

UNIVERSIDAD AUTONOMA
DE
QUERETARO

Facultad de Ciencias Químicas

ESTUDIO SOBRE UN PROCESO DE RECOCIDO
CONTINUO PARA LAMINA DE ACERO BAJO CARBONO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE

QUIMICO METALURGICO

P R E S E N T A

Ma. Antonia Carvajal García

J50098

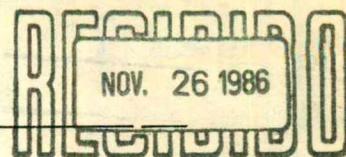
QUERETARO, QRO. DE 1985



J50098

No. Adv. 31
No. Título _____
Ctes. _____

FACULTAD DE QUIMICA
BIBLIOTECA



UNIVERSIDAD AUTONOMA U. A. Q. ✦
DE
QUERETARO

Facultad de Ciencias Químicas

ESTUDIO SOBRE UN PROCESO DE RECOCIDO
CONTINUO PARA LAMINA DE ACERO BAJO CARBONO

T E S I S A

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE

 QUIMICO METALURGICO

P R E S E N T A

Ma. Antonia Carvajal García

QUERETARO, QRO. DE 1985

No. Adq. 150098

No. Título _____

Clas. 672.36

0331e

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE
QUERÉTARO

Facultad de Ciencias Químicas

CONTENIDO PARA LAMINA DE ACERO BAJO CARGA

T E S I S

DE GRADO PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO

EN

La Facultad de Ciencias Químicas

QUERÉTARO, QRO. DE 1982

INDICE

CONTENIDO	PAGINA
RESUMEN	1
INTRODUCCION	3
PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	4
RESULTADOS EXPERIMENTALES	6
1: Primera recristalización	6
II: Deformación y 2- recristalización	11
CONCLUSIONES	30
SUGERENCIAS	31
BIBLIOGRAFIA	32

RESUMEN

El presente trabajo trata sobre un estudio de un ciclo de recocido continuo, el cual consta de dos ciclos de recocido y una deformación intermedia con el fin de obtener un producto con buena formabilidad para estampado.

Para lograr esto, se maneja una serie de variables, como son: tamaño de grano inicial, temperatura de recocido y porcentaje de deformación intermedia.

El primer ciclo de recocido se estudió a varias temperaturas y tiempos de permanencia para determinar el tiempo necesario para recrystalizar el material a cada temperatura. Se encontró que a 700 C bastan dos minutos para recrystalizar completamente el material.

Para encontrar el efecto buscado en la deformación intermedia, se sometió el material a una deformación controlada en niveles bajos, de 3 a 30%, con el fin de lograr un tamaño de grano adecuado después del segundo recocido.

Las pruebas se efectuaron sobre dos tamaños de grano iniciales; el tamaño de grano I se obtuvo con un recocido de 5 minutos a 700 C, el tamaño de grano II con un recocido de 24 horas a 700 C. En los resultados del estudio se encontró diferencia en las propiedades mecánicas de estos materiales, pero considerando el mayor tiempo de permanencia empleado en el tamaño de grano II, esta diferencia pasa a ser secundaria, por lo que el ciclo de recocido continuo se considera posible.

Para el segundo recocido se usaron probetas con diferentes grados de deformación, y diferentes temperaturas de recocido, el tiempo de permanencia de todas las pruebas fue de 5 minutos. Se comprobó que la deformación precedente si influye considerablemente en las propiedades finales, obteniéndose resultados dentro de rangos aceptables para las propiedades mecánicas medidas favorables para un intervalo de deformación entre 15 y 25% para temperaturas de 705 a 715 C (ver tabla 3). El tamaño de grano óptimo para obtener buena formabilidad oscila entre 5 y 6 (No. ASTM), este tamaño se logró con el recocido continuo a 705 y 715 C para deformaciones menores a 25%.

Este proceso por lo tanto se considera factible desde el punto de vista metalúrgico ya que es capaz de dar un producto con características similares

a las de un material recocido por lotes, por lo tanto puede llegar a competir con otros productos de otros procesos existentes.

De aquí, que este estudio resulte atractivo para analizarlo más profundamente con el fin de lograr un proceso de aplicación industrial.

INTRODUCCION

En el estudio bibliográfico sobre recocido continuo de láminas de acero bajo carbono se vió que es necesario tener un tamaño de grano adecuado para obtener buena formabilidad en una lámina recocida.

Por las características del recocido continuo convencional de un rápido calentamiento, corto tiempo de permanencia y rápido enfriamiento, el acero recristaliza rápidamente y nos da un tamaño de grano fino, el cual no engruesa apreciablemente aunque se aumente el tiempo a la temperatura de permanencia.

Se han estudiado varios métodos para obtener un tamaño de grano apropiado mediante un recocido continuo. Uno de los postulados de la recristalización es que el tamaño de grano recristalizado es más grueso cuando se tiene una menor reducción en frío precedente al recocido.

Esto se cumple en el acero recocido continuamente y puede considerarse práctico y concebible que una reducción en frío de 15 a 25% antes del recocido en lugar de la práctica usual de 50-70%, puede dar el tamaño de grano deseado.(3).

En este postulado se basa este trabajo, el cual propone un ciclo de recocido continuo con una deformación intermedia, la cual se controla en bajos porcentajes para obtener una lámina de acero con buena formabilidad.

El objetivo de este trabajo es investigar los efectos reales de esta deformación para ver la posibilidad de aplicación de este método para la producción de lámina de acero para estampado.

El aspecto económico del proceso no se discute en este trabajo.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.

El material usado para este estudio fue un acero al carbono con una deformación en frío de 60-70%, La tabla I da la composición química del acero utilizado.

TABLA I: Composición química del acero.

Elemento	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Al
Contenido (%)	0.054	0.005	0.354	0.008	0.017	0.026	0.033	0.006	0.028	0.001

El espesor promedio del material deformado en frío fue de 0.88 milímetros Las muestras se recocieron en un horno Lindberg. Las probetas de tensión se prepararon en una máquina Tensile Kut y las pruebas se realizaron en una máquina Instron.

El ciclo de recocido propuesto puede verse en la figura I. Este ciclo --- consta de los siguientes pasos.

1) La materia prima se recoció hasta obtener muestras totalmente recristalizadas, con distintas relaciones de tamaño de grano. Una parte de las probetas

se recoció por 24 horas a la temperatura de recristalización y otra parte por sólo 5 minutos.

2) Todas las muestras se sometieron a diferentes grados de deformación para estudiar el efecto de la deformación intermedia en el recocido final.

3) Las muestras deformadas fueron finalmente tratadas térmicamente para recristalizarlas completamente.

4) Al producto final se le determinaron tamaño de grano, dureza, límite elástico, resistencia máxima a la tensión, Elongación y relación elástica.

En base a los datos obtenidos se determinó el efecto de las diferentes temperaturas de recocido y grados de deformación en las propiedades mecánicas -- del material, así como el efecto del tamaño de grano obtenido en el primer recocido.

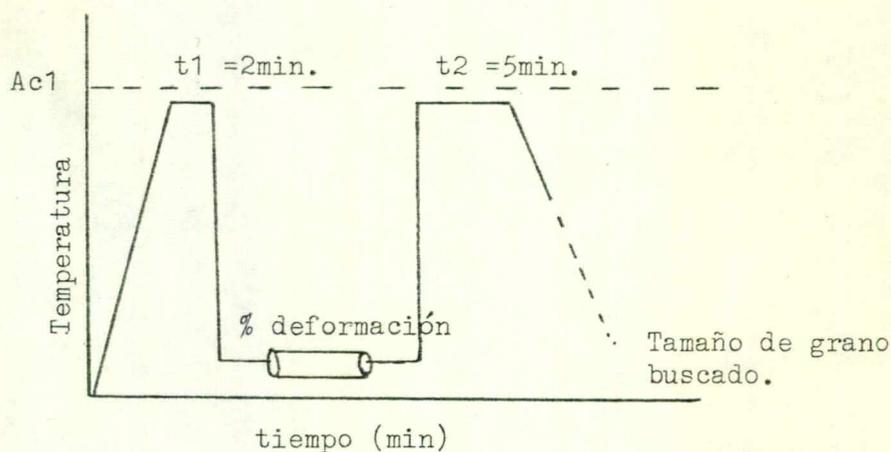


Fig. I.- Ciclo de recocido propuesto

RESULTADOS EXPERIMENTALES

La parte experimental se dividió en dos partes. La primera parte del tratamiento para estudiar el efecto de la temperatura y tiempo de recristalización sobre el tamaño de grano y dureza del material. La segunda parte del trabajo fue para estudiar el efecto de una deformación intermedia en la segunda recristalización sobre dos tamaños de grano iniciales.

PARTE A

PRIMERA RECRISTALIZACION.

Esta parte corresponde a la primera recristalización del proceso propuesto sobre la lámina con una deformación de 60-70%. Se estudiaron varias temperaturas de recocido y diferentes tiempos de permanencia a cada una de ellas. La dureza inicial de la lámina deformada fue de 82 Rockwell 30T.

Para una deformación precedente particular, la recristalización ocurrirá más rápidamente conforme se eleva la temperatura de recocido. Esto se debe -- propiamente a que las diferentes etapas del recocido son procesos activados -- térmicamente y al elevar la temperatura de recocido la energía almacenada durante la deformación se libera más rápidamente (4).

7

La gráfica 1 nos muestra en una curva isocrónica el efecto de la temperatura de recocido sobre la dureza superficial de la lámina de acero.

