



9
1 ejem

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES

ARAGON

- -

U. N. A. M.

Métodos de Endurecimiento en Metales no Ferrosos y sus Aleaciones más comunes en México.

T E S I S

Que para obtener el título de:

Ingeniero Mecánico Electricista

p r e s e n t a :

Adriana Marcela Ocaña González

México, D. F.

1 9 8 4 .



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

I N D I C E
=====

	<u>PAGINA</u>
1. INTRODUCCION	1
2. METALES Y ALEACIONES NO FERROSAS MAS COMUNES EN MEXICO.	6
2.1. PRODUCCION MINERA EN MEXICO	7
2.1.1. PRODUCCION DE METALES NO FERROSOS	7
2.2. UTILIZACION DE LOS METALES NO FERROSOS	14
2.2.1. ALUMINIO	14
2.2.2. COBRE	16
2.2.3. NIQUEL	19
2.2.4. PLOMO	20
2.2.5. ESTAÑO	20
2.2.6. ZINC	21
3. MECANISMOS DE ENDURECIMIENTO EN METALES NO FERROSOS Y SUS ALEACIONES.	23
3.1. DESLIZAMIENTO Y DISLOCACIONES	24
3.2. ENDURECIMIENTO POR DEFORMACION O TRABAJO EN FRIO.	27
3.2.1. PROCESOS DE FABRICACION CON ENDURECIMIENTO POR TRABAJO.	28
3.3. ENDURECIMIENTO POR ENVEJECIMIENTO O PRECIPITACION	30
3.4. ENDURECIMIENTO POR SOLUCION (ALEACIONES)	34
3.5. ENDURECIMIENTO POR DISPERSION	36
3.6. ENDURECIMIENTO POR TEXTURA	37

PAGINA

4.	INFLUENCIA DE LOS MECANISMOS DE ENDURECIMIENTO EN SUS PROPIEDADES MECANICAS.	39
4.1.	CAMBIOS EN LAS PROPIEDADES DEBIDO AL ENDURECIMIENTO POR TRABAJO EN FRIO.	43
4.2.	CAMBIOS EN LAS PROPIEDADES DEBIDO AL ENDURECIMIENTO POR PRECIPITACION.	51
4.3.	CAMBIOS EN LAS PROPIEDADES DEBIDO AL ENDURECIMIENTO POR ALEACION	55
4.4.	CAMBIOS EN LAS PROPIEDADES DEBIDO AL ENDURECIMIENTO POR DISPERSION	59
4.5.	CAMBIOS EN LAS PROPIEDADES DEBIDO AL ENDURECIMIENTO POR TEXTURA.	61
5.	DESARROLLO EXPERIMENTAL	64
5.1.	ANALISIS QUIMICO	65
5.2.	PRUEBAS MECANICAS	67
5.2.1.	DETERMINACION DE LA DUREZA	67
5.2.2.	METODO EMPLEADO PARA LA DETERMINACION DE LA RESISTENCIA A LA TENSION	68
5.3.	TRATAMIENTO TERMICO	68
6.	RESULTADOS Y CONCLUSIONES	71
6.1.	RESULTADOS	72
6.2.	CONCLUSIONES	72
	BIBLICGRAFIA	76

1.

I N T R O D U C C I O N

Es costumbre dividir en períodos el desarrollo cultural del hombre, desde el salvajismo hasta la civilización, identificados por el uso predominante que se hacia de algún material para la fabricación de sus instrumentos. Así, es designada la Edad de Piedra, seguida de la de los Metales.

Tal vez podría pensarse que los primeros metales que el hombre utilizó fuesen los más abundantes, por ejemplo, el aluminio y el hierro, pero la Historia nos indica que desde los primeros tiempos el criterio que determinó el orden en el cual los metales fueron descubiertos y explotados fue la facilidad de su separación de los respectivos minerales; así, la Edad de los Metales se divide en dos períodos: el del Bronce, donde el hombre descubrió primero el cobre, al que después mezcló con el estaño para obtener el bronce, lo cual le permitió hacer armas e instrumentos más fuertes y mejor acabados; y el del Hierro, donde empezó a ser dominada la difícil técnica del beneficio de dicho metal, cuya industria continuó perfeccionándose hasta llegar a la Edad del Acero.

Los metales se caracterizan por su afinidad con las impurezas. La pureza existente depende, en gran parte, de la dificultad para retirar las impurezas y, también en parte, de la demanda existente para varios grados de pureza. Por ejemplo, hay distintos grados de cobre "puro" en el mercado, que tienen variaciones ligeras de composición. Ciertas propiedades eléctricas son muy sensibles a las cantidades pequeñas de impurezas y, cuando son importantes, han hecho que llegue a obtenerse una pureza muy elevada en los materiales.

