

CNEA-NT 6/85

04.85.21

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

ENDURECIMIENTO SUPERFICIAL POR MAQUINADO EN ACEROS
INOXIDABLES AUSTENITICOS
PARTE III

P. ALVAREZ*, A. HEY*, R. VERSACI* y J. ANTIQUERA**

* División Tratamientos Termomecánicos - C.N.E.A.

** Universidad de Magallanes, Punta Arenas, Chile

Buenos Aires

1985

En trabajos anteriores (1)(2)(3) se han venido analizando diversos aspectos relativos a la respuesta de los aceros inoxidables austeníticos de uso más corriente frente a los procesos de trabajado mecánico, en particular los de deformación superficial como maquinado, que resultan en la generación de una capa endurecida en la superficie de la pieza. Se ha podido así establecer la forma en que la magnitud del daño introducido se relaciona con las variables del proceso tales como profundidad de pasada, ángulo de la herramienta, etc. Se determinó asimismo la incidencia de la composición del material sobre la respuesta a la deformación, estableciéndose que no sólo existen diferencias sustanciales entre los distintos tipos de aceros, sino que, en virtud de la considerable latitud de composición que admiten las normas, podían esperarse notables diferencias de comportamiento entre distintas partidas del mismo tipo de material. La utilización de la temperatura Md_{30} calculable a partir de la composición (4) mostró ser un método idóneo para establecer el grado de estabilidad del material en procesos de laminación a temperaturas controladas. Md_{30} es la temperatura a la cual se forma 50% de martensita con 30% de deformación (4);

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

Este análisis se ha extendido en el presente trabajo a la influencia de la temperatura de trabajado sobre el daño superficial en operaciones de maquinado con arranque de viruta. A tal efecto, se mantuvo la pieza a maquinar en un baño a temperatura controlada en tanto se verificaban temperaturas en la pieza y en la herramienta durante la operación mediante termocuplas convenientemente posicionadas.

La evaluación del daño se efectuó de la manera habitual mediante ensayos de microdureza y de respuesta magnética. Diversos aspectos microestructurales del daño se analizan en un trabajo separado.

II MATERIALES Y METODOS

Se utilizaron aceros 304 de procedencia comercial y de diferente composición según se ve en la Tabla I.

Tabla I

		C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	N
Acero	5	0.03	1.67	0.79	10.22	17.82	0.70	0.031
Acero	7	0.02	1.83	0.56	9.68	12.34	0.11	0.035

Todas las muestras fueron sometidas a un recocido previo de 1 hora a 1050°C y enfriamiento natural, ambos en vacío.

Las dos calidades de aceros ensayados fueron seleccionados por su diferencia de respuesta frente a la deformación homogénea e inhomogénea. Esta diferencia de respuesta es debida al distinto grado de estabilidad de uno y otro; dicha estabilidad se refleja en la diferencia del valor Md_{30} . Así, para el acero tipo 5: $Md_{30} = -45^{\circ}\text{C}$ y para el acero tipo 7: $Md_{30} = 7^{\circ}\text{C}$.

Los ensayos realizados se pueden agrupar en:

- a. Maquinado por arranque de viruta
- b. Torneado
- c. Viruta congelada

- a. Maquinado por arranque de viruta

Los ensayos de maquinado por arranque de viruta se realizaron a diferentes temperaturas: -20; 0; 18; 45; 90°C, para lo cual se utilizó un dispositivo que se muestra en las Figs. 1, 2 y 3.

La temperatura alcanzada por la pieza durante el maquinado se registró por medio de 3 termocuplas introducidas en las

piezas hasta 1,5 mm por debajo de la superficie a maquinar.
Fig. 4a 4b. Se registró además la temperatura del baño durante el maquinado.

Las probetas a maquinar se ajustan con las mordazas y son sumergidas en el baño termostatzado dejando 2 mm libres para evitar la lubricación de la superficie. Los baños utilizados a las diferentes temperaturas fueron de alcohol, agua y aceite.

En la Tabla II se esquematizan los ensayos realizados.

Tabla II

Material	Ensayo	Herramienta de corte	Velocidad	Temperatura de maquinado				
				-20°C	0°C	18°C	45°C	90°C
Acero 7	E-1	-	V ₁	x	x	x	x	x
	E-2	+	V ₁	x	x	x		x
	E-3	-	V ₂	x	x	x		x
Acero 5	E-4	-	V ₁	x	x	x	x	x
	E-5	+	V ₁	x	x	x	x	x

Las condiciones de trabajo que se mantuvieron constantes en los ensayos fueron:

Profundidad de corte = 1.5 mm

Avance = 0.6 mm

Las velocidades empleadas:

$V_1 = 3 \text{ m/min}$

$V_2 = 8 \text{ m/min}$

b. Ensayos de torneado

Los ensayos de torneado se realizaron en condiciones normales de trabajo para poder así estimar la temperatura en el instante de corte, el porcentaje de martensita \mathcal{L}' formado y el espesor de la capa transformada.

Para estimar la temperatura de corte se maquinó con el método de doble herramienta, que actúa como termopar. Fig. 5.

c. Viruta congelada

A fin que la zona de corte conserve la estructura que tiene en el momento del mecanizado se diseñó un dispositivo que

se monta sobre la limadora. Este dispositivo consiste en un soporte realizado en acero templado con entalla, sobre la cual se monta la pieza a mecanizar. En un determinado momento, mientras la herramienta avanza, un órgano móvil de la máquina rompe la pieza de acero frágil, con lo cual la pieza que se está mecanizando se desplaza en la misma dirección del movimiento de la herramienta. De esta manera podemos asegurar que la viruta a estudiar se obtuvo con un maquinado a la velocidad prefijada. Las probetas maquinadas fueron evaluadas con ensayos no destructivos y destructivos.

1. No destructivos

- 1-1 Respuesta magnética superficial con un equipo Dr, Foster Mod. 1053
- 1-2 Microdureza superficial con microdurómetro Leitz
- 1-3 Dureza Vickers superficial

2. Destructivos

- 2-1 Corte transversal y perfil de penetración de dureza
 - 2-1-1 Niquelado para protección de bordes
 - 2-1-2 Corte transversal con electroerosión
 - 2-1-3 Inclusión y pulido mecánico
 - 2-1-4 Medición de microdurezas Vickers con 25 g

de carga. Las lecturas se hicieron desde la superficie hacia el interior de la pieza cada 25 u.

2-2 Obtención y observación con MET de láminas delgadas.

Para la obtención de láminas delgadas se utilizó un equipo "doble jet" con reactivos de ácidos acético y perclórico 10% y una corriente de 100 mA. La temperatura de trabajo es de 2 a 3°C. Estas láminas delgadas fueron observadas con un microscopio electrónico Philips EM operado a 100 kv.

Los porcentajes de martensita α' fueron calculados a partir de los valores de respuesta magnética utilizando la curva de calibración de la Fig. 6, que relaciona los valores de porcentajes de ferrita delta en soldadura con porcentajes de martensita α' . Esta calibración es necesario realizarla porque la susceptibilidad magnética de ferrita δ no es la misma que la de martensita α' (5). En cada caso se determinó el porcentaje de martensita α' por mediciones de MET utilizando la técnica de conteo de puntos sobre las micrografías obtenidas (3).

III RESULTADOS

De los trabajos anteriormente realizados (1)(2)(3) se desprende la diferencia de respuesta del material por:

- a) composición (aún dentro del rango permitido por norma)
- b) temperatura de trabajo
- c) tipo de herramienta
- d) condiciones de corte

El efecto de la variación en la composición química fue estudiado en un trabajo anterior en el que se determinó experimentalmente el valor de Md_{30} .

Maquinado con arranque de viruta

Las muestras se maquinaron en las condiciones descritas anteriormente con herramientas de diferente ángulo de corte: positivo y negativo.

El registro de aumento de temperatura en la pieza se ejemplifica en la Fig. 7. Del gráfico se desprende que el aumento total de temperatura en la pieza termostatizada es de alrededor de 20°C para la velocidad V_1 . El perfil de temperatura en la pieza es del tipo que se indica en la Fig. 8.

La evaluación de las variables de maquinado se realizó con ensayos no destructivos y destructivos. Como no destructivos se empleó respuesta magnética superficial y como destructivos perfil de penetración de dureza para evaluar el espesor de la capa sub-superficial formada y observación de láminas delgadas de la superficie maquinada.

En la Tabla III se dan los porcentajes de martensita medidos en superficie, así como el espesor de la capa sub-superficial formada en cada condición de trabajo.

Tabla III

Material	Ensayo	Herramienta corte	Velocidad m/min	Temperatura de maquinado (°C)									
				-20		0		18		45		90	
				% α	Es mm	% α	Es mm	% α	Es mm	% α	Es mm	% α	Es mm
Acero 7	E-1	-	3	35	2,5	20	1,8	8	1,2	3	0,5	0,21	
Acero 7	E-2	+	3	7,8	0,4	1	0,25	0,2	0,2		0	0	
Acero 7	E-3	-	8	7,8	0,5	4	0,35	0,7	0,3		0	0	
Acero 5	E-4	-	3	1,5	0,5	0,2	0,30	0	0,05	0	0,05	0	0,05
Acero 5	E-5	+	3	1	0,35	0	0,07	0	0,05	0	0,05	0	0,05

Es = Espesor

La diferencia de temperatura real en la pieza al maquinarse con V_1 y V_2 es: maquinado con V_1 , $T = 15^\circ\text{C}$ y maquinado con V_2 , $T = 60^\circ\text{C}$.

