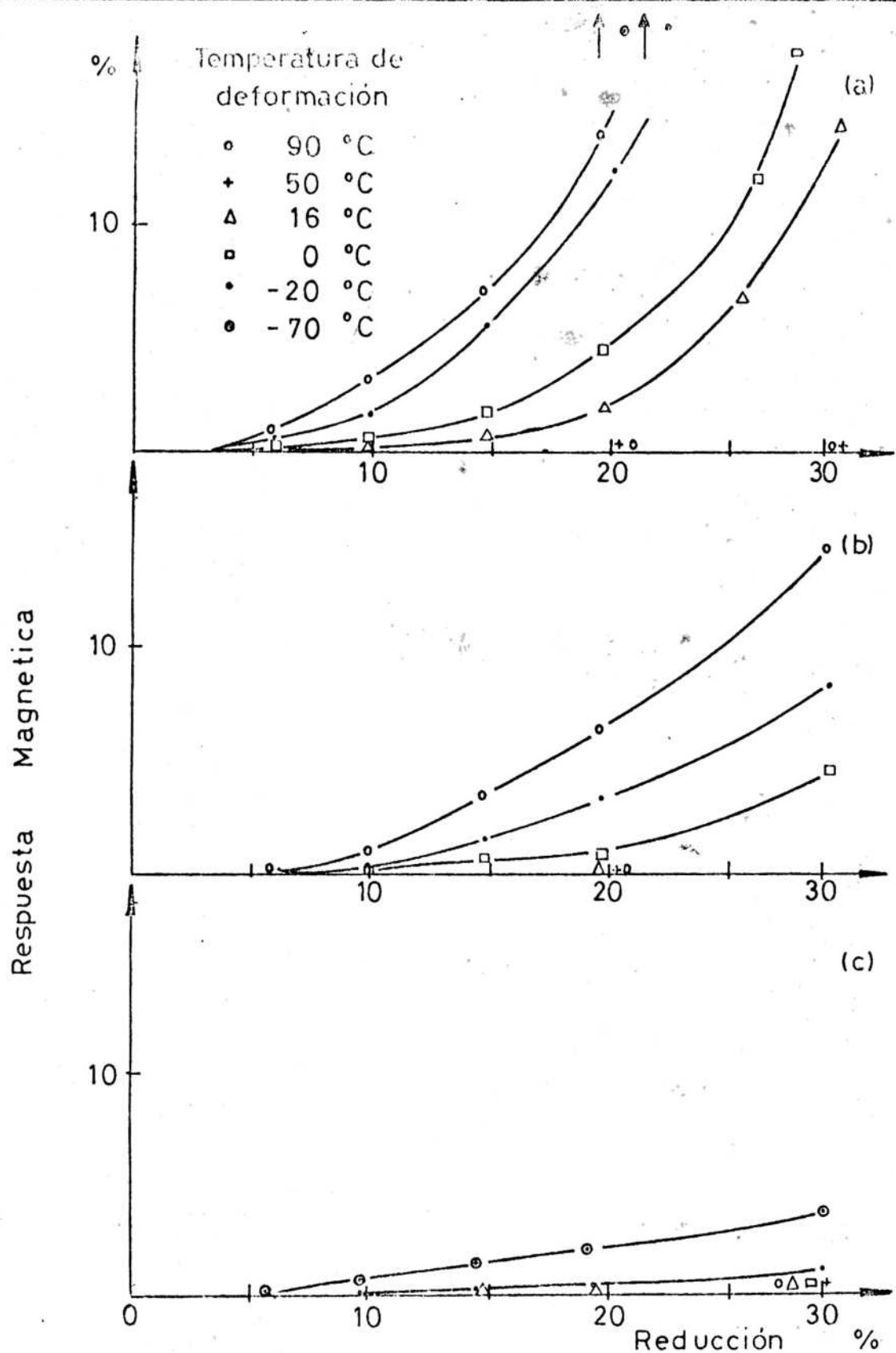


Fig. 2 Porcentaje de Respuesta Magnética Vs. Reducción por laminación a diferentes temperaturas
a) Acero Tipo 347 b) Tipo 304 c) Tipo 316