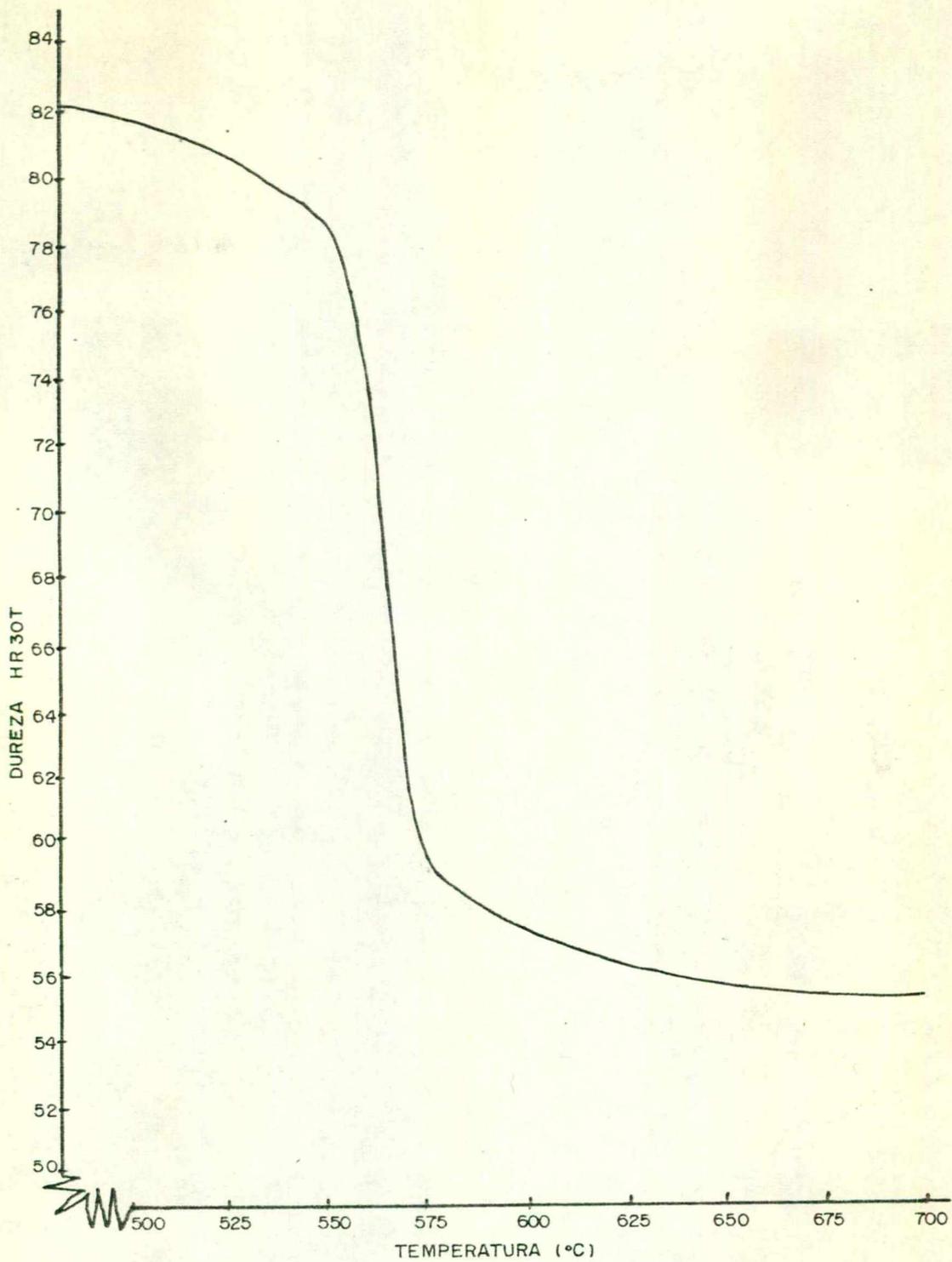
En la gráfica puede verse que la recristalización empieza hasta los 550°C siendo necesaria una temperatura de aproximadamente 650°C para lograr la recristalización completa en 10 minutos.

La gráfica 2 nos muestra varias curvas isócronas para comparar el efecto de la temperatura de recocido sobre la dureza a diferentes tiempos de permanencia. De acuerdo a esta gráfica, a mayor temperatura de recocido se requiere menos tiempo para recristalizar completamente el material.

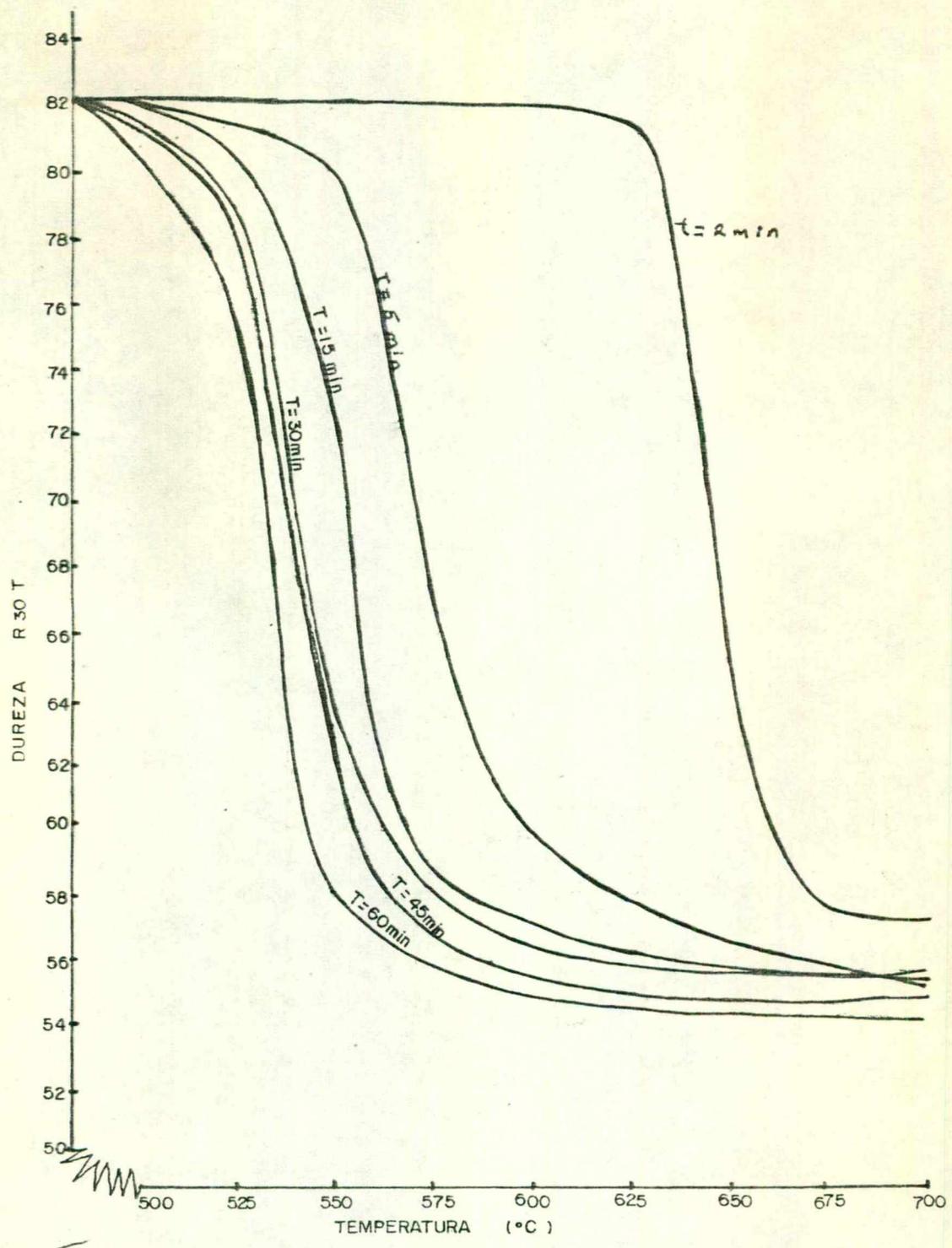
La gráfica 3 nos muestra el efecto del tratamiento a 700°C sobre la dureza del material a diferentes tiempos de permanencia. Se observa que entre 2 y 60 minutos de permanencia sólo hay una diferencia en dureza de 3 R30T, por lo que dos minutos se considera un tiempo de permanencia suficiente a esta temperatura para la recristalización completa del material deformado en frío. Esta pequeña diferencia se debe a que en ese lapso de 2 a 60 minutos, el tamaño de grano varió solo de un promedio de 7 a 8 (No ASTM) para 60 minutos a un tamaño de grano 8.5 para dos minutos.

En general, los resultados de esta primera parte ajustan perfectamente con lo esperado de acuerdo a la teoría de recristalización.

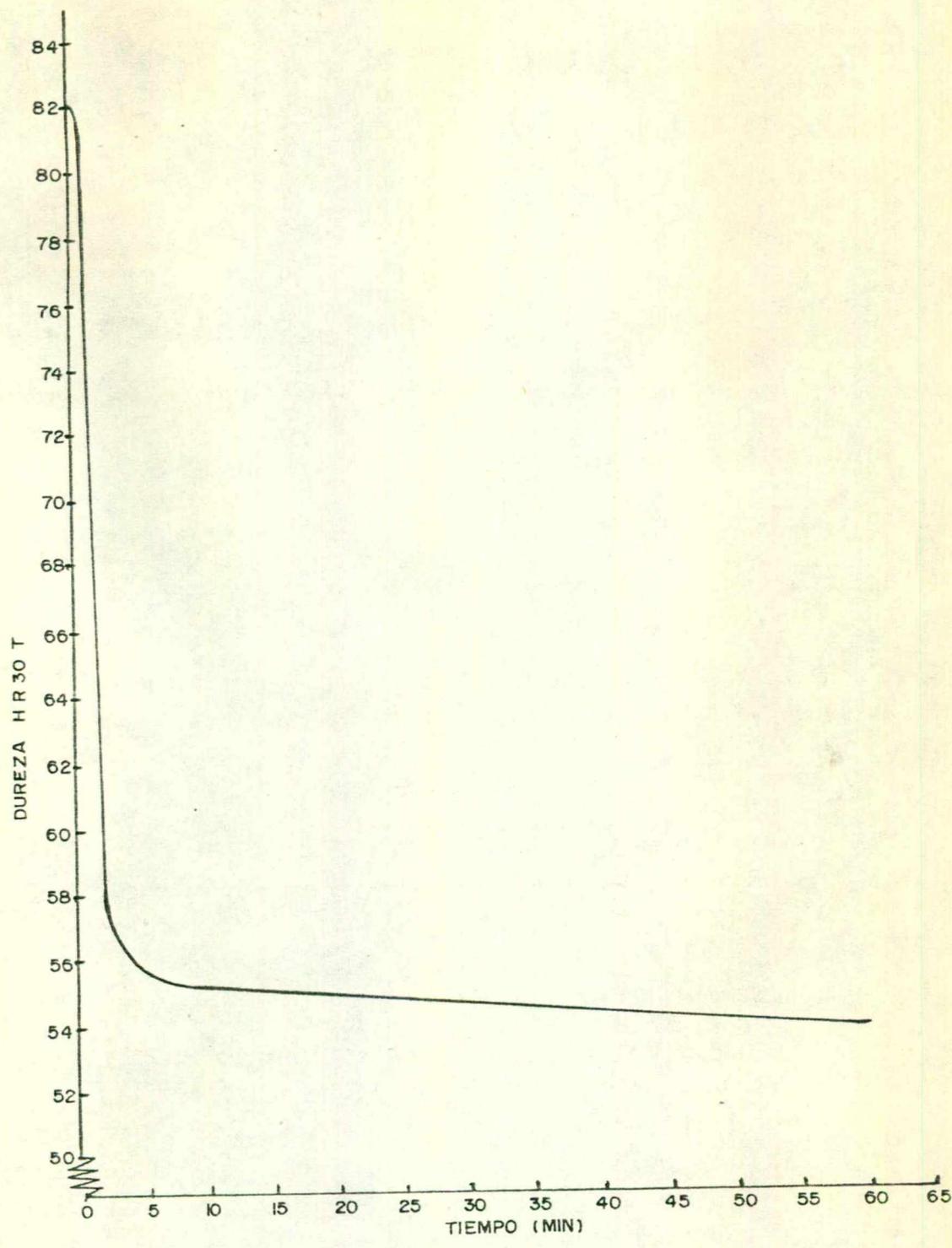
Las conclusiones de esta etapa indican que es apropiado usar una temperatura de recristalización de 700°C con un tiempo de permanencia de 2 minutos en el primer recocido del proceso..



GRAFICA I: Efecto de la temperatura de recocido sobre la dureza superficial de la lámina.