Los resultados anteriores se graficaron en la Fig. 9.

Las mediciones de microdureza superficial a carga constante, 25 g, se graficaron en la Fig. 10. Se midió dureza superficial con carga variable entre 50 g y 50 kg para evaluar la influencia de la profundidad de la impronta. Fig. 11.

Utilizando la diferencia de penetración de la impronta ($10\ \mu - 2,5\ \text{mm}$) se podría estimar también el espesor de la capa endurecida. No obstante, no se aplicó este último método porque tiene un error mayor que el perfil de microdureza en el corte transversal. Para la evaluación del daño sub-superficial introducido en el maquinado a temperatura variable, se determinó el perfil de microdurezas (carga 25 g) en un corte transversal. En la Fig. 12 se observan los resultados del ensayo E-1. Los valores de los espesores de la capa sub-superficial de todos los ensayos se disponen en la Tabla III.

Se estableció la relación entre el porcentaje de martensita α' medida en superficie con la profundidad de la capa

sub-superficial formada, Fig. 13. Las observaciones de microestructura se realizaron sobre láminas delgadas obtenidas de especímenes maquinados a 0°C y -20°C. Las micrografías obtenidas son las que se muestran en las Figs. 17, 18 y 19.

El maquinado en torno para evaluación de temperatura se realizó con una herramienta de acero rápido y otra de metal duro. Estas dos herramientas actúan durante el maquinado como un termopar. Mediante una calibración adecuada de la f.e.m. generada se estima la temperatura en el instante de corte. Esta temperatura fue del orden de 1000°C.

El material utilizado fue acero 304 con una composición química tal que el valor de Md_{30} calculado según la ecuación de Gladman es $Md_{30} = -58,2^{\circ}\text{C}$. Este valor nos permitió predecir una alta estabilidad estructural.

Las condiciones de corte fueron:

Avance : 0.132 mm/vuelta

Velocidad de corte : 30 m/min

Profundidad de corte : 2,5 mm

En la superficie del caño así torneado se midió respuesta magnética la que indicó un 0% de martensita α' . El perfil de

microdureza realizado en un corte transversal indica que la capa sub-superficial tiene un espesor de 0,05 mm.

Con las mismas condiciones de corte, avance, velocidad y profundidad de corte, pero con una herramienta desafilada, se maquinó el mismo material. En la superficie se midió respuesta magnética la que indicó 8% de martensita α' . El perfil de microdureza realizado en un corte transversal indica que la capa sub-superficial tiene un espesor de 0,8 mm.

Viruta congelada

En una pieza de acero 7 se maquinó con $V_1 = 3$ m/min y herramientas con ángulo de corte negativo y positivo. De las piezas así maquinadas se trazó un mapa de microdurezas en el corte transversal, Fig. 15a, 15b, y un mapa de porcentaje de martensita α' sobre el mismo corte. Fig. 16a y 16b.

La micrografía 20 muestra la microestructura de un corte transversal de la viruta obtenida con velocidad de maquinado V_1 .

IV DISCUSION

El aumento de la dureza por deformación en aceros austeníticos puede atribuirse esencialmente a tres mecanismos:

1. Endurecimiento por trabajado de austenita
2. Formación de martensita inducida por deformación
3. Endurecimiento por trabajado de la martensita

La influencia relativa de cada mecanismo depende de características del material y del proceso que han sido analizadas en trabajos anteriores. Es evidente que un alto grado de endurecimiento aparecerá cuando prevalezca la formación de martensita inducida por deformación. Para ello, además de niveles apropiados de deformación, se requiere que la operación se lleve a cabo a temperaturas adecuadamente bajas. La incidencia de la composición del material sobre la temperatura de formación de martensita, como se ha dicho, es aceptablemente descripta por la expresión de Gladman. En tanto alteraciones de las condiciones operativas en procesos de maquinado pueden producir variaciones apreciables en temperatura, resulta interesante analizar la magnitud de estas variaciones. Así, la Fig. 12 muestra el efecto de variables tales como ángulo de corte de la herramienta, composición del material, velocidad de corte y, particularmente, temperatura de trabajo sobre la cantidad de martensita formada en la región superficial. Para mejor comprensión se repiten estas curvas en la Fig. 14 agrupadas según las distintas variables. En particular, es de notar el alto grado de endurecimiento del acero 7 en comparación con el acero 5. Estos

materiales tienen temperaturas Md_{30} de $7^{\circ}C$ y $-45^{\circ}C$ respectivamente, respondiendo ambos a la especificación de composición para tipo 304.

La Fig. 12 muestra asimismo la influencia de la temperatura sobre el volumen sub-superficial de material deformado estimado a través de mediciones del perfil de microdureza, en este caso para el ensayo E-1 realizado en las condiciones operativas más exigentes. Resulta aparente que, más que un endurecimiento de la capa superficial, lo que se observa es un aumento en la profundidad del daño, esto es, en el volumen de material afectado. Este volumen es el que es registrado por las mediciones de contenido de martensita por respuesta magnética.

La Fig. 10 pone de manifiesto que mayores penetraciones de daño, estimadas por respuesta magnética, no van acompañadas por crecimientos proporcionales de dureza superficial cuando se utilizan bajas cargas de ensayo, alcanzándose eventualmente un valor estacionario. En cambio, la utilización de cargas crecientes permite una mejor apreciación de la profundidad del daño, en la medida en que el volumen de material ensayado se corresponde con el de material afectado. Esto se muestra en la Fig. 11, donde se ha utilizado la profundidad de la impronta de dureza como referencia del volumen ensayado.

Asimismo, en la Fig. 13 se observa que la correlación entre profundidad total del daño y cantidad de martensita, medida por respuesta magnética, muestra una etapa inicial de bajo contenido de martensita para baja profundidad de daño para luego crecer en forma aproximadamente lineal a partir de un cierto punto determinado por las condiciones de temperatura y deformación que impliquen un cambio del mecanismo de endurecimiento por trabajado al de endurecimiento por formación de martensita.

A profundidades mayores de daño, del orden del límite de penetración del campo inducido por el sensor magnético, debiera observarse un apartamiento de la linealidad tendiendo hacia un valor estacionario.

La existencia de un cierto contenido de martensita en la superficie es probablemente debido a fenómenos que suceden en la zona adyacente al filo de la herramienta que, tal como se observa en las Figs. 15a - 15b, se traducen en altos valores de microdureza. Asimismo, el rozamiento del flanco de la herramienta sobre la nueva superficie de la pieza dejará como secuela en la superficie una zona que será endurecida por fricción después de verificado el corte.

Es en esta zona de la herramienta en que se observan las

altas temperaturas puestas de manifiesto en el ensayo de doble herramienta. La constante remoción del material trabajado hace que la temperatura del mismo no aumente en la misma proporción. Sin embargo, cualquier cambio en las condiciones de trabajado que ocasione un aumento de temperatura, como por ejemplo aumento de velocidad de corte, se traducirá en la formación de menor cantidad de martensita.

Esto se pone de manifiesto en la Fig. 14b, donde para el ensayo E-1 el aumento de temperatura en la pieza es de 20°C y para el E-3 es de 60°C.

Asimismo, en los ensayos de viruta congelada, donde la única variable fue el ángulo de corte, los perfiles de microdureza, Fig. 15a-15b, y porcentaje de martensita α' en la viruta, Fig. 16a-16b, corroboran lo anteriormente dicho.

La influencia de la composición química que se refleja en el valor de Md_{30} no sólo se observa en la Fig. 14c, sino también en el ensayo de torneado de acero 304 con muy bajo Md_{30} donde a pesar de ser éste trabajado en condiciones desfavorables no se produce transformación martensítica y la capa endurecida es pequeña.

aseguren la lubricación y controlen aumentos excesivos de temperatura. En todos los casos la respuesta del material dependerá de su composición química real.

La evaluación del daño en modo fehaciente sólo puede hacerse en forma destructiva a través de perfiles de microdureza. Para evaluaciones estimativas o para fines de control puede utilizarse una combinación de mediciones de respuesta magnética y de dureza superficial a bajas cargas. Las posibilidades de utilización de series de mediciones superficiales de dureza con cargas crecientes son promisorias y deben analizarse con más detalle.

En las micrografías de las muestras maquinadas se observa un importante cambio de la microestructura. Esta microestructura tiene características muy diferentes a la observada en el caso de los materiales sometidos a deformaciones homogéneas.

En las muestras maquinadas a 0°C se observa la formación de bandas de deformación con una alta densidad de dislocaciones. Dentro de las bandas es posible observar la presencia de placas de martensita en la intersección de dos de estas bandas.