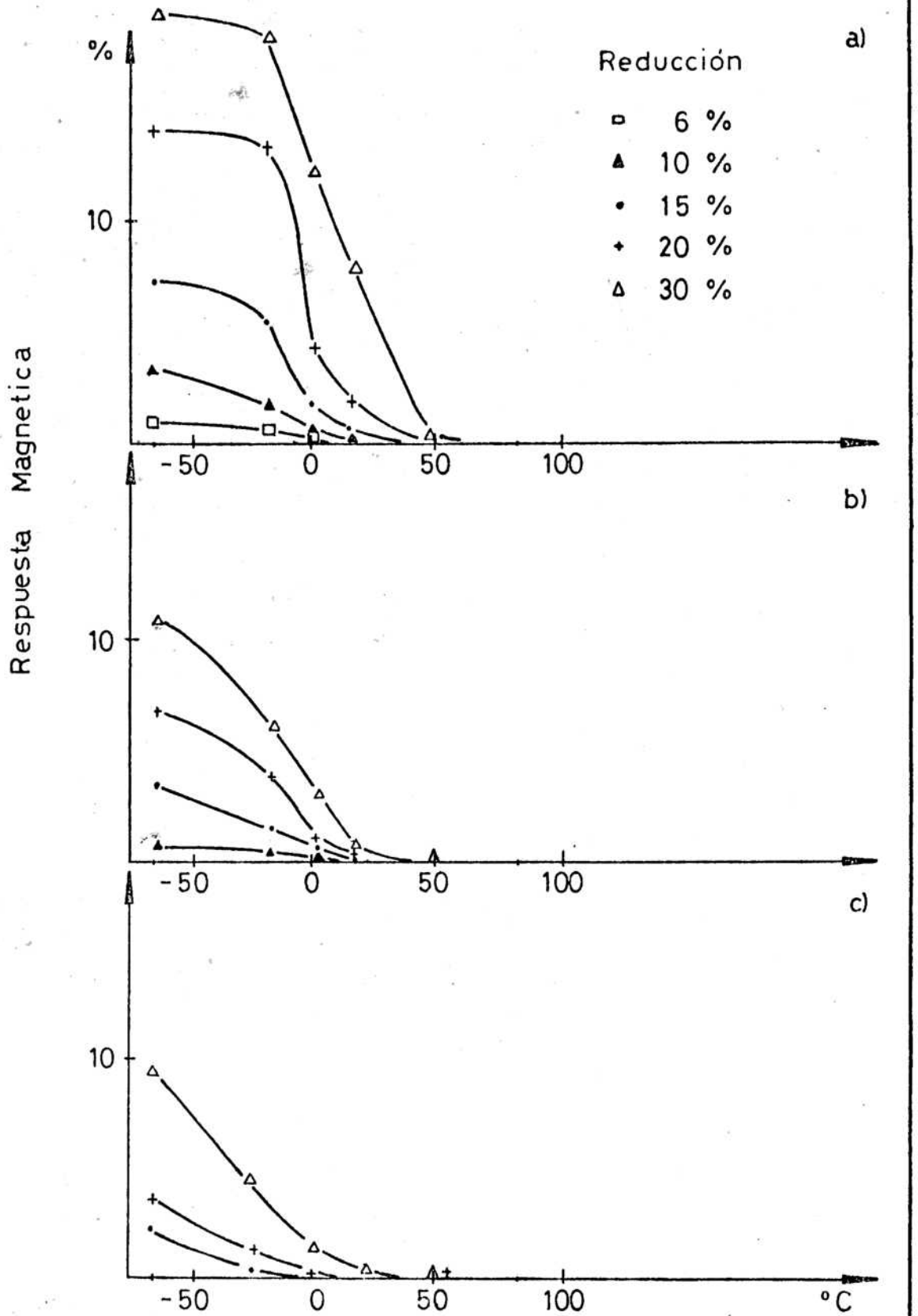


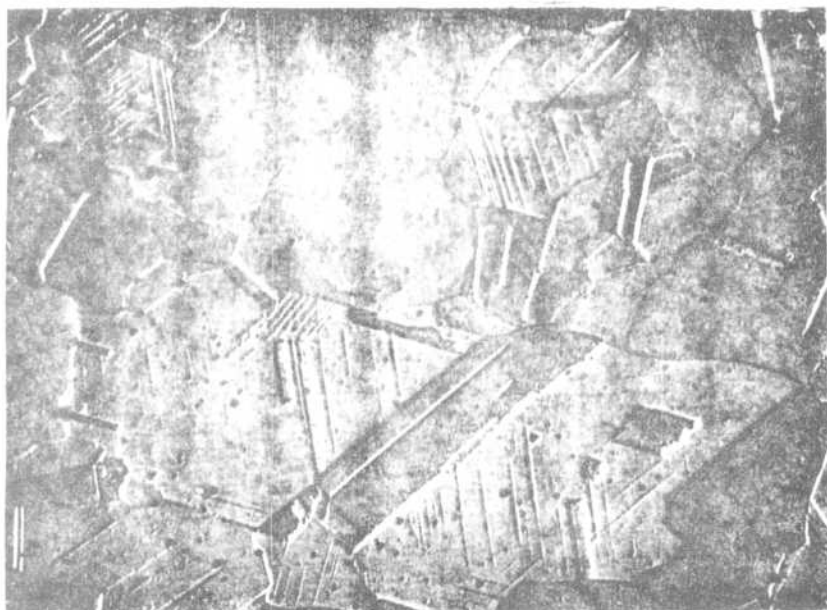
Fig. 3 : Porcentaje de Respuesta Magnetica Vs. Temperatura de laminación a diferentes reducciones