GRAFICA 2: Gráfica comparativa mostrando el efecto de la temperatura de recocido sobre la dureza.



GRAFICA 3.- Efecto del tratamiento térmico (isotérmico) sobre la dureza del material.

PARTE II

DEFORMACION Y SEGUNDA RECRISTALIZACION.

En esta etapa de la investigación, se estudió el efecto de la deformación intermedia en el segundo recocido. El estudio se hizo para dos diferentes tamaños de grano iniciales, variando las temperaturas de permanencia.

El material proveniente del laminado en frío (deformado de 60-70% aprox.), se dividió en dos lotes y se sometió a dos diferentes tratamientos térmicos, - un lote se calentó a 700°C, se dio un tiempo de 10 minutos, que es el tiempo en que se estabiliza completamente la temperatura del horno; Se dejó la carga a esa temperatura por 5 minutos, enfriándose después en agua con hielo y almacenando el material en un congelador, con el fin de prevenir lo más posible - el fenómeno de envejecimiento por temple que sufren algunos aceros a temperatura ambiente después de un enfriamiento rápido. Este tratamiento nos dio un producto con un tamaño de grano denominado I. El material del otro lote se sometió a un ciclo como el anterior, con la única diferencia de que el tiempo de permanencia fue de 24 horas, este segundo ciclo nos dio un producto con un tamaño de grano denominado II.

Las probetas de los dos lotes se sometieron posteriormente a una deformación determinada y un recocido a una temperatura de permanencia específica.

RECRISTALIZACION

La recristalización hace que las propiedades mecánicas y físicas del metal deformado regresen a aquellas del estado libre de deformación. Las propiedades mecánicas tales como dureza, límite elástico y resistencia máxima a la tensión se alteran drásticamente en un pequeño rango de temperatura durante la recristalización. La recristalización es un fenómeno de nucleación y crecimiento; - en un proceso normal de recocido por lotes, el material empieza a recristalizar formando núcleos libres de deformación, los cuales empiezan a crecer en el material deformado absorbiendo gradualmente el total de la matriz deformada, - dando como resultado de la recristalización un material sin deformar(4). En el proceso de recocido continuo convencional la recristalización ocurre rápidamente a temperatura relativamente baja y ninguna absorción de grano tiene lugar por lo que resulta en granos uniformemente finos y equiáxicos (8).

El principal problema del recocido continuo es pues, lograr un tamaño de -- grano más grueso. Esto es lo que se intenta en esta etapa haciendo uso de una deformación intermedia para controlar el tamaño de grano deseado en el segundo recocido. Los resultados obtenidos se discuten desde el punto de vista de la - influencia de las principales variables involucradas en esta parte del proceso, como son: porcentaje de deformación intermedia, tamaño de grano inicial y temperatura de recocido.

PORCENTAJE DE DEFORMACION:

En general, conforme se incrementa el grado de trabajo en frío el metal recristaliza más rápidamente. A deformaciones más pequeñas, se crean pocos nú---cleos por unidad de volumen y, el tiempo necesario para la formación de nú---cleos es mayor. El menor número de núcleos conduce a un grano recristalizado - más grueso. Por lo tanto, si la cantidad de deformación se reduce, se puede - lograr en un recocido continuo el tamaño de grano deseado. Sin embargo, al reducir esta deformación, se puede llegar a la deformación crítica, que es la de formación mínima necesaria para iniciar la recristalización, y puede dar un - tamaño de grano extremadamente grueso al final de la transformación. En el recocido los granos gruesos son formados en las regiones de baja deformación y la tendencia del tamaño de grano recristalizado es a disminuir progresivamente cuando la deformación es relevada. El efecto total de una deformación preceden- te depende también de la temperatura de recocido y la composición del acero (4).

En el caso del acero usado para este trabajo, las gráficas 4 y 5 muestran el efecto del porcentaje de deformación sobre el límite elástico para -- varias temperaturas de recocido.

El límite elástico es una propiedad muy significativa en el acero y corresponde al límite a partir del cual el metal se deforma plásticamente. Un valor más bajo de esta propiedad es mejor si otras propiedades son favorables, por ejemplo, si el límite elástico es bajo por un tamaño de grano muy grueso, el acero presentará el problema de piel de naranja. El límite elástico superior se reporta cuando el acero exhibe una caída en carga en el límite elástico, - pero esta propiedad no es significativa, excepto para indicar una tendencia - del acero a sufrir deformación por estirado (7).

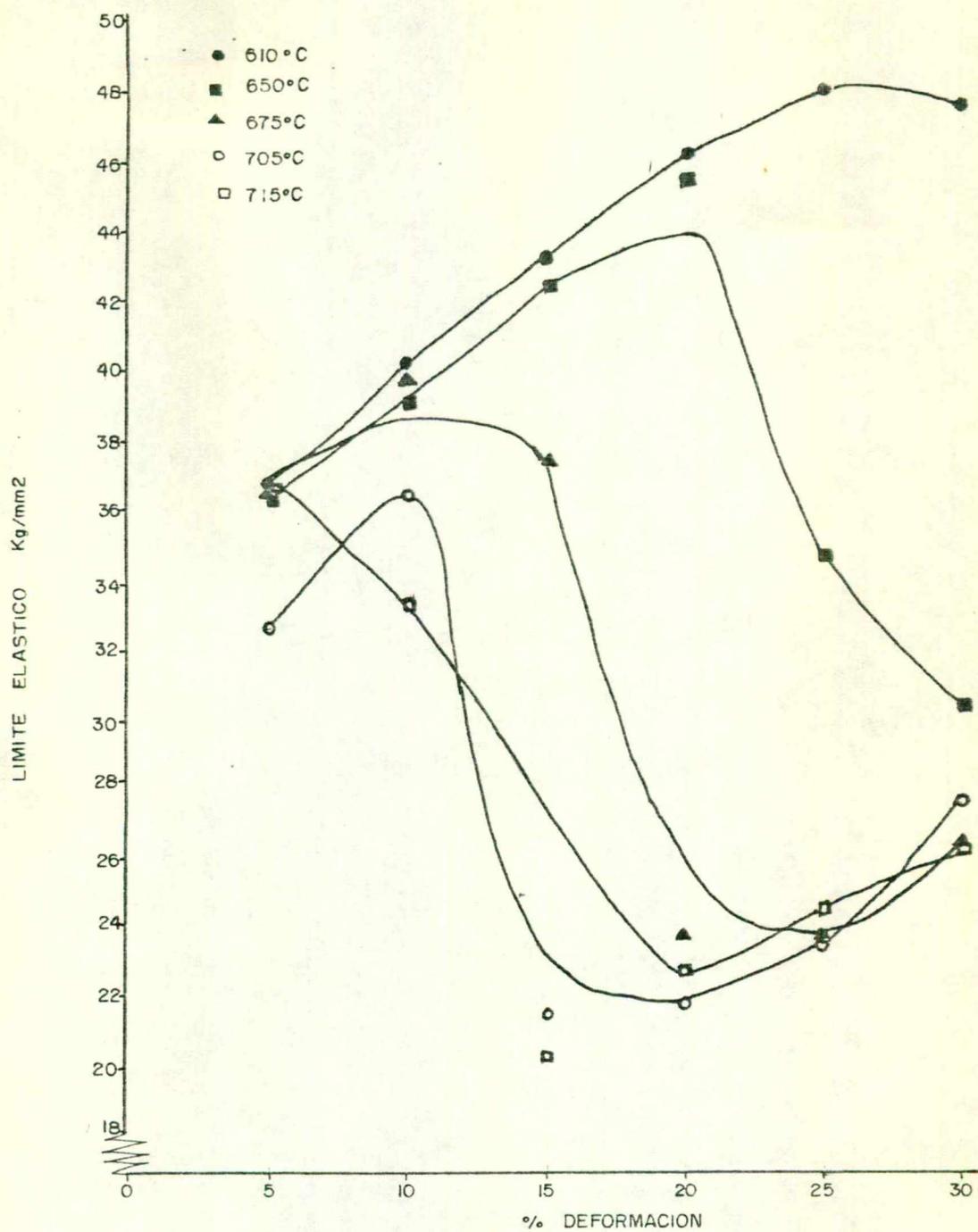
El acero utilizado en este trabajo presentó un comportamiento con bandas de Lüders (deformación por estirado o piel de naranja) en el ensayo de tensión. Las gráficas 4 y 5 muestran un comportamiento similar para el tamaño de grano 1 y II.

A temperaturas más bajas de recocido, el límite elástico aumenta conforme se aumenta el porcentaje de deformación. A temperaturas intermedias las curvas alcanzan un valor máximo de límite elástico después del cual vuelve a -- disminuir éste al aumentar el porcentaje de deformación. A temperaturas más -- altas presenta un comportamiento muy variado el cual puede ser debido a la -- presencia de un grano más grueso lo cual disminuye el límite elástico.

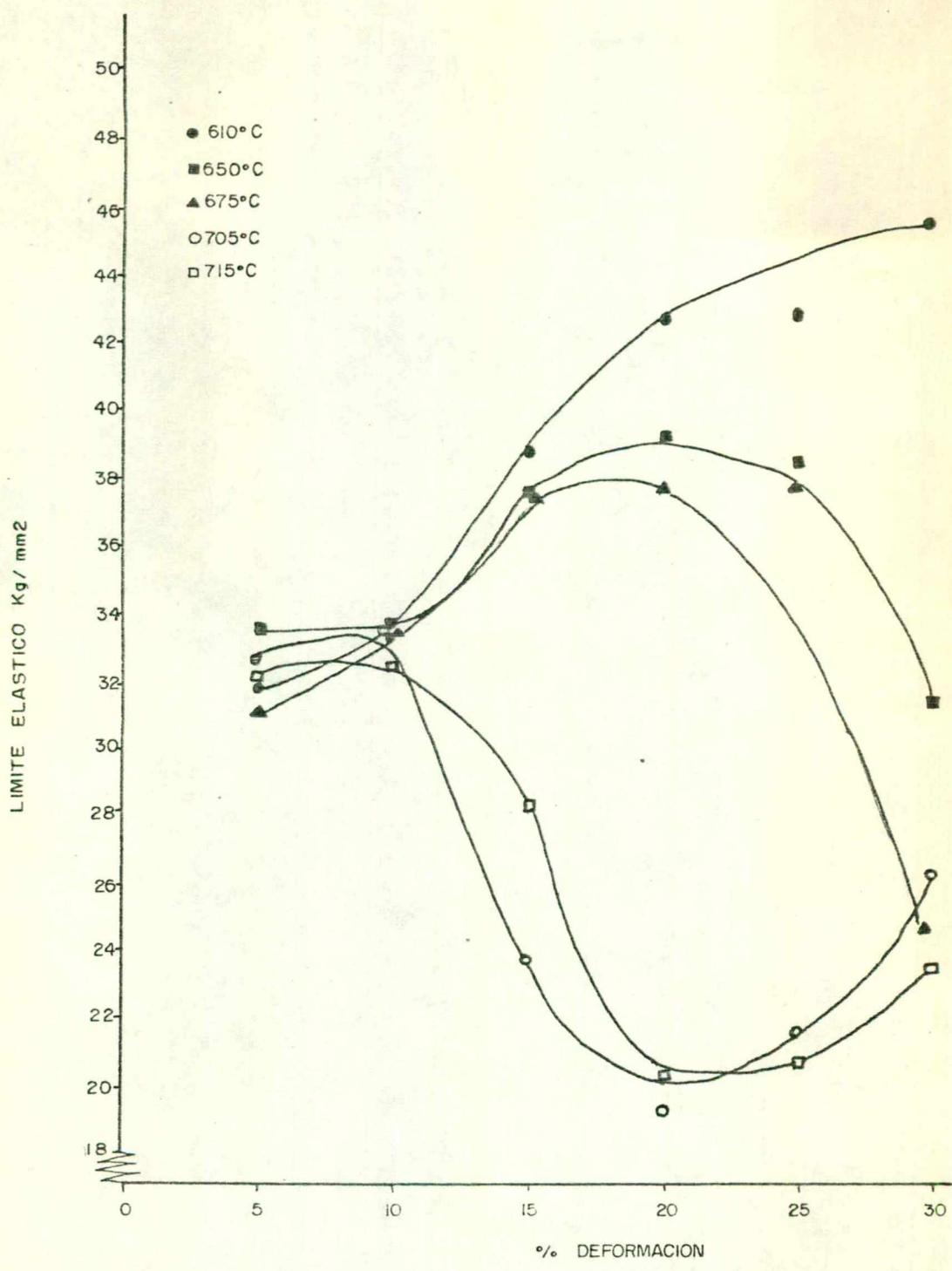
EFEECTO DE LA TEMPERATURA DE RECOCIDO:

Para una deformación precedente particular la recristalización ocurre más rápidamente conforme se eleva la temperatura (4). Las temperaturas más altas de ablandamiento prácticas se usan para reducir los tiempos a un mínimo, con la limitación metalúrgica impuesta por la temperatura crítica A1. El recocido sobre esta temperatura seguido de un enfriamiento lento puede presentar -- la formación de carburos intergranulares gruesos, los cuales bajo algunas cir -- cunstancias pueden disminuir la formabilidad (1). En el recocido continuo, -- las temperaturas más altas (sobre 723°C) , se usan para obtener materiales -- más duros (3). Otro efecto de elevar la temperatura de recocido es que la de -- formación crítica se reduce.

Las gráficas 6 y 7 muestran el efecto de la deformación intermedia y la -- temperatura de recocido sobre la resistencia máxima a la tensión,.



GRAFICA 4: Efecto de la deformación intermedia y la temperatura de recocido sobre el límite elástico para el tamaño de grano I.



GRAFICA 5.- Efecto de la deformación intermedia y la temperatura de recocido sobre el límite elástico para el tamaño de grano II.

La resistencia máxima a la tensión es una medida importante en la formabilidad; corresponde a la carga máxima soportada por el material anterior a la fractura en la probeta de tensión. A más alta resistencia a la tensión la formabilidad será mejor si otras propiedades son favorables, tales como un límite elástico bajo y un tamaño de grano adecuado. (7).

En las gráficas 6 y 7 puede verse que a menores temperaturas de recocido se obtuvieron valores mayores de resistencia máxima a la tensión, lo cual puede deberse a que no se recristalizó completamente el material. A bajas temperaturas este valor aumenta al aumentar el porcentaje de deformación debido a un tamaño de grano más fino. A mayores temperaturas el comportamiento es más variable siendo sin embargo similar para ambos tamaños de grano. A temperaturas sobre 700°C casi no hay diferencia en comportamiento para un mismo tamaño de grano y el valor de resistencia máxima a la tensión obtenido es más bajo.

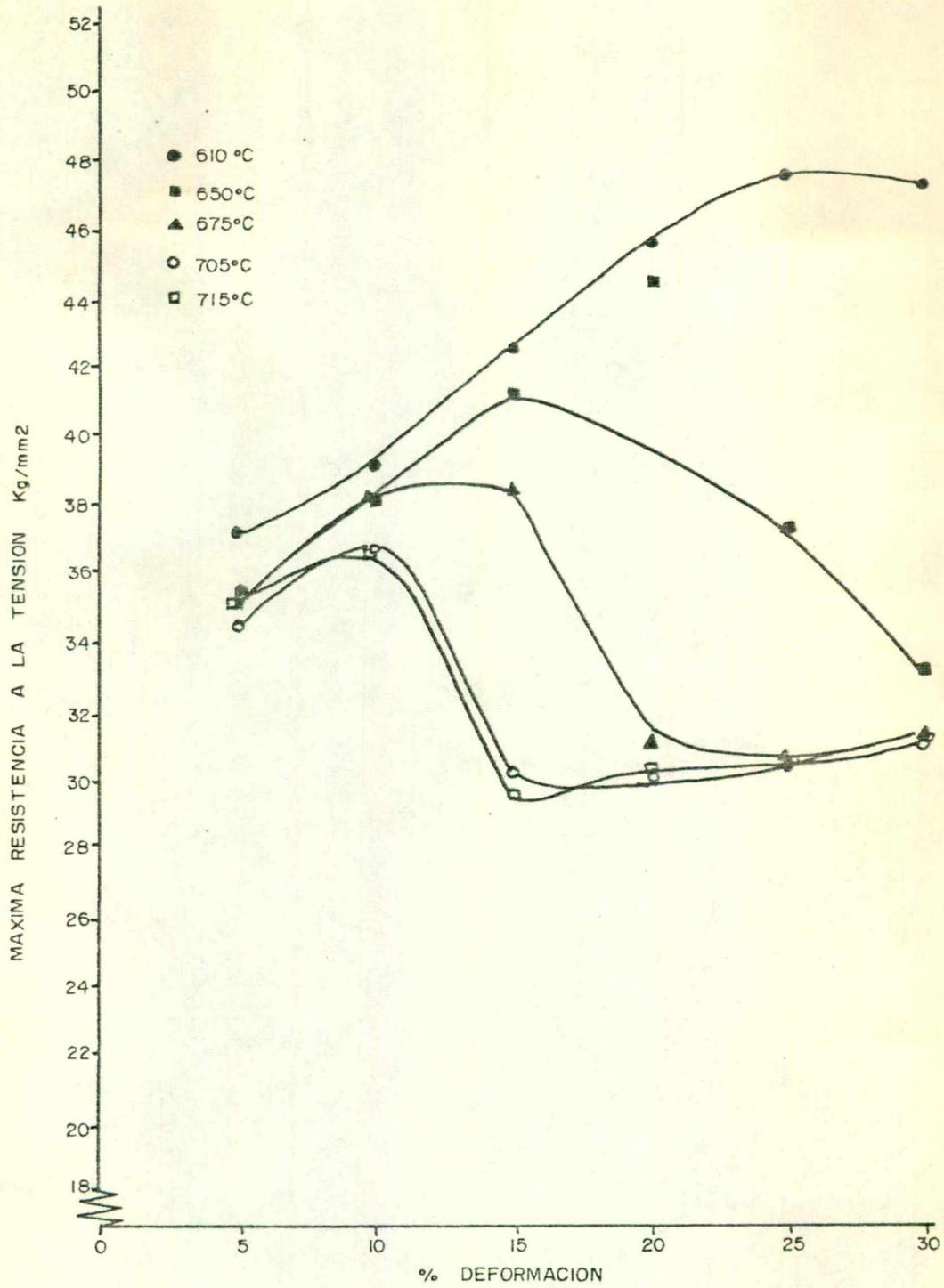
Las gráficas 8 y 9 muestran el efecto de la deformación intermedia y temperatura de recocido sobre el porcentaje de elongación.

El porcentaje de elongación es una medida de la ductilidad del acero en estirado y por lo tanto si otras propiedades son favorables, como una resistencia a la tensión alta y bajo límite elástico, el acero con más alto valor es el de mejor formabilidad (7).

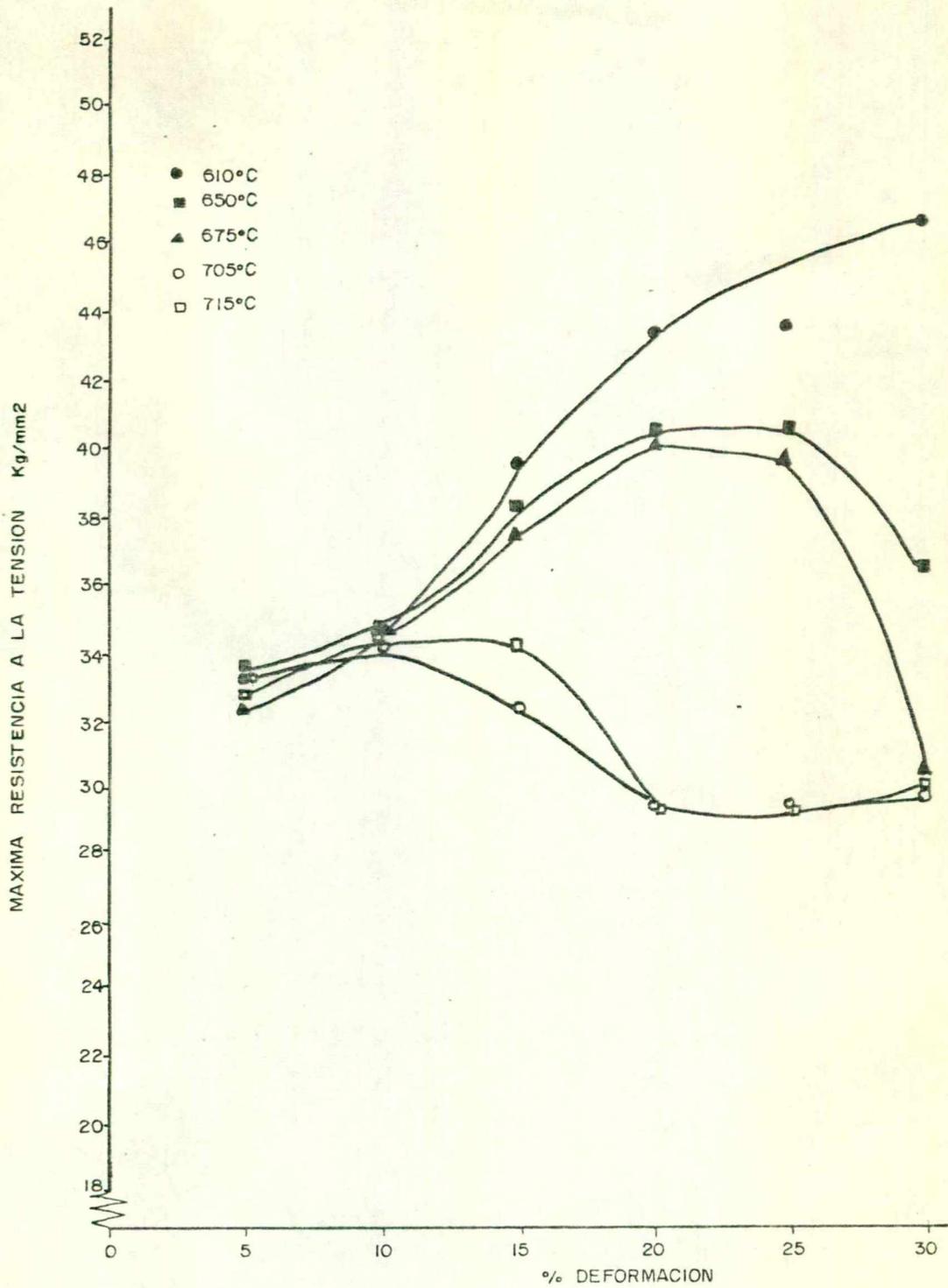
En las gráficas puede verse que a temperaturas más altas el comportamiento es más uniforme, disminuyendo la elongación del material conforme se aumenta el porcentaje de deformación, esto se debe principalmente al efecto de la variación en energía disponible para el crecimiento del tamaño de grano. Los porcentajes de elongación son más altos para el tamaño de grano II, lo cual era de esperarse, ya que este material tiene un grano más grueso por el mayor tiempo de permanencia a la temperatura de recocido.