Lo mismo se observa, obviamente, al variar la temperatura del sistema por medios externos. En este caso el baño termostático puede asimilarse al uso en la práctica de líquidos refrigerantes en mayor o menor proporción. Resulta evidente que el enfriamiento de la pieza deberá traducirse en una mayor profundidad de la capa deformada. Aún cuando todo efecto de lubricación ha sido cuidadosamente excluído de la presente serie de experiencias resulta interesante especular sobre su incidencia en los fenómenos de endurecimiento. Al reducir la generación de calor por rozamiento de la viruta sobre el frente de la herramienta el ascenso de temperatura será menor y se favorecerá el endurecimiento por formación de martensita. Por otra parte, al disminuir el rozamiento entre la superficie maquinada y el flanco de la herramienta deberá observarse una reducción en la dureza de la capa de superficie. El efecto neto sería el de un cambio en la forma de los perfiles de dureza de la Fig. 12, haciéndolos más bajos y profundos.

Desde el punto de vista práctico, en base a éstas y anteriores experiencias, resulta la conveniencia de reducir la magnitud del daño superficial a través de una cuidadosa elección de las características de la herramienta y de las condiciones de corte que se traduzcan en temperaturas de trabajo suficientemente altas, utilizando volúmenes restringidos de líquido que

También en el interior de las bandas se observa la presencia de mallas de dislocaciones como asimismo fallas de dislocaciones.

En el caso del material maquinado a -20°C se observa gran cantidad de fallas de apilamiento de diferentes características. En uno de los casos son largas fallas acompañadas de otras pequeñas zonas falladas. En este caso también se observa gran cantidad de dislocaciones entre las bandas y aún dentro de las mismas. Esta situación es muy similar a los llamados canales de deformación en laterales de similar estructura.

Dentro de estas bandas se observa una gran contribución al contraste de las mismas debido a la presencia de fallas de apilamiento.

Todo este cambio en las características microestructurales está asociado al modo de deformación inhomogénea utilizado, lo que también se desprende de la observación de la micrografía 20.

V CONCLUSIONES

La magnitud del daño introducido por operaciones de maquinado en la superficie de aceros inoxidable austeníticos

está determinada por las condiciones de corte y muy particularmente por la temperatura de trabajado. Menores temperaturas de operación determinan mayor profundidad de daño por formación de martensita inducida por deformación.

La temperatura por encima de la cual, para determinado tipo de operación, no se detectan cantidades apreciables de martensita depende de la composición del material y varía sensiblemente aún dentro de los rangos de composición admisibles para un tipo particular de acero.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece la colaboración del Sr. O. Carpineta y de las empresas FITZNER Hnos. y DALMINE SIDERCA.

REFERENCIAS

1. P. Alvarez - A. Hey. A.B.M., Julio 1983.
2. P. Alvarez - A. Hey. A.A.T.N., Noviembre 1983.
3. P. Alvarez - R. Versaci - A. Hey. S.A.M., Mayo 1984.
4. T. Gladman - J. Hammond - F.W. Marsh. Sheet Metal Industries 51 (s), Mayo 1974, 219.
5. S.S. Hecker - M.G. Stout - K. Staudhammer - J.L. Smith. Met. Trans. 13 A, 1982, 619.

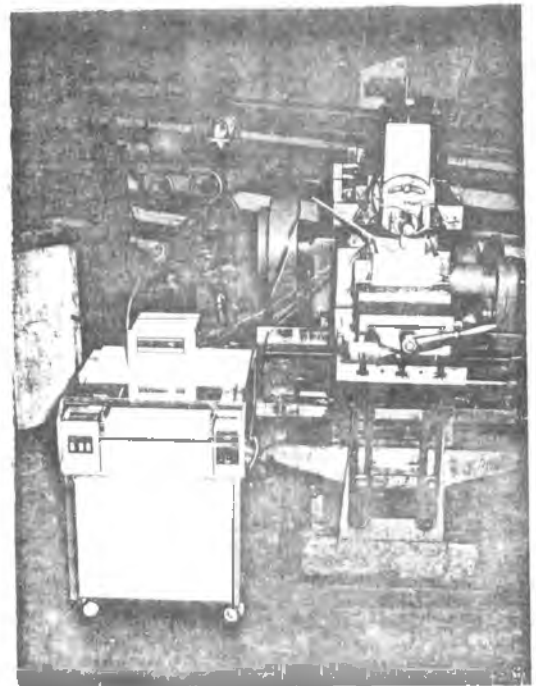
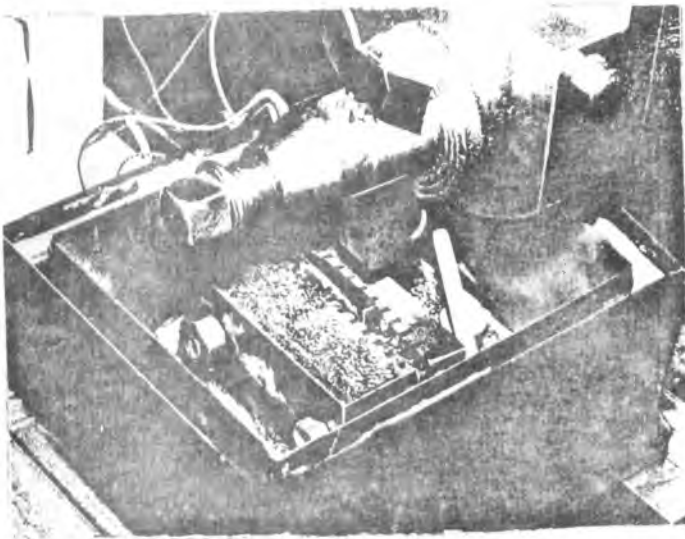
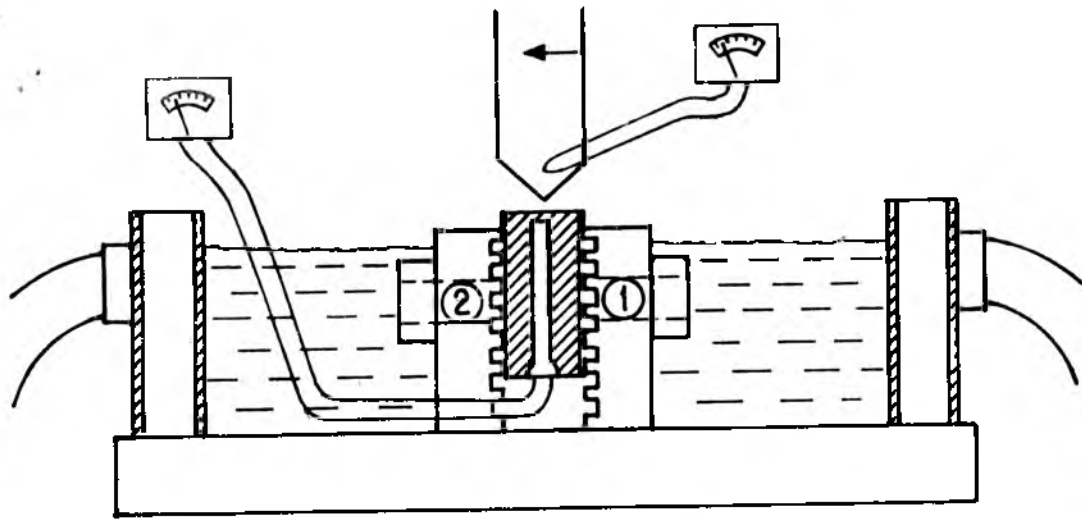
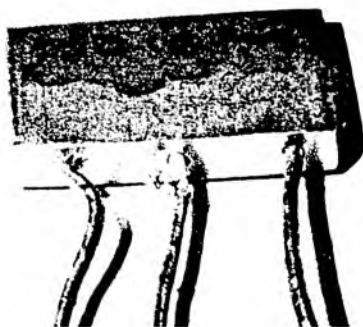
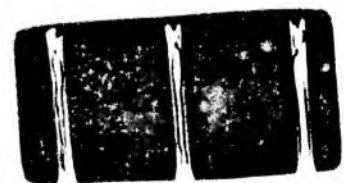


Fig.1-2-3 Dispositivo y equipo utilizado en el maquinado



a



b

Fig. 4 Probeta utilizado

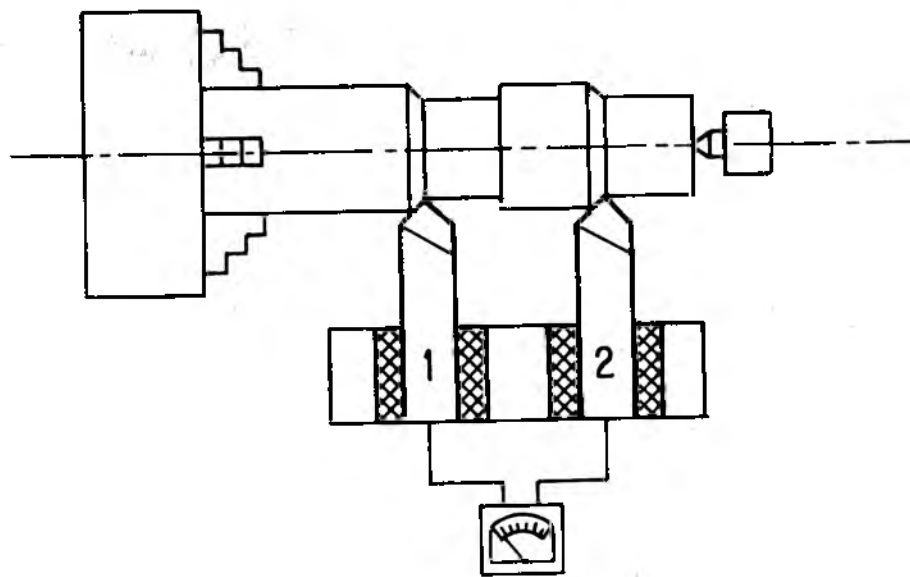


Fig.5 Esquema para la medida de temperaturas por el método de la doble herramienta : 1. Herramienta de A.R.; 2. Herramienta de metal duro.