a) Acero Tipo 347 b) Tipo 304 c) Tipo 316

Fig. 4

Estructura original

Acero 347

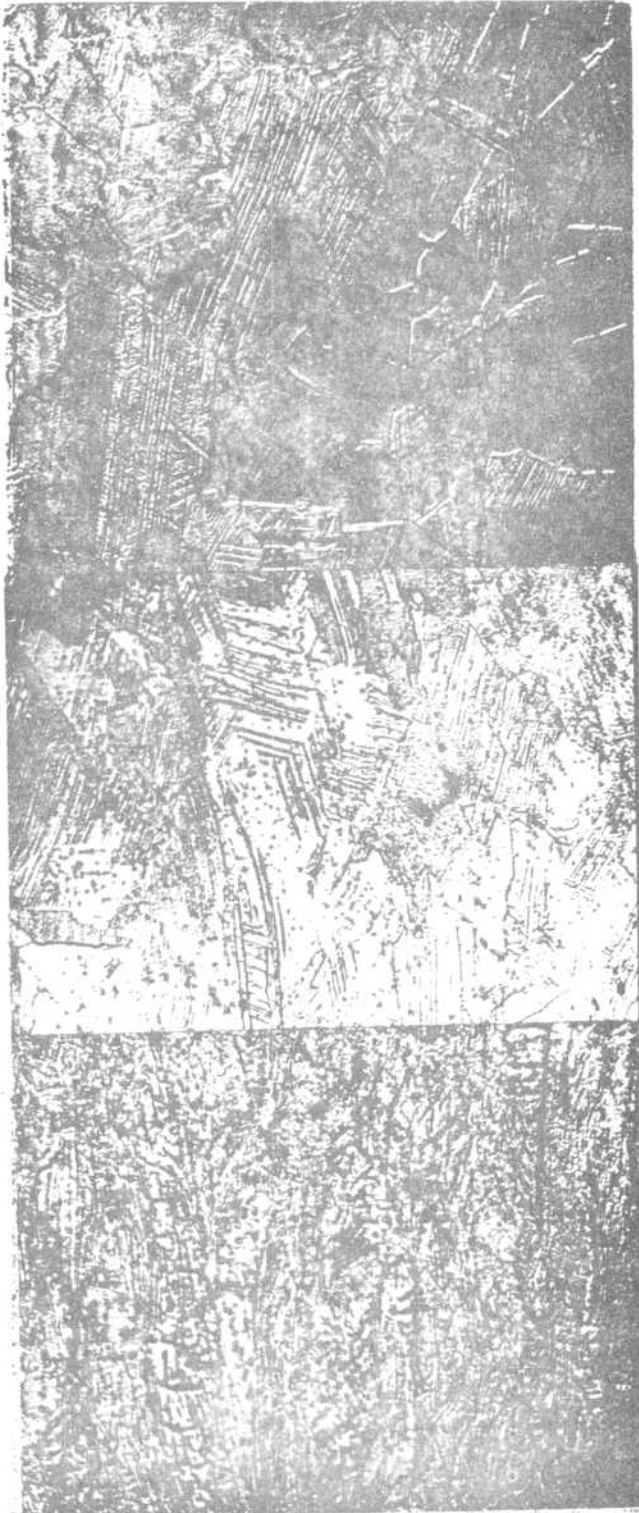
(1000 X)



Estructura de deformación

Acero 347

(400 X)