Las gráficas 10 y 11 muestran el efecto de la deformación intermedia y la temperatura de recocido sobre la relación elástica. Esta relación es un valor importante para cualquier tipo de estiramiento severo, y consiste en la relación del límite elástico sobre la resistencia máxima a la tensión. A más bajo valor de esta relación es mayor la diferencia entre la resistencia a la tensión y el límite elástico y por lo tanto el acero será más adecuado para conformados severos (7).

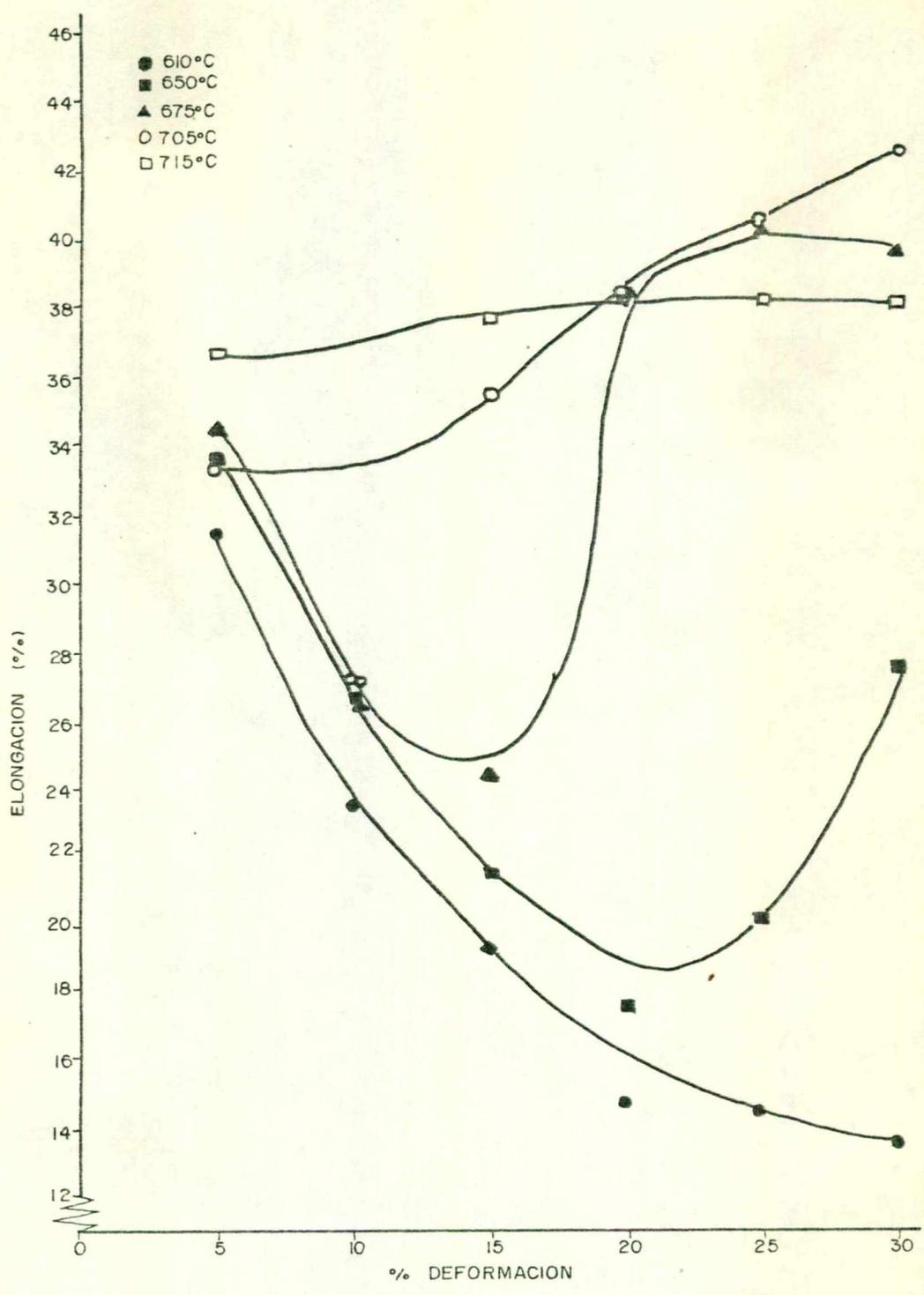
Estas gráficas muestran que el recocido a bajas temperaturas da valores altos de la relación elástica y el valor disminuye después de la deformación crítica.



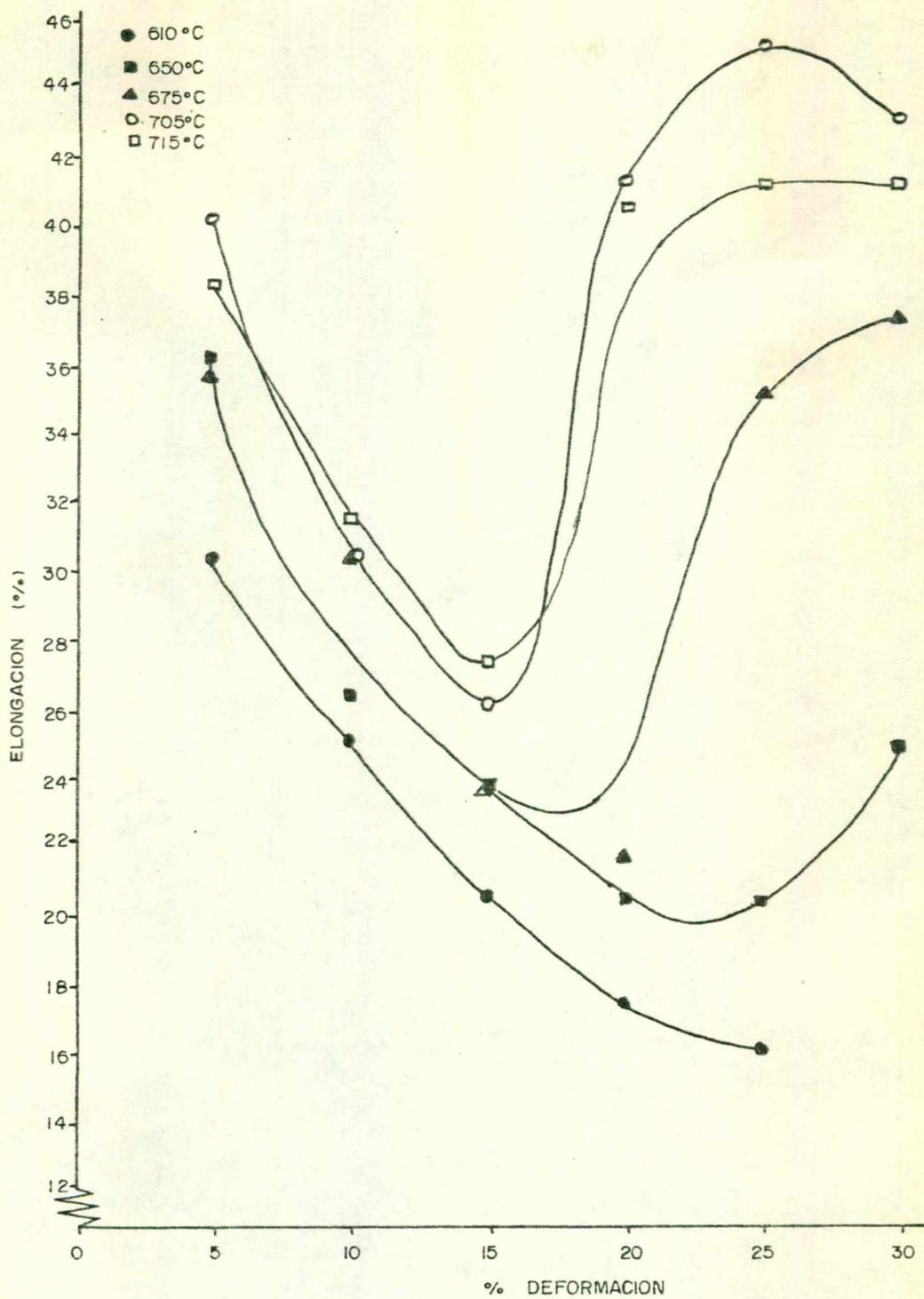
GRAFICA 6.- Efecto de la deformación intermedia y la temperatura de recocido sobre la resistencia máxima a la tensión para el tamaño de grano I.