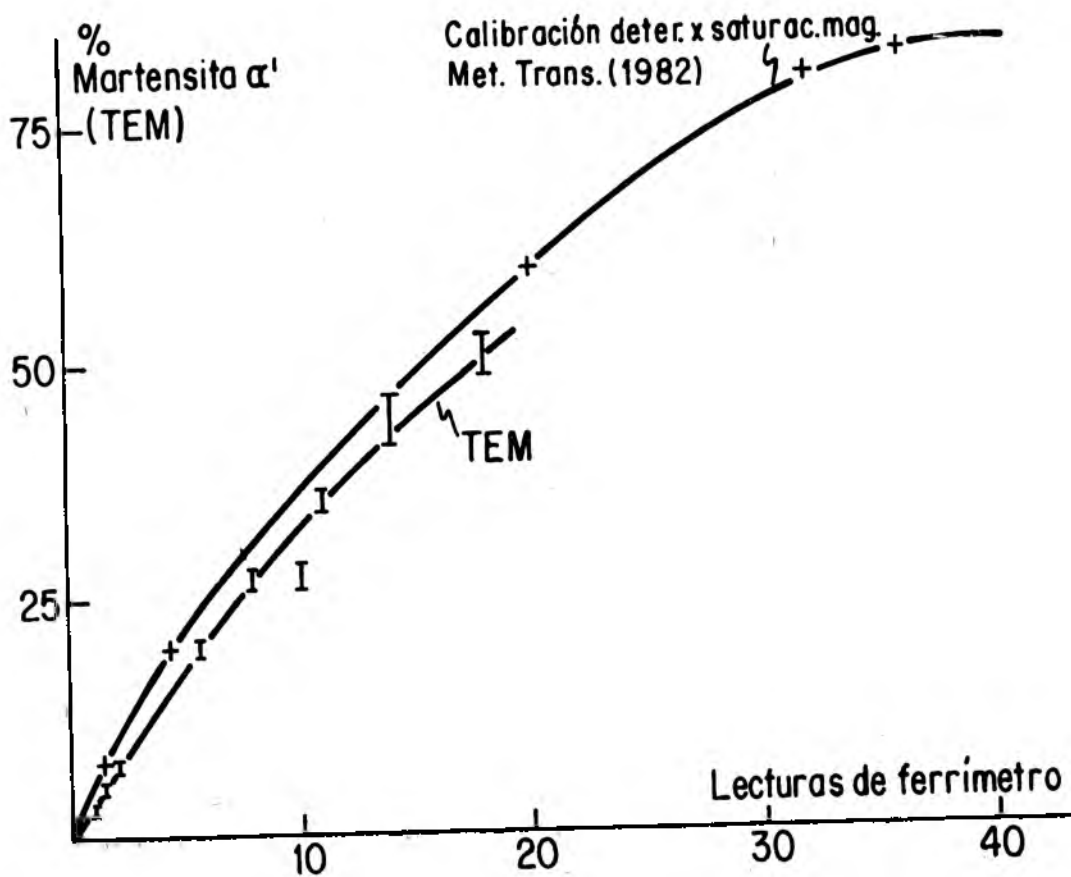
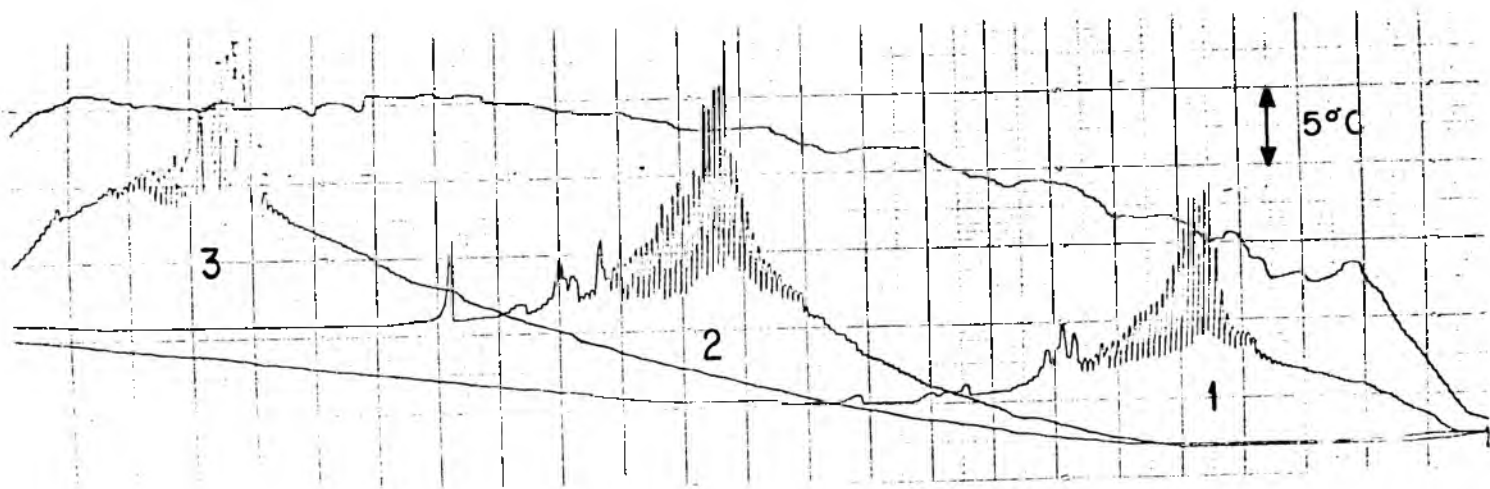
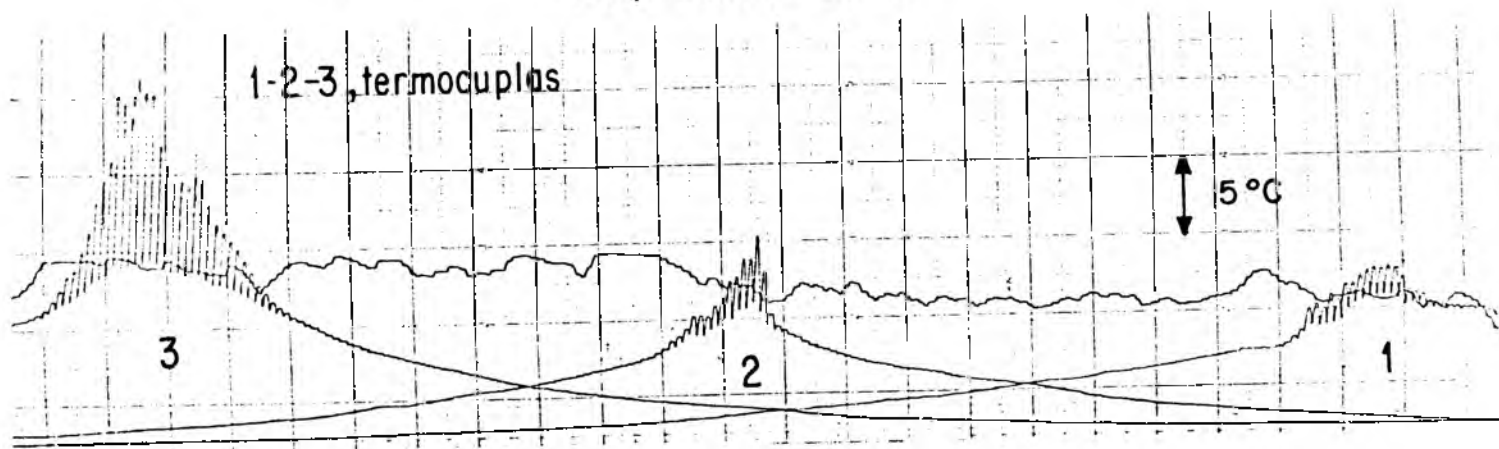


Fig. 6 Acero 304- Curva de calibración del delta ferrímetro por mediciones con TEM.