— 6 %

— 20 %

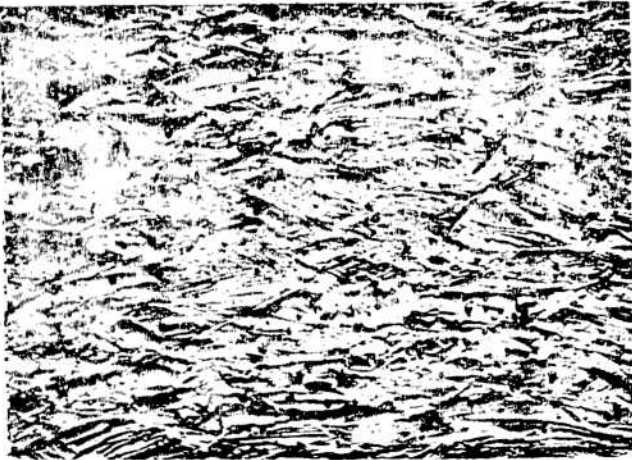
— 50 %

Fig. 6

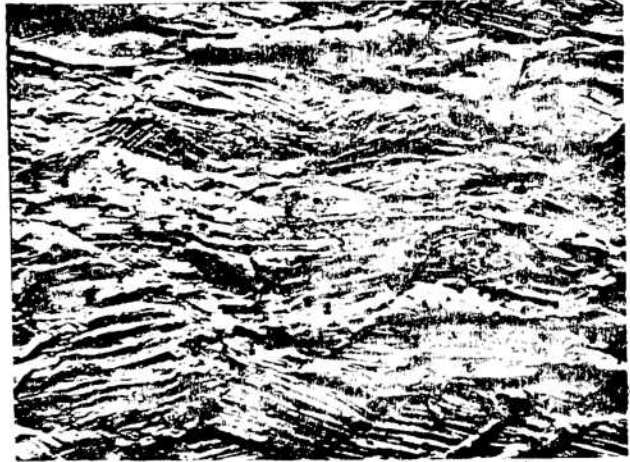
Estructura de restauracion

Acero 347

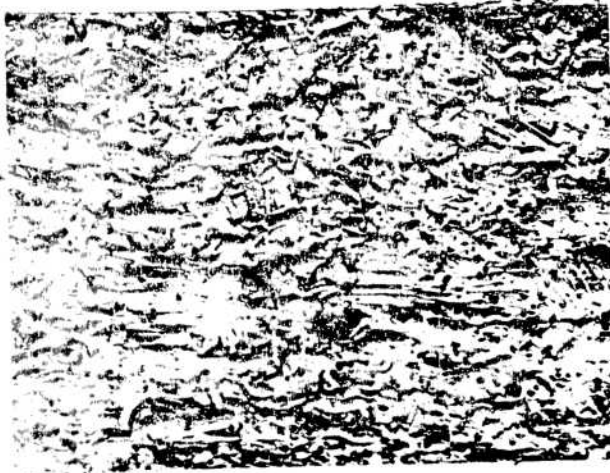
Luz Oblicua (1000 X)