Con la excepción del cobre y el aluminio, que se usan como conductores eléctricos, y unos cuantos elementos que se utilizan como semiconductores, la mayoría de los elementos no se emplean en condiciones de alta pureza. Para fines de ingeniería se usan aleaciones, prefiriéndolas a los metales puros, debido a sus propiedades mecánicas, físicas y químicas superiores; además, la aleación hace posible la aplicación de tratamiento térmico, que permite mejorar todavía más las propiedades.

La aleación es una materia que está compuesta por dos o más elementos, de los que uno por lo menos debe ser metal. Sin embargo, esta definición es demasiado simple, puesto que ningún metal puede prepararse con una pureza del 100%. Por consiguiente, el término aleación acostumbra a utilizarse sólo para aquellos metales a los que se incorpora intencionalmente otros elementos, según unas proporciones preestablecidas.

Una manera sencilla de describir las aleaciones comerciales es agrupándolas en familias, con base en los principales elementos que se encuentran en ellas, ta-

les como las aleaciones de aluminio, las de cobre, etc. La división tradicional de clasificar entre aleaciones no ferrosas y ferrosas (basadas en el hierro) es poco práctica, ya que, por ejemplo, las aleaciones de níquel a pesar de ser "no ferrosas" tienen bastante más en común con las aleaciones basadas en el hierro que con las aleaciones basadas en el zinc.

Aunque las aleaciones basadas en el hierro tienen una resistencia muy alta, es importante ocuparnos de las aleaciones no ferrosas ya que la resistencia es solo uno de los requisitos de un material. Un desempeño satisfactorio depende de la densidad, la resistencia a la corrosión y los efectos de la temperatura, así como también de las propiedades eléctricas y magnéticas. Como ejemplo se consideran algunas partes para las cuales son especialmente apropiadas las aleaciones no ferrosas.

Aleaciones de aluminio: partes de aviones (alta resistencia en relación con su peso).

Aleaciones de magnesio: fundiciones para aviones (compite con el aluminio).

Aleaciones de cobre: alambres eléctricos (alta conductividad).

Aleaciones de níquel: partes para turbinas de gas (alta resistencia a temperaturas elevadas).

Algunos metales son de importancia vital en el control y modificación de las estructuras de otros metales; esta modificación, combinada con los tratamientos durante los procesos, nos permite obtener propiedades tremendamente mejoradas de las aleaciones. Al experimentar con aleaciones y tratamientos térmicos, se ha podido aumentar la resistencia del aluminio puro 20 veces, la del cobre 14 veces y la del hierro 13 veces, manteniendo una ductilidad satisfactoria en todos los casos. (10)

Otro punto importante en los metales es la gran diferencia que existe entre las condiciones recocido, laminado en frío y con tratamiento térmico. Esta es una ventaja única de los metales, ya que una pieza se puede formar en la condición blanda y más tarde puede ser endurecida durante la operación de formado.

Existen muchos factores para poder decidir sobre la aplicación más adecuada de un material; en muchos casos, es más apropiado utilizar como base de comparación la resistencia específica o relación de resistencia a peso (resistencia a la fluencia a densidad). Desde este punto de vista los metales livianos, el grafito y ciertos plásticos muestran propiedades favorables (10). En forma semejante, la rigidez específica o relación del módulo de elasticidad a la densidad se emplea como índice de selección cuando la deflexión es importante.

Considerando estos factores y el costo por peso o volúmen, hay una estrecha competencia entre el hierro fundido, aluminio y plástico para una misma pieza.

Debe quedar claro que la estructura de un material es la variable fundamental . Por ejemplo, se puede tener dos aleaciones con la misma resistencia a la tensión pero con estructuras diferentes. Si se realiza un ensayo de tensión a altas temperaturas, se obtendrán valores bastante diferentes; en otras palabras, propiedades mecánicas semejantes a la temperatura ambiente no garantizan propiedades semejantes a otras temperaturas. Se han empleado los ensayos de tensión y dureza para demostrar como las propiedades mecánicas son determinadas por la estrutura.