Maquinado a -20°C



Maquinado a 0°C

Fig. 7 Registro de temperaturas en la pieza durante el maquinado baja velocidad d

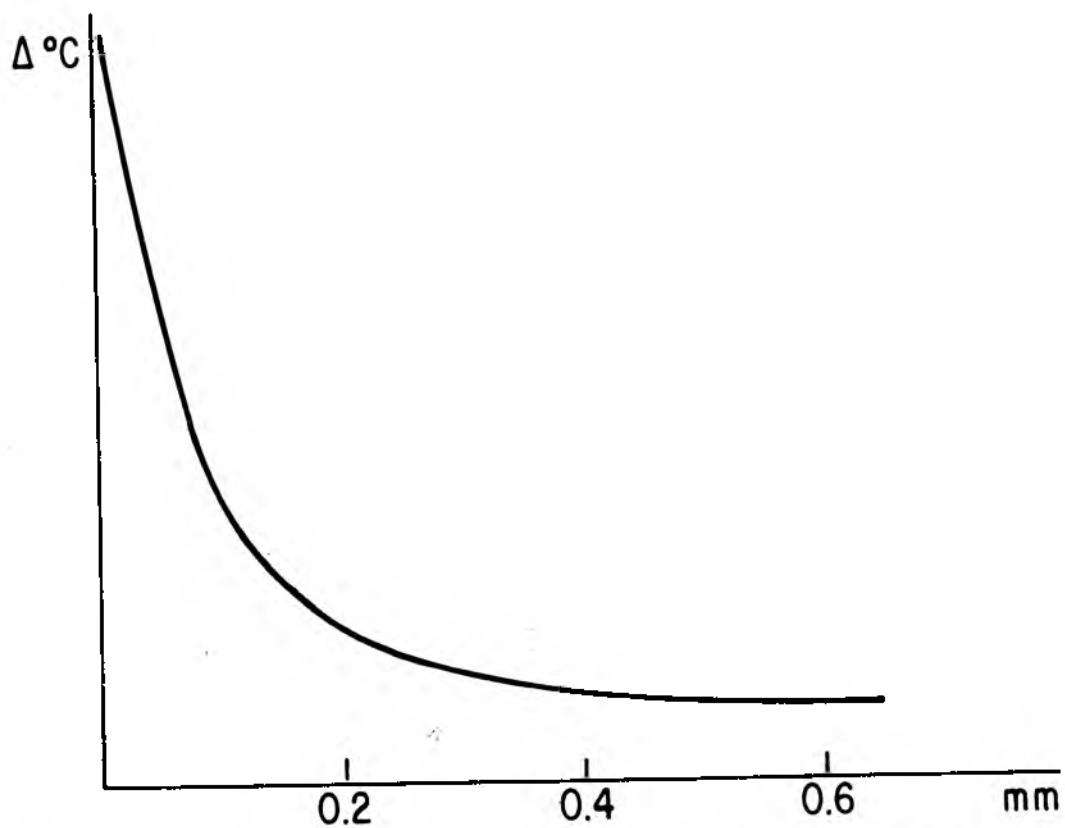
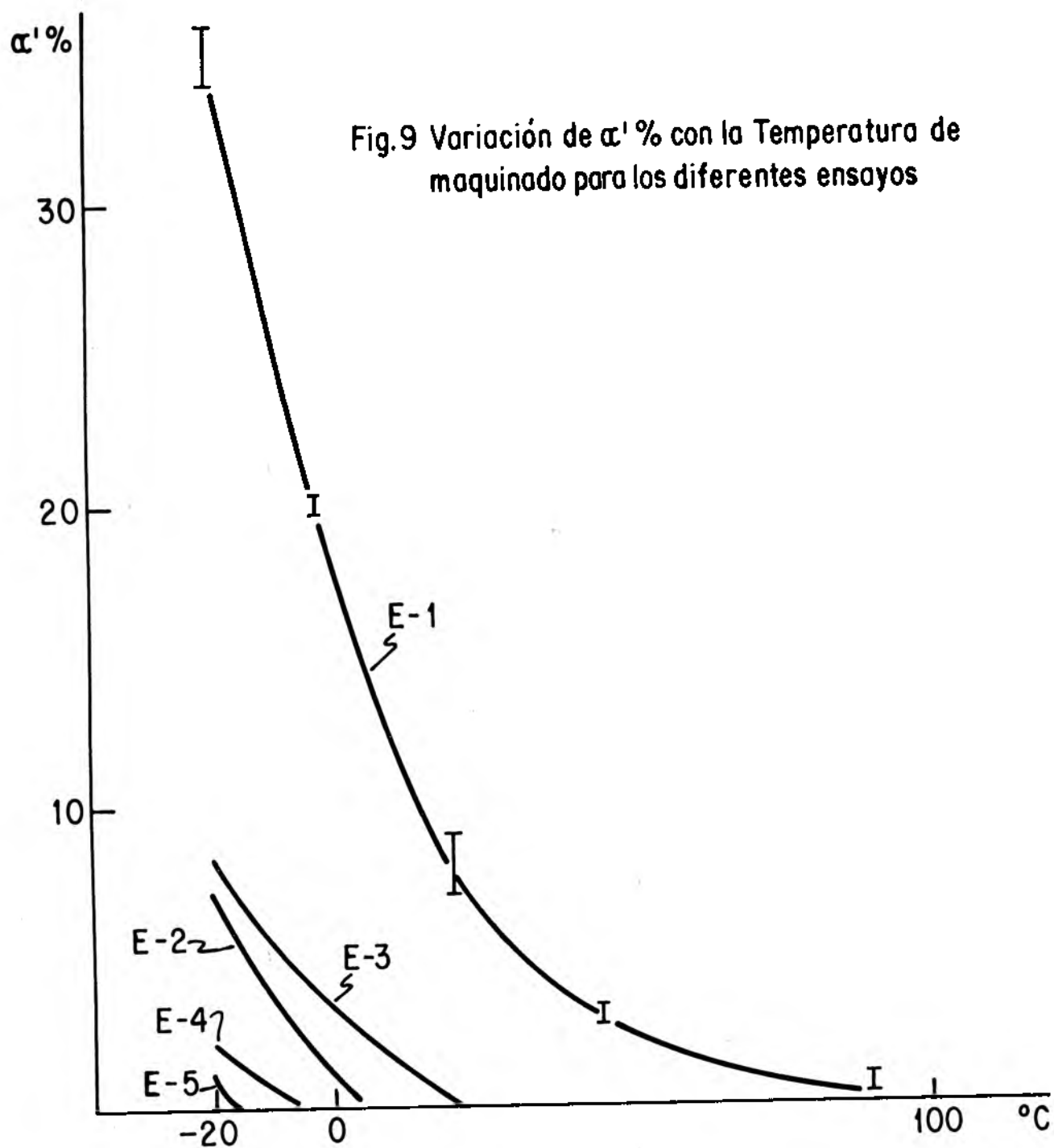


Fig. 8 Temperatura en función de la distancia a la superficie de corte

Fig.9 Variación de α' % con la Temperatura de maquinado para los diferentes ensayos



Esquema de trabajo

	Ensayo	Herramienta Δ corte	Velocidad	Temp. de ensayo °C				
				-20	0	18	45	90
ACERO 7	E-1	-	V ₁	X	X	X	X	X
	E-2	+	V ₁	X	X	X		X
	E-3	-	V ₂	X	X	X		X
ACERO 5	E-4	-	V ₁	X	X	X	X	X
	E-5	+	V ₁	X	X	X	X	X