100 °C



500 °C



700 °C



900 °C



1100 °C

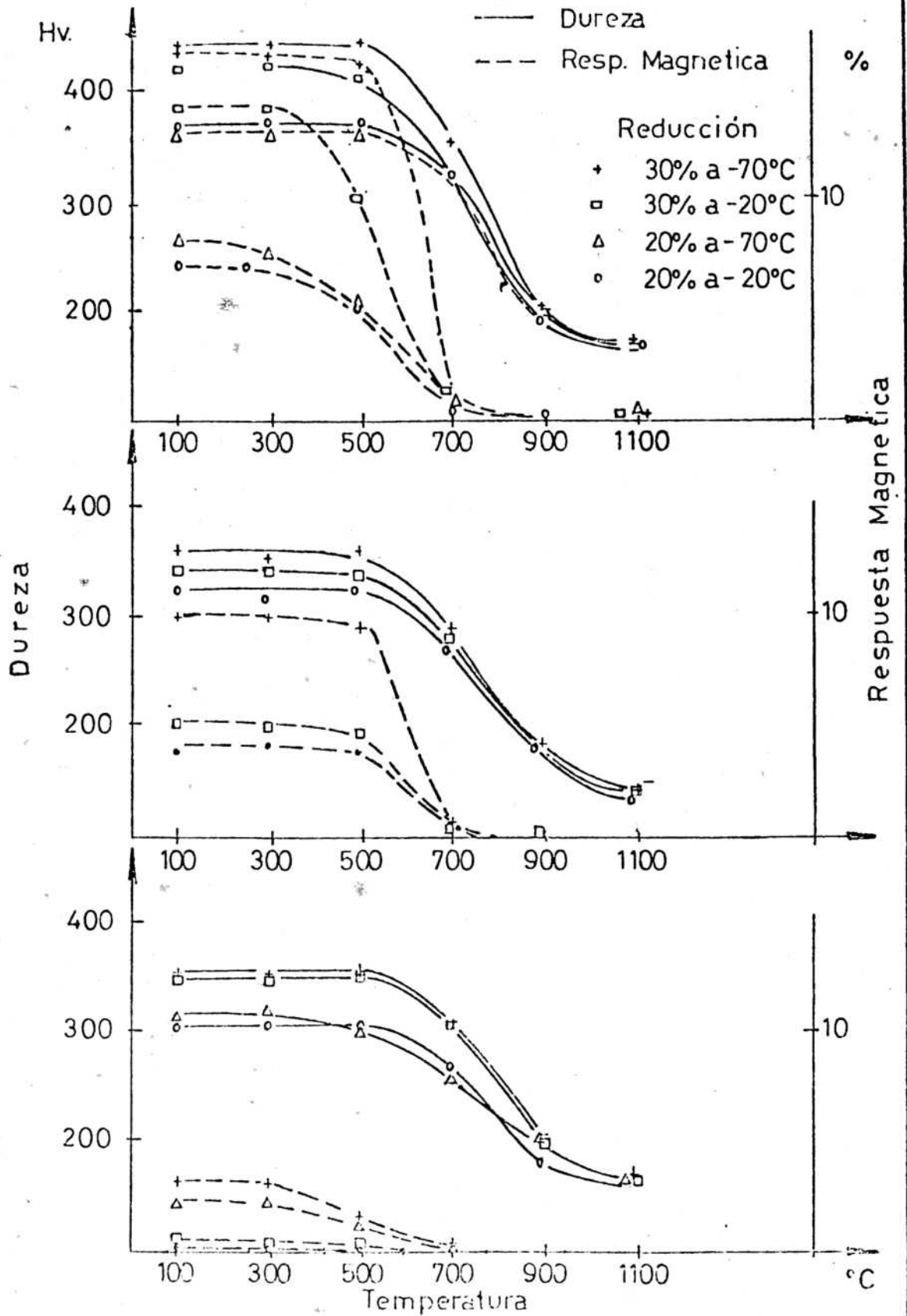


Fig. 7 Dureza y Porcentaje de respuesta magnetica V.S. Temperatura de recocido. Tiempo: 1 Hora
a) Acero Tipo 347 b) Tipo 304 c) Tipo 316