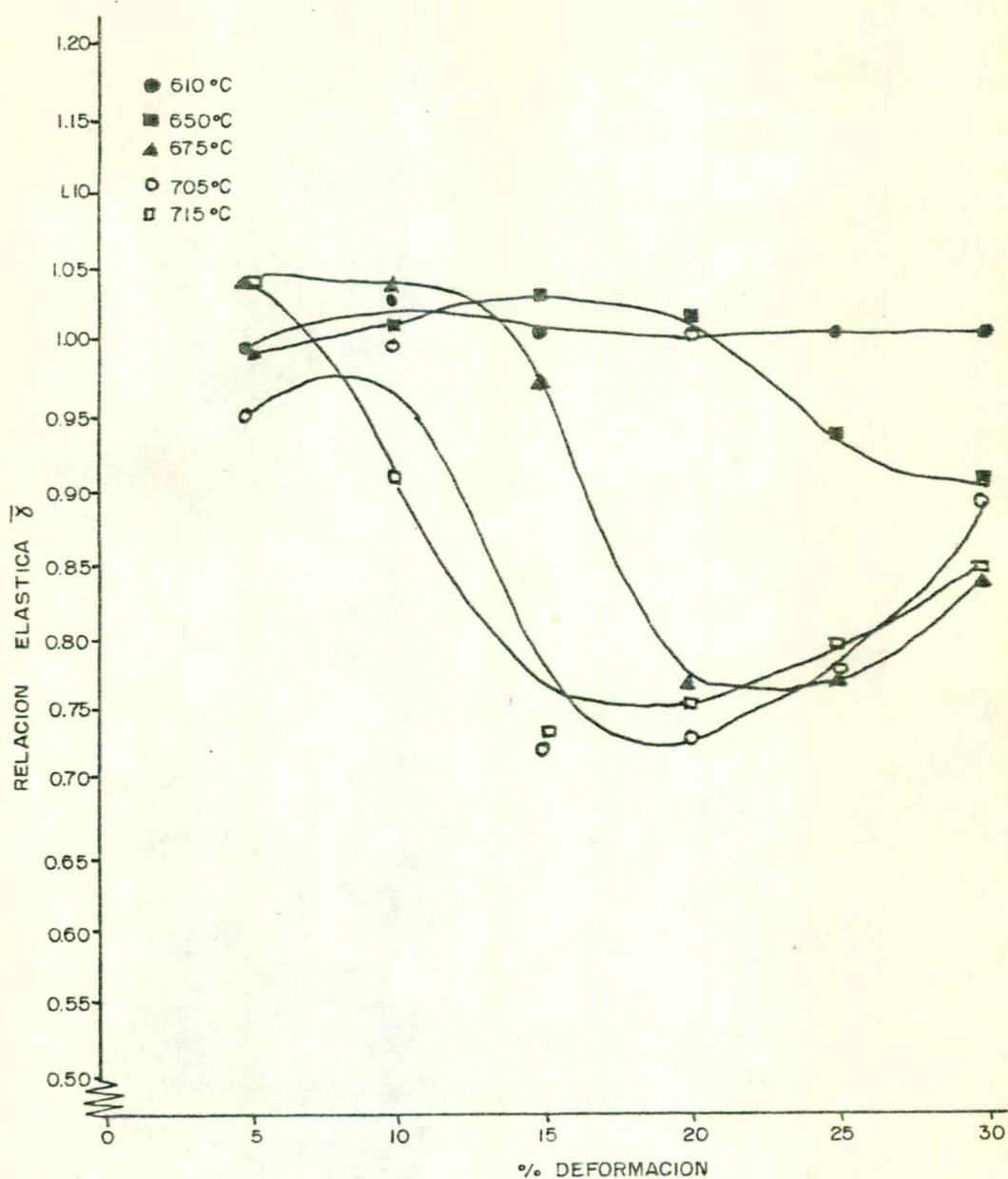
GRAFICA 7,- Efecto de la deformación intermedia y la temperatura de recocido sobre la resistencia máxima a la tensión para el tamaño de grano II.



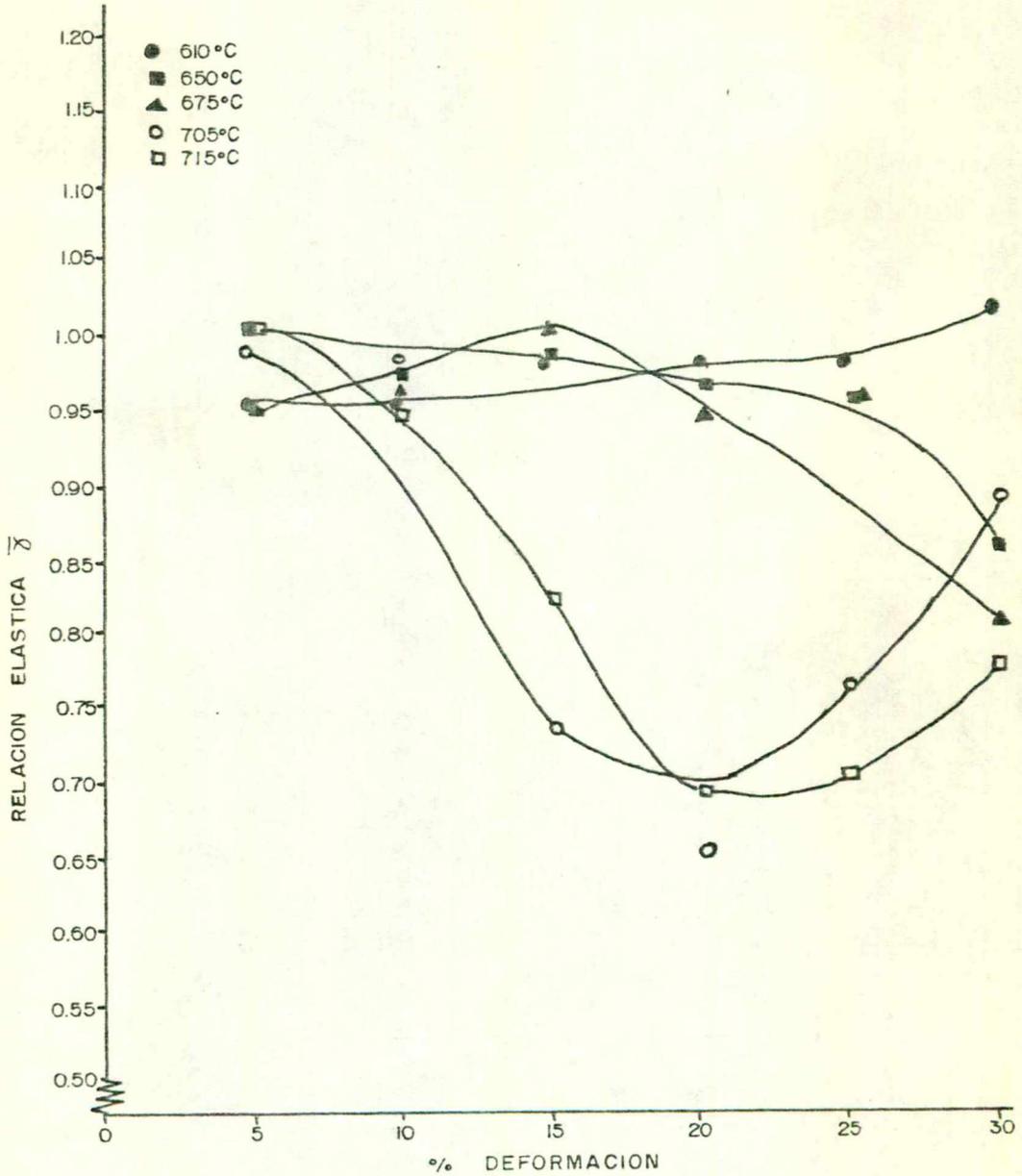
GRAFICA 8.-Efecto de la deformación intermedia y la temperatura de recocido sobre la elongación para el tamaño de -- grano I.



GRAFICA 9.- Efecto de la deformación intermedia y la temperatura de recocido sobre la elongación para el tamaño de grano II.



GRAFICA 10.- Efecto de la deformación intermedia y la temperatura de recocido sobre la relación elástica para el tamaño de grano I.



GRAFICA 11.-Efecto de la deformación intermedia y la temperatura de recocido sobre la relación elástica para el tamaño de grano II.

A temperaturas sobre 700°C se obtienen valores más bajos disminuyendo continuamente hasta un porcentaje de deformación dado (aprox. 15% para T.G.I y - 20% para T.G. II.), después del cual vuelven a aumentar. Esto es debido a efecto del más alto porcentaje de deformación, lo cual incrementa el valor del límite elástico y la resistencia máxima a la tensión. La diferencia entre el valor de la relación elástica para el tamaño de grano I y II no es muy marcada.

Puede decirse que este material no tiene una muy buena formabilidad si se recoce a bajas temperaturas, o tiene una deformación precedente mayor del 20%.

Los materiales con mejor formabilidad se dieron para altas temperaturas de recocido y porcentajes de deformación entre 15 y 20%,. Este porcentaje de deformación mínimo está limitado por la deformación crítica para esas temperaturas (705°C).

EFEECTO DEL TAMAÑO DE GRANO INICIAL:

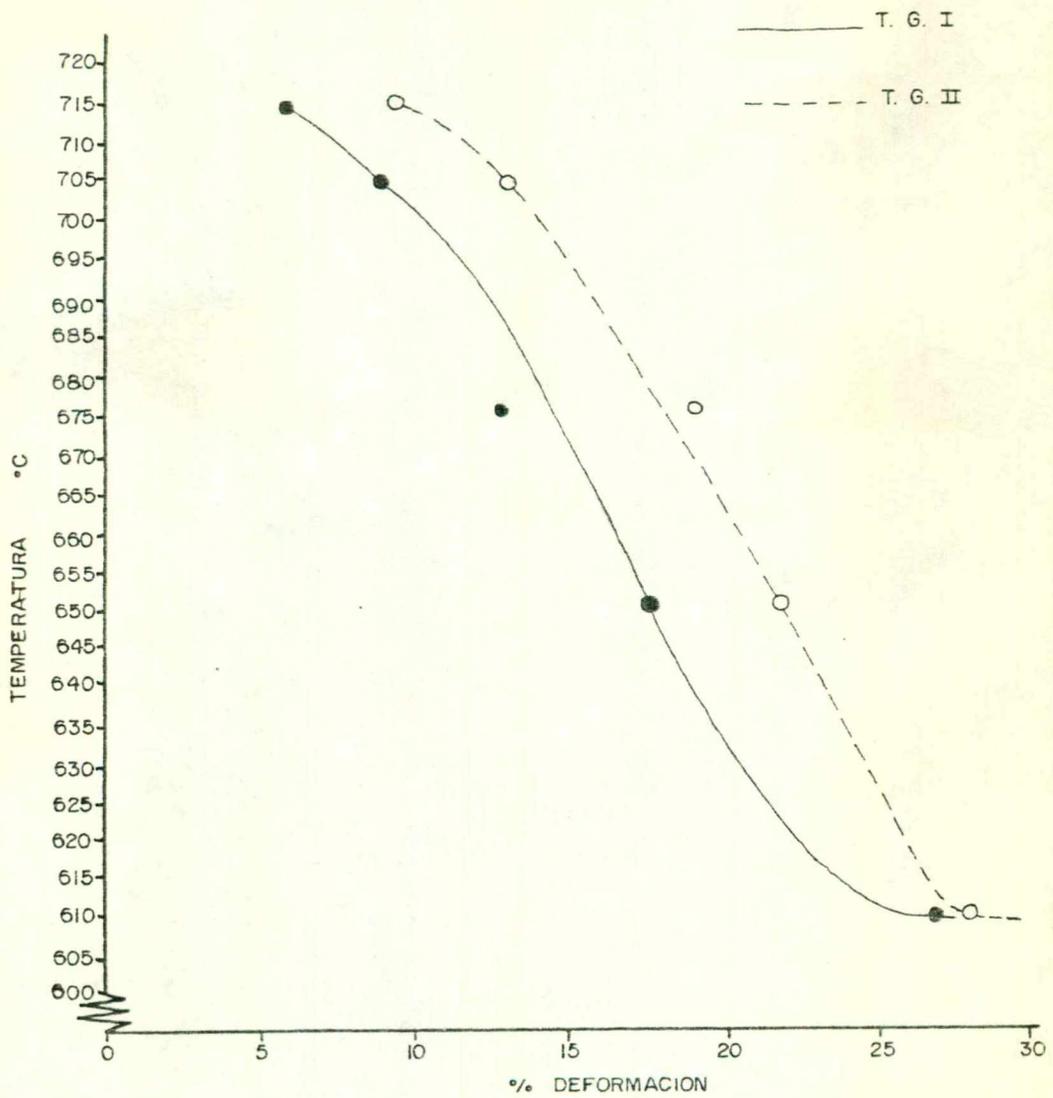
En general, mientras más pequeños sean los granos del metal antes del trabajo en frío, mayor será la velocidad de nucleación y más pequeño el tamaño de grano recristalizado para un grado dado de deformación (9).