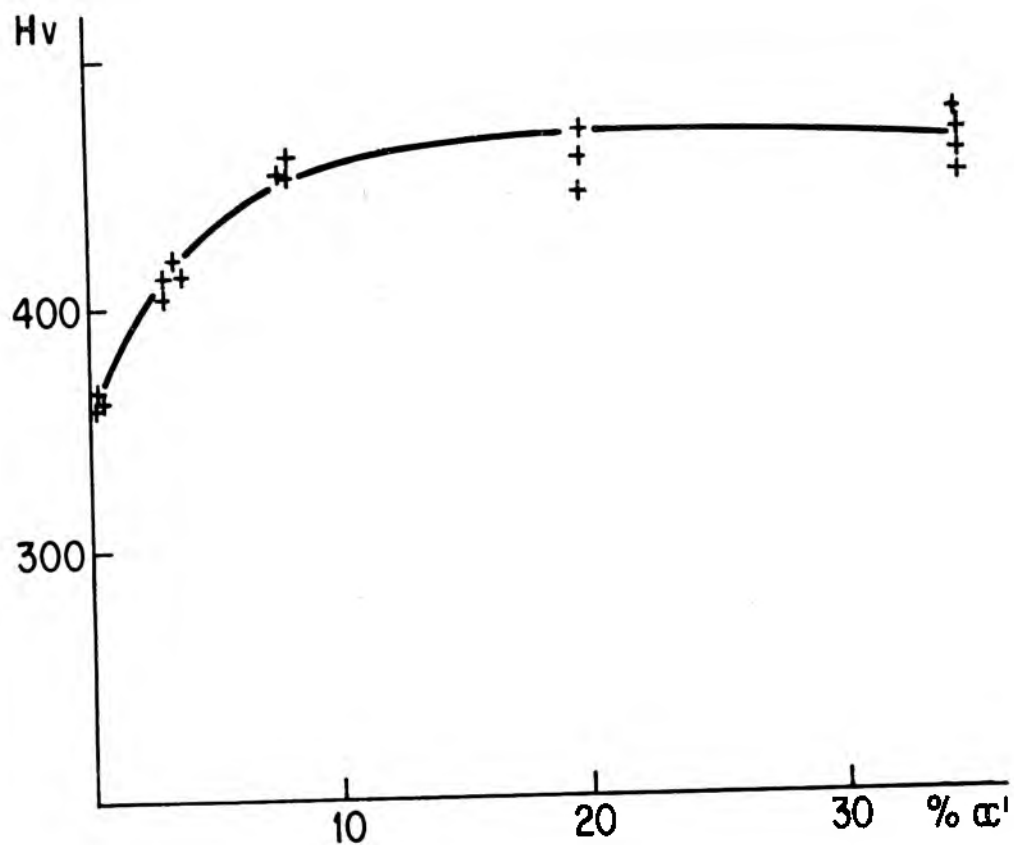


Fig.10 Relación entre % α' sup. y dureza sup. Carga constante 25g

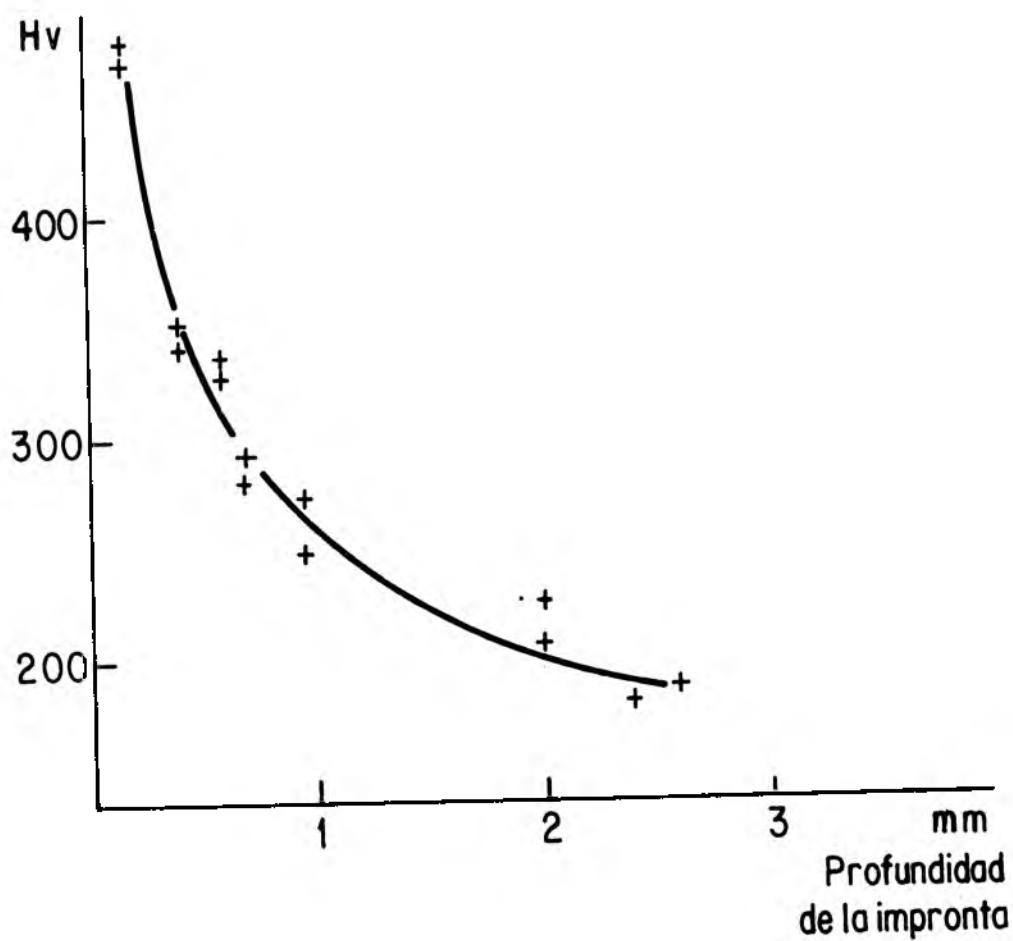


Fig.11 Variación de dureza superficial segun la carga aplicada

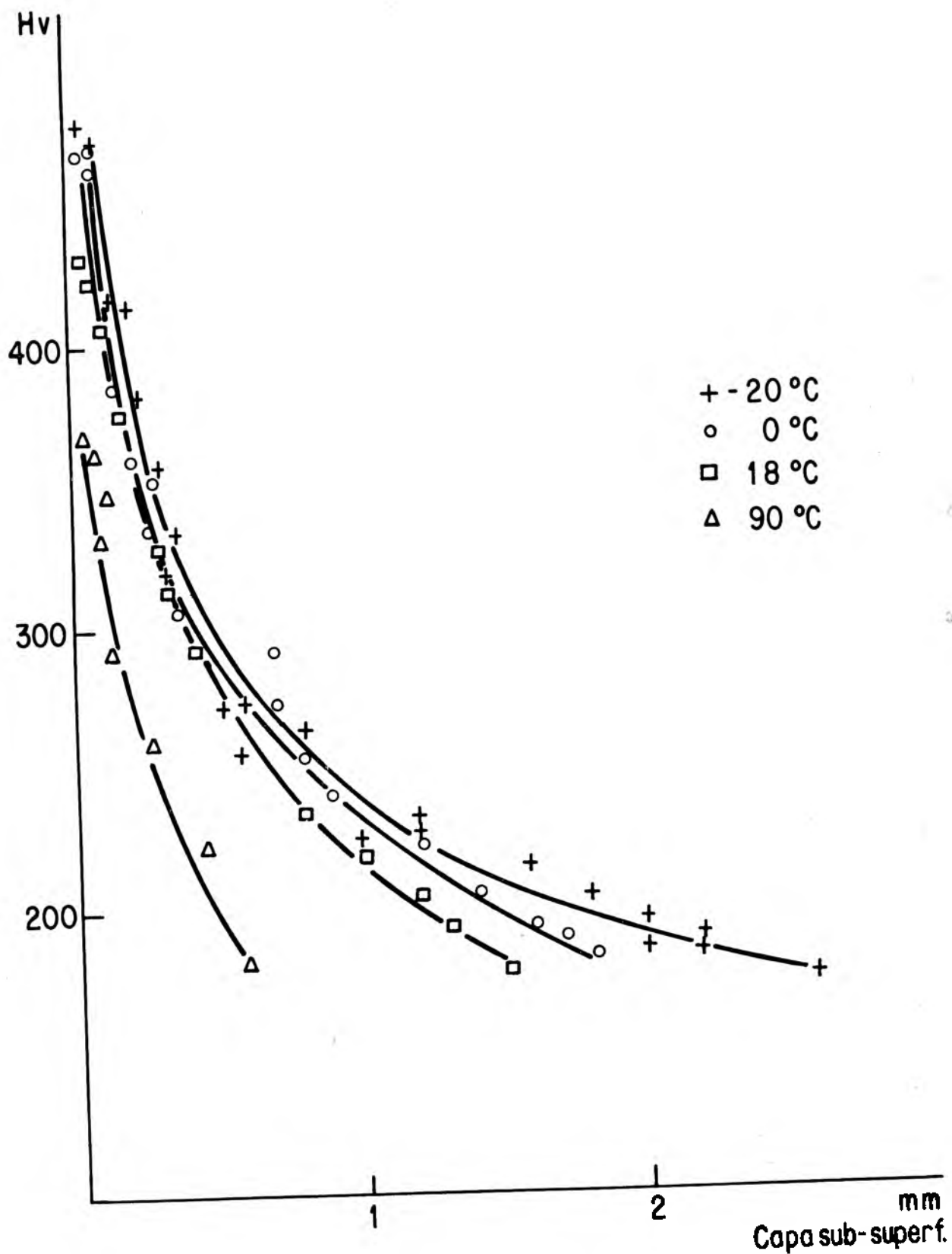


Fig.12 Perfil de penetración de dureza en un corte transversal en probetas maquinadas en condiciones E-1