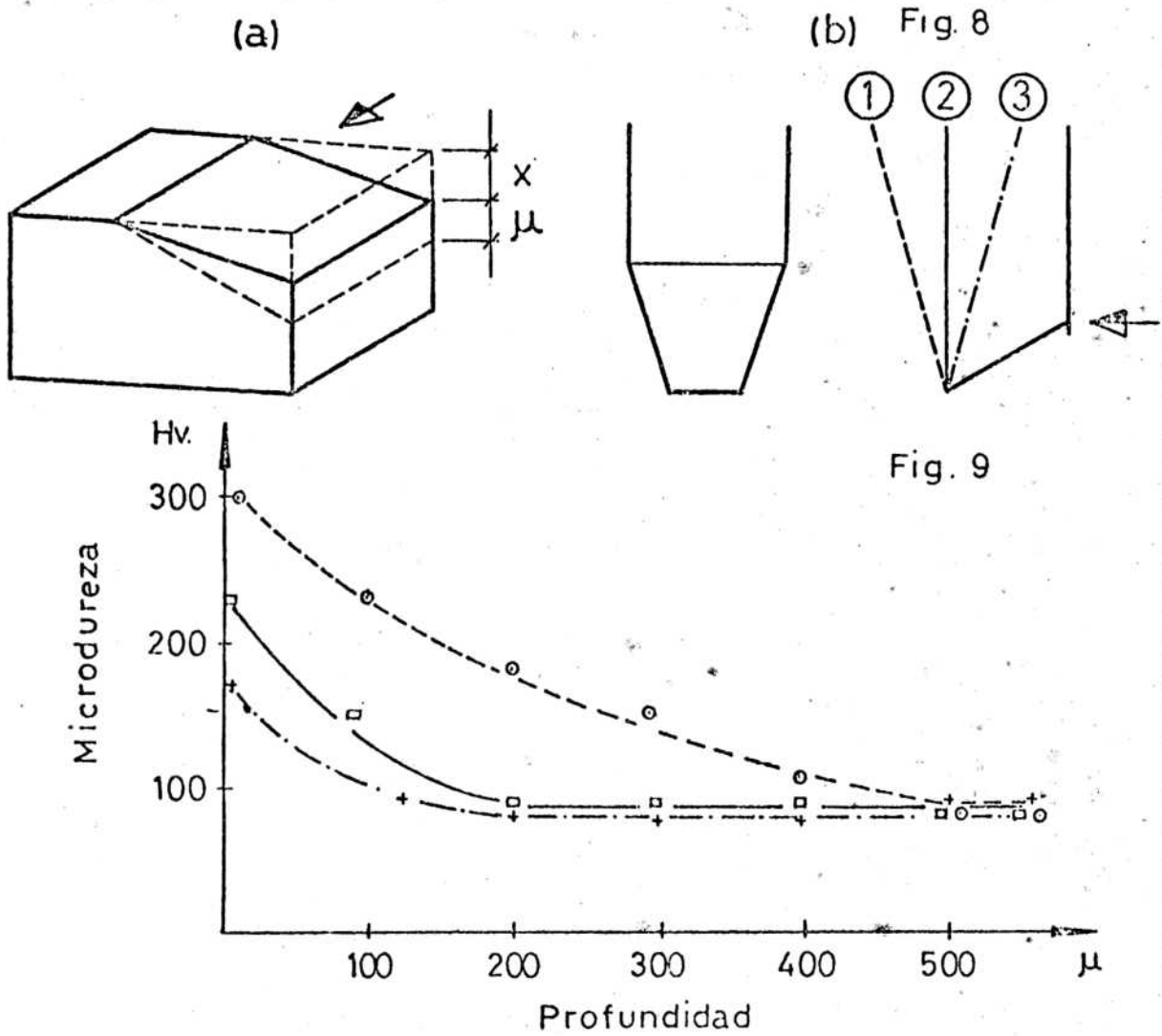
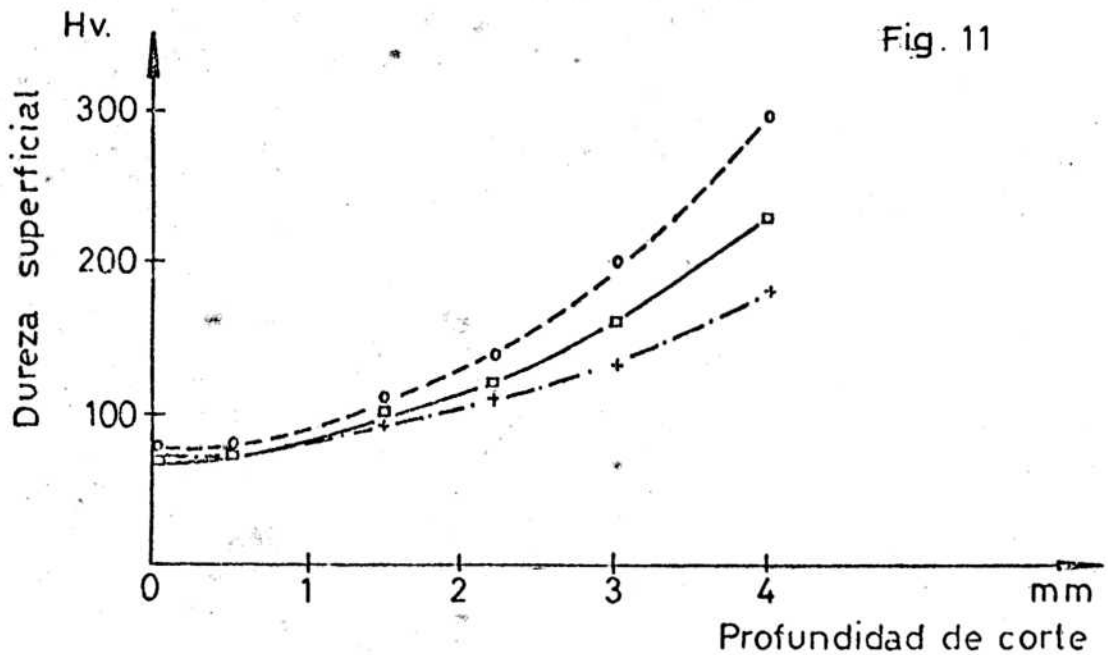
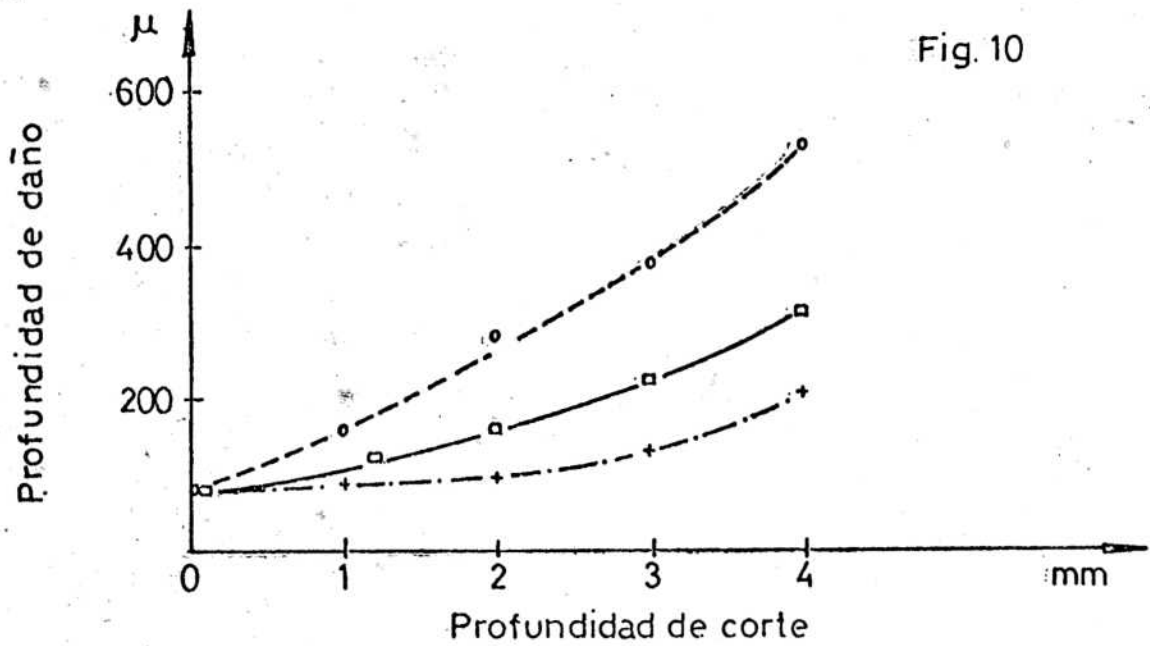