En un metal completamente recristalizado, la fuerza impulsora para el crecimiento de grano es la energía de superficie de los límites de grano. La recristalización ocurre más rápidamente porque hay un área de límite de grano más grande por unidad de volumen que en material de grano grueso. El material de grano más grueso tendrá menos energía almacenada y una temperatura apreciablemente mayor de recristalización. Conforme se incrementa la deformación precedente, la diferencia en energía almacenada se hace despreciable pero persiste la marcada diferencia en la temperatura de recristalización (4).

La gráfica 12 muestra el efecto de la temperatura de recocido y el tamaño de grano inicial I y II sobre la deformación crítica,

En esta gráfica se observa que el valor de deformación crítica es mayor para temperaturas más bajas siendo igual el comportamiento para el tamaño de grano I y II. Para el tamaño de grano II los valores de deformación crítica fueron más altos, esto es debido a la menor energía almacenada en el material de grano más grueso, lo que hace necesaria una mayor deformación para inducir la recristalización.

La gráfica 13 muestra el efecto de la deformación intermedia y tamaño de grano inicial sobre el tamaño de grano final recristalizado para dos diferentes temperaturas de recocido.

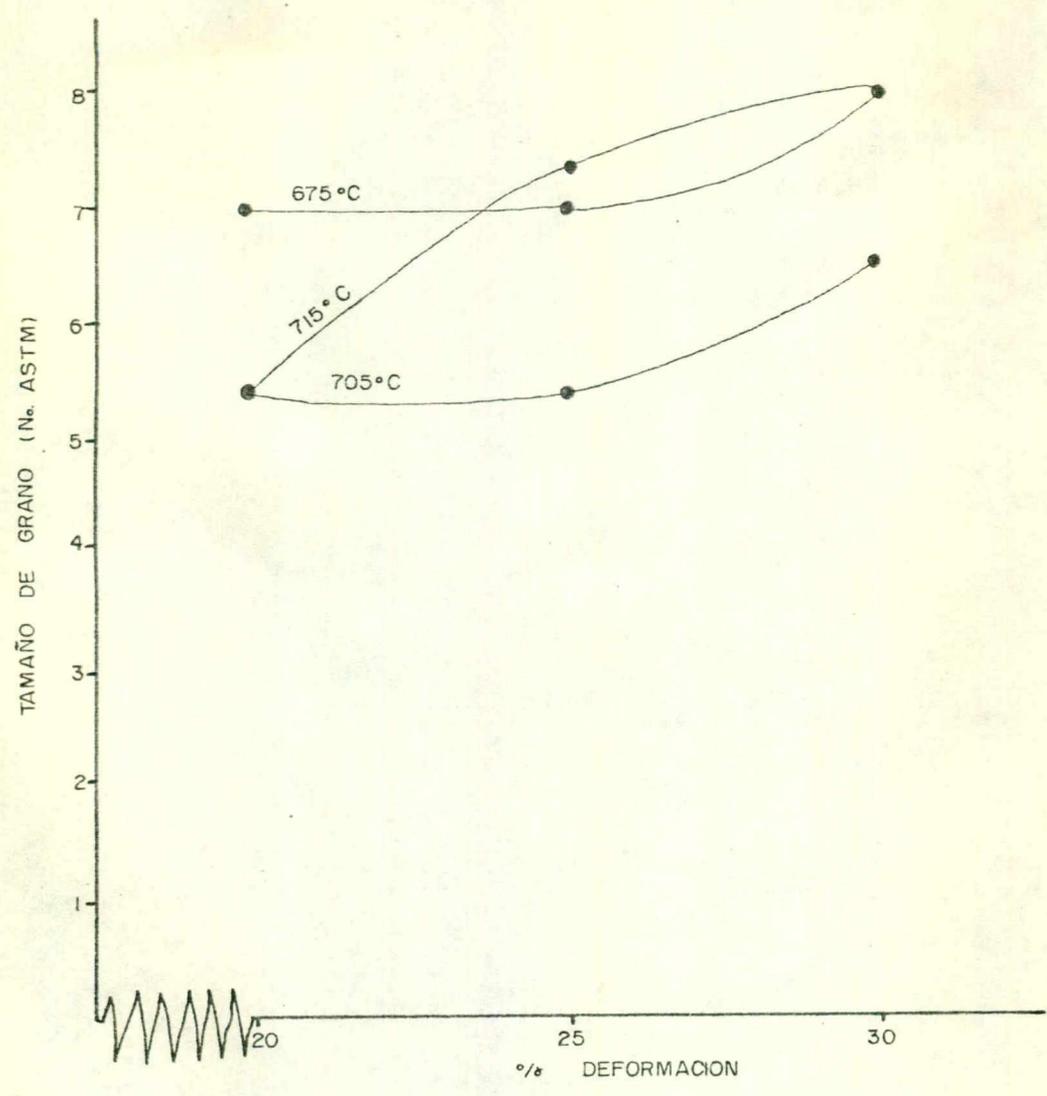


GRAFICA 12.- Efecto de la temperatura de recocido y tamaño de grano inicial (I y II) sobre la deformación crítica.

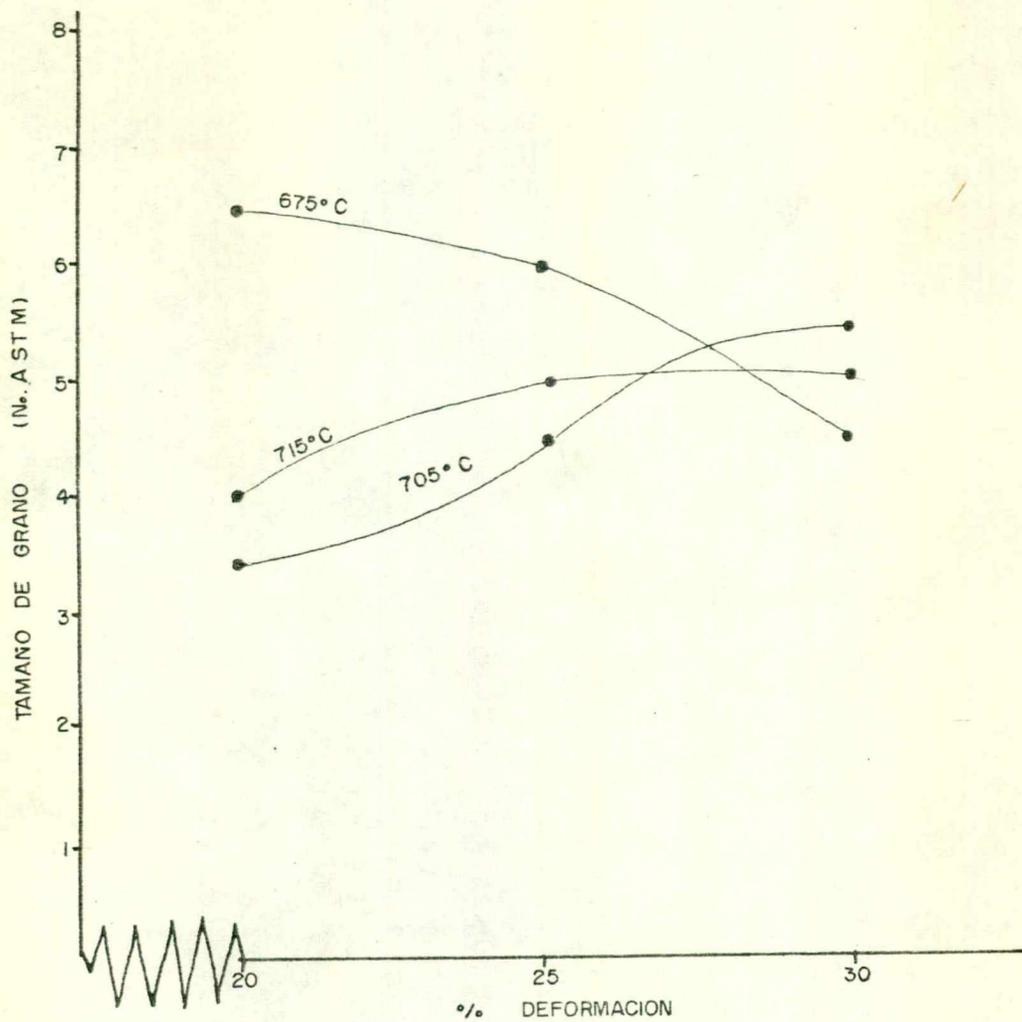
En esta gráfica se puede ver que el tamaño de grano tiende a disminuir conforme aumenta el porcentaje de deformación (a mayor No ASTM menor tamaño de grano). El tamaño de grano más adecuado se obtuvo a 705°C .

La gráfica 14 muestra la misma relación para el tamaño de grano II. Comparando con la gráfica 13 los tamaños de grano resultantes fueron menores, lo cual es lógico dado el mayor tiempo de recocido del tratamiento anterior, por lo que tenía un tamaño de grano inicial mayor. Para el tamaño de grano II una temperatura menor a 705°C es más adecuada, pero sin llegar a 675°C.

La tabla 2 nos da una relación del No de grano ASTM con el diámetro promedio de grano y el número de granos por milímetro cuadrado, para tener una idea más clara de los datos resultantes. Un tamaño de grano que se considera adecuado para una buena formabilidad sería de 5 a 6 ASTM.



GRAFICA 13.-Efecto de la deformación intermedia sobre el tamaño de grano final recristalizado a diferentes temperaturas de recocido para el tamaño de grano I



GRAFICA 14.-Efecto de la deformación intermedia sobre el tamaño de grano final recristalizado a diferentes temperaturas de recocido para el tamaño de grano II.

Relación del tamaño de grano con otras mediciones para granos
 TABLA 2: equiáxicos uniformemente orientados.