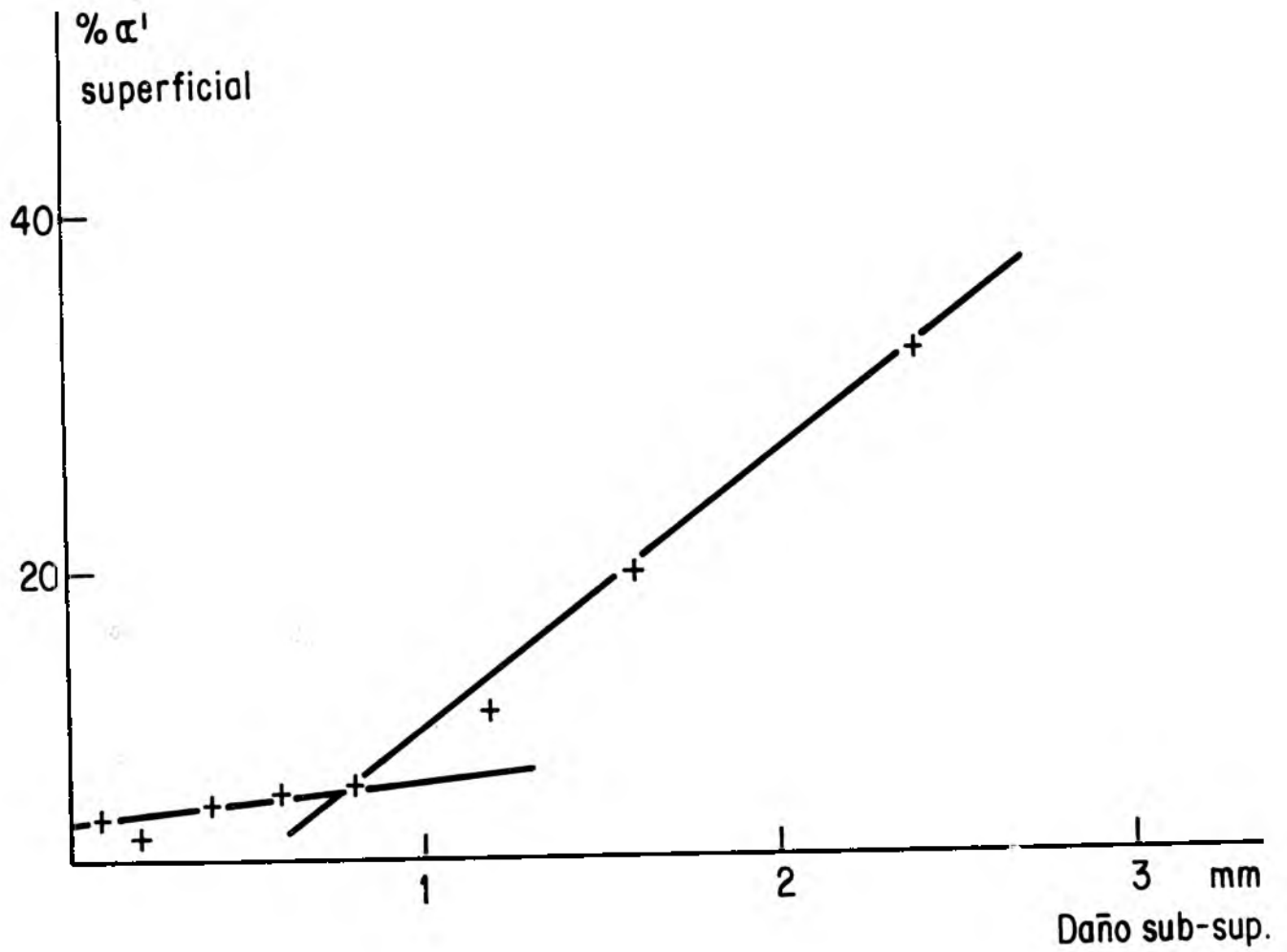


Fig.13 Relación entre % α' medido en superficie y espesor de la capa sub-superficial medida en un corte transversal.

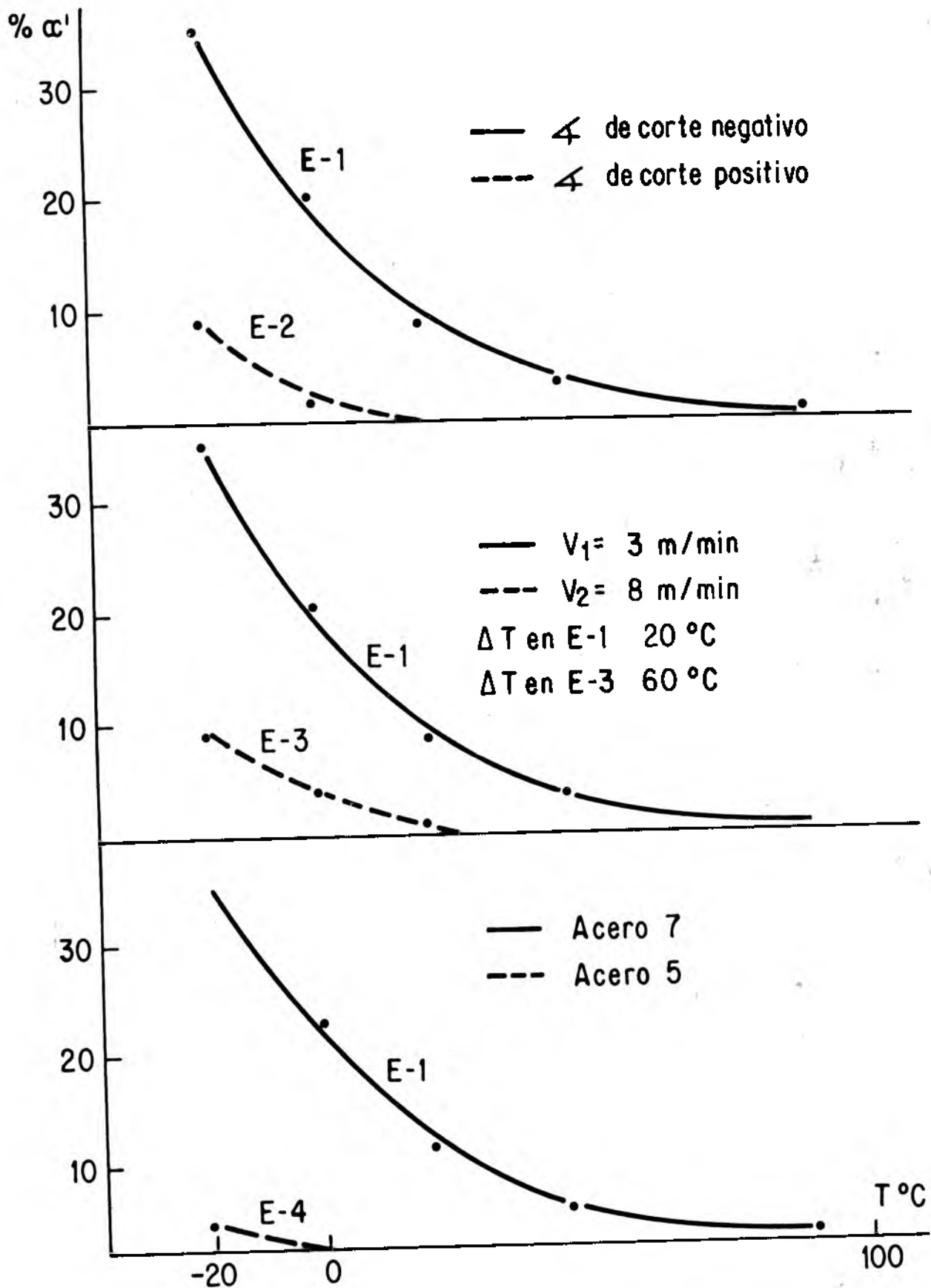
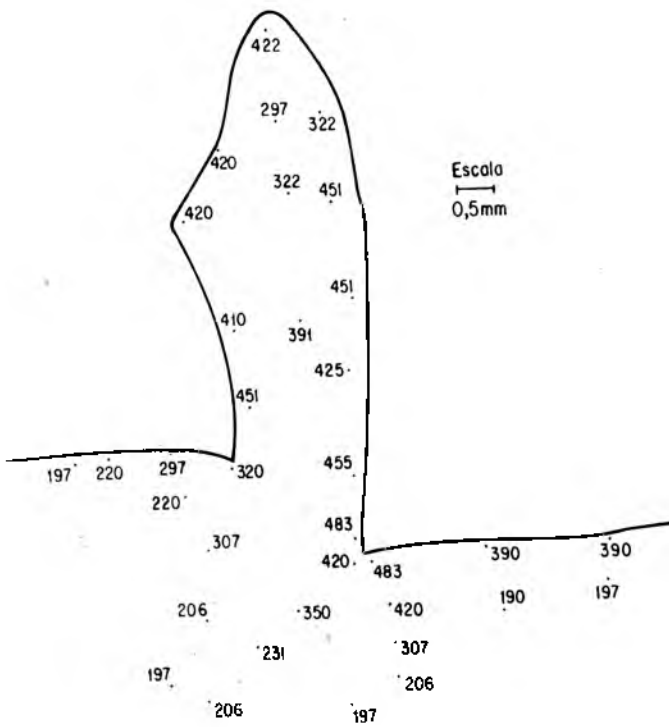
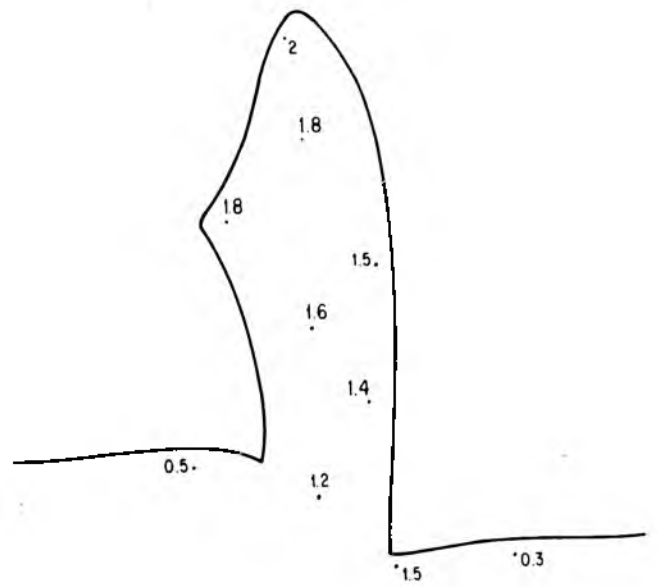


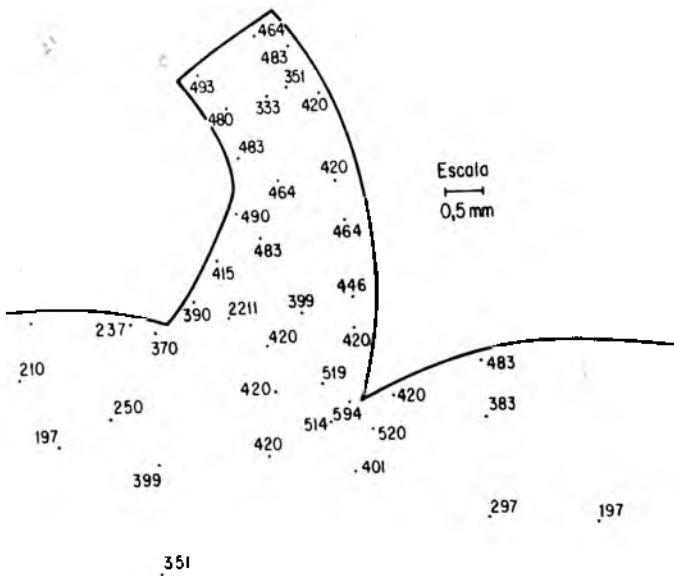
Fig. 14 Resultados comparativos entre los materiales ensayados y las variables de maquinado.