Fig. 8 a) Esquema de probeta para maquinado
b) Perfil de herramienta

Fig.9 Perfil de dureza sub-superficial. Profundidad de corte.
Herramientas según fig 8



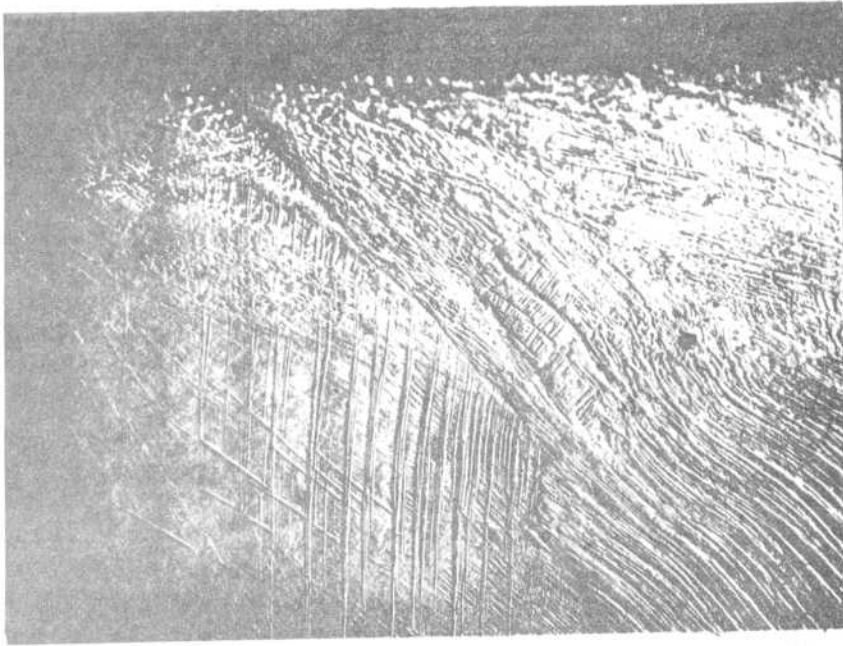
Figs. 10y11 : Dureza superficial y Profundidad de daño V.S.
Profundidad de corte.
Probeta y herramienta según fig. 8