No. ASTM micro tamaño grano	Diámetro de - sección prome dio.		Distancia de inter- cepto prom. \bar{L} mm	No. de Inter- ceptos n/l (mm)	Area de sección de gra- no prom. \bar{a} (mm ²).	No de granos por mm ³ . n/V	Distribución promedio.	
	nominal d_n (mm)	Feret d_f (mm)					Granos/mm ³ IX n/a	Granos/cm ² 100X N/A
00*	0.51	0.570	0.453	2.210	0.258	7.63	3.88	0.250
0	0.36	0.403	0.320	3.125	0.129	24.6	7.75	0.500
0.5	0.30	0.339	0.269	3.716	0.0912	36.3	11.0	0.707
1.0	0.25	0.285	0.226	4.42	0.0645	61	15.50	1.000
1.5	0.21	0.240	0.190	5.26	0.0456	71	21.9	1.414
...	0.200	0.226	0.177	5.64	0.0400	125	25.0	1.613
2.0	0.18	0.202	0.160	6.25	0.0323	172	31.0	2.000
2.5	0.15	0.170	0.135	7.43	0.0228	290	43.8	2.828
3.0	0.125	0.143	0.113	8.84	0.0161	488	62.0	4.000
...	0.120	0.135	0.106	9.41	0.0144	579	69.4	4.480
3.5	0.105	0.120	0.095	10.51	0.0114	821	87.7	5.657
...	0.100	0.113	0.089	11.29	0.0100	1000	100	6.452
	μm	μm	μm		$\text{mm}^2 \times 10^{-2}$			
4.0	90	101	80.0	12.5	8.07	1381	124	8.000
4.5	75	85	67.3	14.9	5.70	2322	175	11.31
...	70	79	62.0	16.1	4.90	2915	204	13.17
5.0	65	71	56.6	17.7	4.03	3906	248	16.00
...	60	68	53.2	18.8	3.60	4630	278	17.92
5.5	55	60	47.6	21.0	2.85	6568	351	22.63
...	50	56	44.3	22.6	2.50	8000	400	25.81
6.0	45	50	40.0	25.0	2.02	11 046	496	32.00
...	40	45	35.4	28.2	1.60	15 625	625	40.32
6.5	38	42	33.6	29.7	1.43	18 578	701	45.25
...	35	39	31.0	32.2	1.23	23 324	816	52.67
7.0	32	36	28.3	35.4	1.008	31 244	992	64.00
...	30	34	26.6	37.6	0.900	37 037	1111	71.68
7.5	27	30	23.8	42.0	0.713	52 546	1403	90.51
...	25	28	22.2	45.1	0.625	64 000	1600	103.23
	μm	μm	μm		$\text{mm}^2 \times 10^{-4}$	$\times 10^4$	$\times 10^3$	
8.0	22	25	20.0	50.0	504	0.0884	1.98	128.0
...	20	23	17.7	56.4	400	0.1250	2.50	161.3
8.5	19	21	16.8	59.5	356	0.1486	2.81	181.0
9.0	16	18	14.1	70.7	252	0.250	3.97	256.0
...	15	17	13.3	75.2	225	0.296	4.44	286.7
9.5	13	15	11.9	84.1	178	0.420	5.61	362.0
10.0	11	13	10.0	100	126	0.707	7.94	512.0
...	10	11.3	8.86	113	100	1.000	10.00	645.2
10.5	9.4	10.6	8.41	119	89.1	1.189	11.22	724.1
...	9.0	10.2	7.98	125	81.0	1.372	12.35	796.5
11.0	8	8.9	7.07	141	63.0	2.000	15.87	1024
...	7.0	7.9	6.20	161	49.0	2.915	20.41	1317
11.5	6.7	7.5	5.95	168	44.6	3.363	22.45	1448
...	6.0	6.8	5.32	188	36.0	4.630	27.78	1792
12.0	5.6	6.3	5.00	200	31.5	5.65	31.7	2048
...	5.0	5.6	4.43	226	25.0	8.00	40.0	2581
12.5	4.7	5.3	4.20	238	22.3	9.51	44.9	2896
13.0	4.0	4.5	3.54	283	15.8	16.00	63.5	4096
13.5	3.3	3.7	2.97	336	11.1	26.9	89.8	5793
...	3.0	3.4	2.66	376	9.0	37.0	111.1	7168
14.0	2.8	3.2	2.50	400	7.88	45.2	127	8192
...	2.5	2.8	2.22	451	6.25	64.0	160	10323

NOTAS: El No. 00 se usa en lugar de -1 para evitar confusión.
 El diámetro de Feret's es igual a la distancia entre
 tangentes. = $d_t - \pi$

TABLA 3: PROPIEDADES MECANICAS DEL MATERIAL, OBTENIDAS DIRECTAMENTE DE LAS GRAFICAS DEL ENSAYO DE TENSION.

	PROCESO	LIMITE ELASTICO Kg /mm ²		RESISTENCIA MAXIMA A LA TENSION Kg/mm ²		ELONGACION (%)		RELACION ELASTICA	
		T.G. I	T.G. II	T.G. I	T.G. II	T.G. I	T.G. II	T.G. I	T.G. II
	RECOCIDO POR LOTES (8)	22		32		46.5		0.687	
	NKK (7)	21.3		33		46.3		0.645	
	CAPL (9)	19.7		33		44.2		0.597	
PROPUESTO		T.G. I	T.G. II	T.G. I	T.G. II	T.G. I	T.G. II	T.G. I	T.G. II
T = 610 °C	5 % Def.	36.94	31.98	37.13	33.17	31.40	30.45	0.995	0.964
	10 % Def.	40.15	33.36	40.90	34.65	23.55	25.13	0.981	0.963
	15 % Def.	43.15	38.76	43.50	39.40	19.36	20.75	0.992	0.984
	20 % Def.	46.14	42.74	46.72	43.34	14.94	17.57	0.987	0.986
	25 % Def.	48.00	42.92	48.67	43.56	14.39	16.11	0.986	0.985
	30 % Def.	47.66	45.58	47.97	45.75	13.61	15.36	0.993	0.996
T = 650 °C	5 % Def.	35.24	33.28	35.58	33.92	33.83	36.29	0.990	0.981
	10 % Def.	39.03	33.92	39.37	34.78	26.86	26.67	0.991	0.975
	15 % Def.	42.46	37.85	43.28	38.34	21.55	23.90	0.981	0.987
	20 % Def.	45.44	39.21	45.60	40.56	17.76	20.50	0.996	0.966
	25 % Def.	34.80	38.53	37.25	40.43	20.29	20.56	0.934	0.953
	30 % Def.	30.43	31.41	33.28	36.54	27.96	25.23	0.914	0.859
T = 675 °C	5 % Def.	36.57	31.01	37.03	32.48	34.38	35.72	0.987	0.954
	10 % Def.	37.76	33.59	38.33	34.79	26.58	30.53	0.985	0.965
	15 % Def.	37.45	37.78	38.57	37.93	24.40	23.85	0.971	0.996
	20 % Def.	23.75	37.72	31.15	39.96	38.57	21.80	0.762	0.944
	25 % Def.	23.82	37.78	30.92	39.69	40.39	35.04	0.770	0.952
	30 % Def.	26.465	24.75	31.56	30.53	39.77	37.32	0.838	0.810
T = 705 °C	5 % Def.	32.78	32.72	34.57	33.17	33.40	40.29	0.948	0.986
	10 % Def.	36.51	33.68	36.84	34.18	27.02	30.39	0.991	0.985
	15 % Def.	21.57	23.83	30.09	29.39	35.52	26.26	0.716	0.736
	20 % Def.	21.88	19.11	30.09	29.38	38.42	41.13	0.727	0.650
	25 % Def.	23.85	21.68	30.66	29.42	40.58	45.16	0.778	0.763
	30 % Def.	27.78	26.23	31.24	29.78	42.49	42.99	0.889	0.880
T = 718 °C	5 % Def.	36.80	33.12	37.17	33.76	36.72	38.31	0.990	0.981
	10 % Def.	33.41	32.68	36.80	34.50	27.18	31.42	0.908	0.947
	15 % Def.	20.22	28.20	29.60	34.13	37.95	27.37	0.683	0.826
	20 % Def.	22.96	20.23	30.41	29.19	38.22	40.75	0.755	0.689
	25 % Def.	24.48	20.74	30.77	29.29	38.22	41.15	0.796	0.708
	30 % Def.	26.35	23.43	31.30	30.01	38.20	41.21	0.842	0.781

CONCLUSIONES

En base a los resultados obtenidos en este trabajo se concluye que el proceso propuesto puede lograr un producto con buena formabilidad, con propiedades mecánicas aproximadamente iguales a las de un recocido por lotes.

Comparando los resultados con los del proceso CAPL y NKK las propiedades mecánicas del proceso propuesto pueden considerarse aceptables. Por lo tanto el nuevo método es atractivo desde el punto de vista metalúrgico. La tabla 3 nos da una relación de las propiedades mecánicas para diferentes procesos.

En la tabla puede verse en que procesos se obtienen los valores más próximos a los deseados. Para el tamaño de grano I y II la temperatura del segundo recocido de 705°C da resultados favorables; considero solo esta temperatura ya que al elevar a 715°C no hay mucha diferencia, y abajo de ésta las propiedades difieren bastante de las deseadas.

A 705°C se encontraron las mejores propiedades para el tamaño de grano I con una deformación precedente de 20% y, para el tamaño de grano II con una deformación de 15-20%.

Desde estos resultados se observa que entre ambos tamaños de grano es poca la diferencia considerando el mucho mayor tiempo para el tamaño de grano II. Los valores de relación elástica son casi iguales para los casos adecuados.

El proceso presenta las siguientes ventajas:

- 1: El proceso es factible metalúrgicamente siendo posible controlar adecuadamente la deformación intermedia para lograr el tamaño de grano deseado.
- 2: El material obtenido tiene propiedades mecánicas similares a las de un proceso de recocido por lotes.
- 3: Al ser un proceso de recocido continuo el tiempo necesario para obtener el producto final es mínimo.

Las desventajas del proceso son:

- a) El material debe recocerse dos veces, por lo que se necesita más equipo.
- b) Se tiene que efectuar una deformación intermedia, lo que implica el uso de molinos laminadores durante el recocido.
- c) Mayor costo en equipo lo cual deriva de las dos desventajas anteriores.

SUGERENCIAS

Debido a los resultados favorables logrados en este trabajo, se considera conveniente analizar este proceso desde otros puntos de vista. Para esto es necesario realizar estudios complementarios que nos den una visión más completa de lo que será el proceso si se desea usarlo a nivel industrial. Se sugieren los siguientes puntos:

- 1.- Enfocar el proceso desde el punto de vista mecánico. Determinar el tipo de maquinaria adecuado para lograr un proceso óptimo.
- 2.- Analizar más profundamente el comportamiento metalúrgico del material utilizando un rango más cerrado en las variables manejadas en este trabajo.
- 3.- Considerar posibles aditamentos al proceso que faciliten la operación, como el uso de un medio refrigerante después del primer recocido y el paso inmediato a la segunda deformación, ya que se debe tener continuidad en el proceso.
- 4.- Hacer un estudio metalográfico para tener una idea clara de las etapas por las que va pasando el material.
- 5.- Efectuar un análisis económico completo para ver si el proceso es factible de ser utilizado a nivel industrial.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- ADAMS M.A. and BEVAN J.R. Continuous Annealing of Mild Steel Strip.
- 2.- ARAKI K: NKK-CAL Process for Drawing Quality Cold Strip; Nippon Kokan.
- 3.- BLICKWEDE D.J.; Continuous Annealing of Deep Drawing Sheet; AIME; 1959.
- 4.- HONEYCOMBE R.W.K.; The Plastic Deformation of Metals; Chapter II: Annealing of Deformed Metals.
- 5.- KENZO TODA, NARUMI ANDO, KOICHI SAKURAI; CAPL and it's Technology; SEAISI ; October; 1974.
- 6.-KURIHARA T. NAKAOKA K. YAMAGUCHI T, KURODA H. and YAMAMOTO J.: Continuous -- Annealing of Drawing Quality Steel strip; Nippon Kokan K.K.; Japan.
- 7.- METALS HANDBOOK , ASM; VOL II.
- 8.- PRICE W.O.W. and VAUGHAN E.H.; Conventional Strand Annealing ; The Steel --- Company of Wales.
- 9.- REED HILL: Principios de Metalurgia Física; CECSA; México 1982.