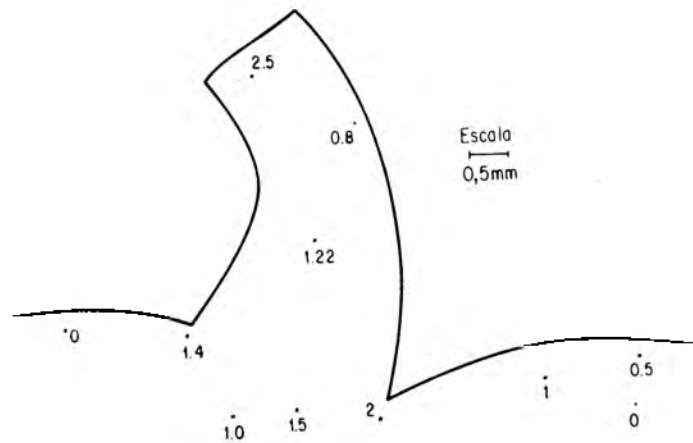
Herramienta con ángulo de corte positivo. Velocidad de corte 3 m/min
Fig. 15b Mapa de microdurezas de viruta congelada. Corte transversal.



Herramienta con ángulo de corte positivo. Velocidad de corte 3 m/min
Fig. 16 b Porcentaje de martensita α' en un corte transversal de viruta congelada



Herramienta con ángulo de corte negativo. Velocidad de corte 3 m/min
Fig. 15a Mapa de microdurezas de viruta congelada. Corte transversal.



Herramienta con ángulo de corte negativo. Velocidad de corte 3 m/min
Fig. 16 a Porcentaje de martensita α' en un corte transversal de viruta congelada.

MICROSCOPIA ELECTRONICA DE TRASMISION DE SUPERFICIES
MAQUINADAS A DIFERENTES TEMPERATURAS

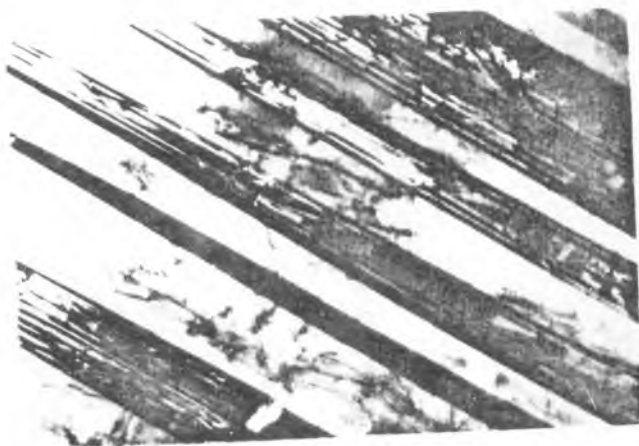


Fig.-17 Maq. -20 °C x 40 000



Fig.-18 Maq. -20 °C x 40 000

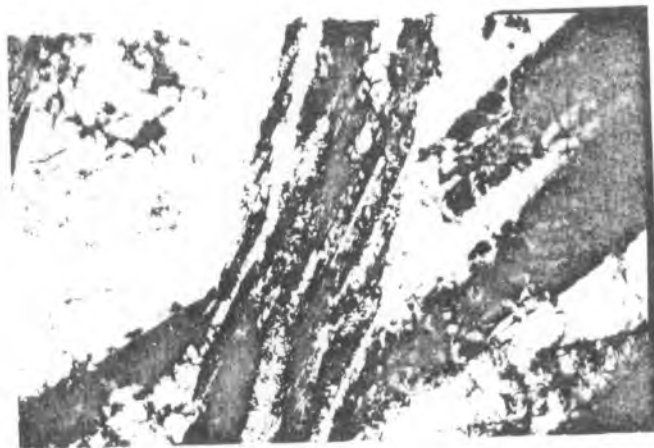


Fig.-19 Maq. 0 °C x 40 000

MICROESTRUCTURA DE VIRUTA OBTENIDA CON CONDICIONES
DE TRABAJO E-1

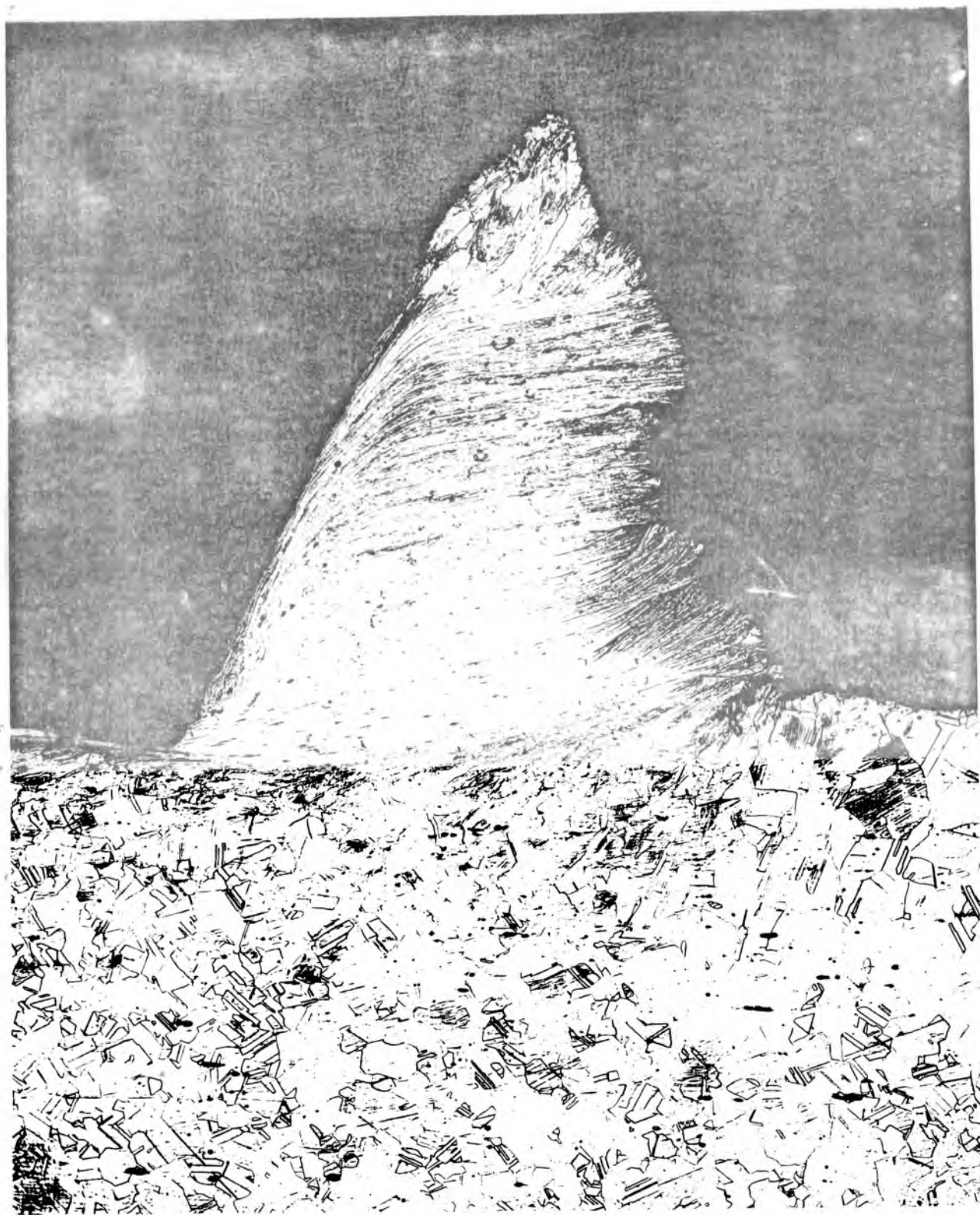


Fig.- 20 Material : Acero 7