Fig. 12

Estructura metalográfica de deformación

Acero 347

(1000 X)



Cepillada en cuña

Zona de máxima deformación

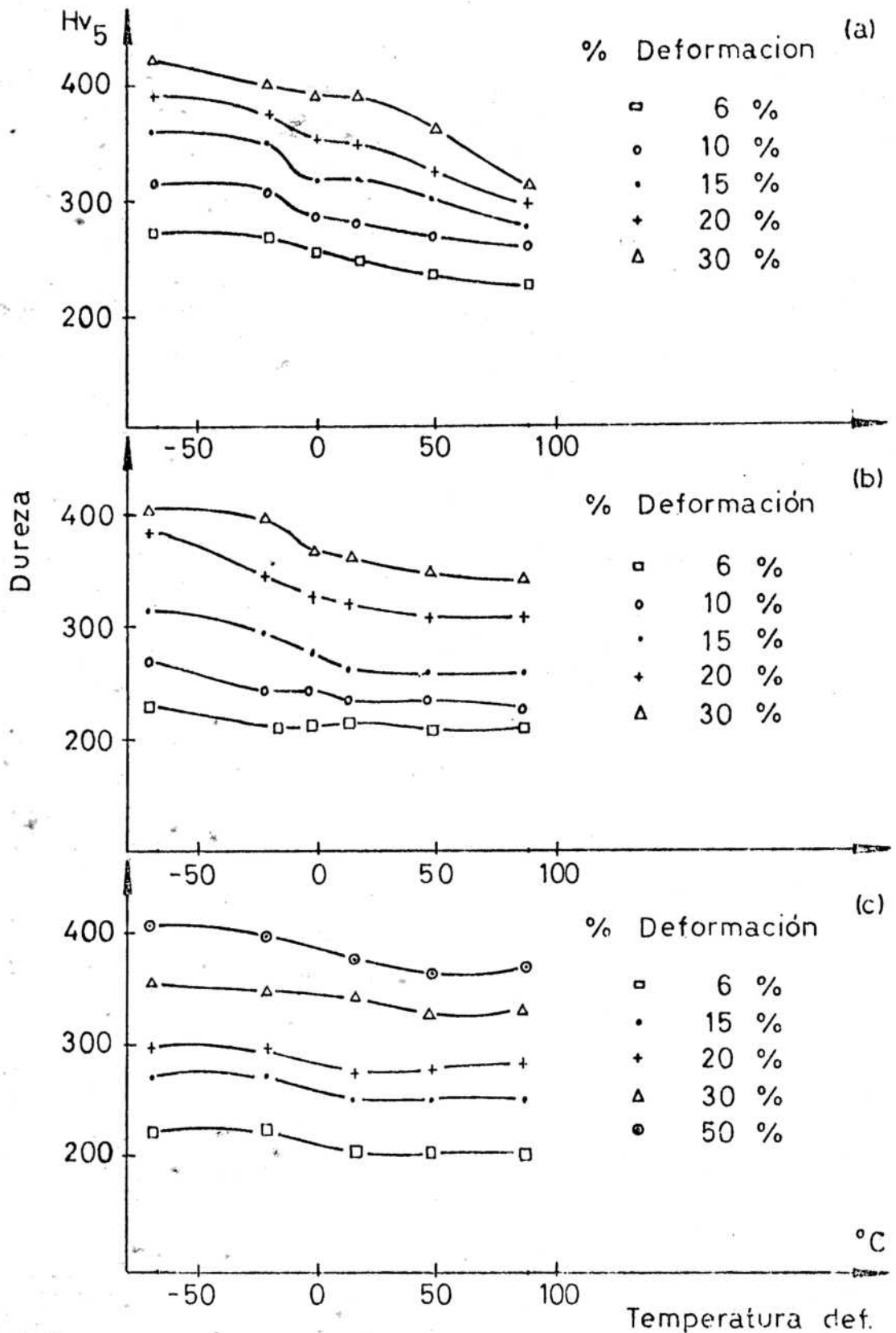


Fig.13 Dureza Vs. Temperatura de deformacion por laminación para deformaciones variables
 a)AceroTipo 347 b)Tipo 304 c)Tipo 316