Para trabajar un material sin que éste cambie de forma sólo debe existir deformación elástica en la mayoría de las estructuras; entonces, conocer el límite - de fluencia determina la carga máxima aplicable con seguridad. Muchas técnicas de fabricación, tales como laminado, estirado de alambre y troquelado, dependen de las propiedades del metal para soportar una deformación plástica considera-- ble antes de romperse. En este caso, es importante conocer la ductilidad y la - velocidad de endurecimiento del material con que se trabaja.

Es necesario distinguir entre resistencia a la tensión y resistencia a la fluencia ya que en los materiales dúctiles puede haber una diferencia grande entre - estas propiedades, mientras que en los materiales frágiles prácticamente no hay diferencia.

En la prueba de tensión, el área bajo la curva de esfuerzo-deformación muestra la energía que se absorbe antes de la fractura e indica la tenacidad del mate-- rial.

Ya que hablamos de tenacidad es conveniente aclarar que lo que se busca en la - actualidad es obtener productos más tenaces, no se trata de endurecer solo para incrementar la dureza, sino de producir piezas con alta resistencia y dureza pero que al mismo tiempo sean dúctiles. Entre los diversos procesos para lograr - estas propiedades se pueden utilizar los mecanismos de endurecimiento.

El endurecimiento por deformación (cuyo origen es la acumulación de dislocacio-- nes durante la deformación plástica), es uno de los mecanismos más importantes para endurecer metales; otro proceso es el de solución sólida (endurecimiento - por solutos), con respecto a este último es conveniente distinguir entre solu-- ciones intersticiales y sustitucionales que existen antes de la precipitación - de una solución sobresaturada. También es importante la descripción del endure-- cimiento por dispersión, por precipitación y por textura. Una parte importante -

del progreso de la Metalurgia se debe a la investigación de estos mecanismos para producir aleaciones de alta resistencia.

De los diversos métodos para endurecer los metales, no hay ninguno que sea más eficaz que el templado; no obstante, este método no es aplicable a los metales puros para mejorar sus características de resistencia. Para poder aplicarlo, es preciso efectuar antes una aleación; pero de todos modos, solo ciertos tipos de aleaciones responden al templado. Las que responden pueden subdividirse en dos grupos principales: a) las aleaciones que son capaces de endurecerse por medio de tratamientos de precipitación o envejecimiento, y b) las aleaciones que pueden endurecerse mediante la supresión de cambios de equilibrio, con el fin de que puedan producirse transformaciones martensíticas. El mayor interés en las aleaciones del primer grupo se centra en las no ferrosas, sobre todo aquellas en las que predomina el aluminio. El segundo tipo de aleaciones capaces de endurecerse por templado incluye a los aceros; o sea, aleaciones de hierro con ciertas cantidades de carbono u otros elementos.

En los capítulos correspondientes son descritos los mecanismos de endurecimiento y su influencia en las propiedades mecánicas.

2. METALES Y ALEACIONES NO FERROSAS MAS COMUNES
EN MEXICO.

2.1. PRODUCCION MINERA EN MEXICO

2.2. UTILIZACION DE LOS METALES NO FERROSOS

Existe una división tradicional para tratar las aleaciones comerciales; esta es, en aleaciones no ferrosas y ferrosas, cuya diferencia se basa en el uso del hierro como elemento principal.

Dentro de los metales no ferrosos se encuentran las aleaciones de cobre, aluminio, magnesio, níquel, estaño, plomo y zinc. Otros metales y aleaciones no ferrosas que se utilizan con menor frecuencia incluyen cadmio, molibdeno, cobalto, zirconio, berilio, titanio, tantalio, los metales preciosos oro y plata y el grupo platino.

2.1. PRODUCCION MINERA EN MEXICO.

Por lo que a México respecta, actualmente en la producción mundial ocupa el primer lugar en plata y fluorita, segundo en grafito, bismuto y cadmio, tercero en mercurio y antimonio, cuarto en selenio; y quinto en azufre, plomo y zinc (tabla 2.1). En cuanto a la plata no solo se mantiene en primer sitio como productor, si no que aumentó del 19 al 21 por ciento su participación en la producción mundial, aunque no debemos ilusionarnos, pues por otro lado, aunque la industria minerometalúrgica ha ido avanzando, los frutos alcanzados son insuficientes frente a las necesidades que tiene el país.

2.1.1. PRODUCCION DE METALES NO FERROSOS.

Observando las estadísticas para determinar la situación nacional de metales no ferrosos (producción, importación y exportación; tablas 2.2, 2.3, 2.4) nos damos cuenta que México todavía no ocupa un lugar preponderante en la explotación de algunos minerales, los cuales tienen que depender del comercio internacional para suplir las necesidades del creciente mercado interno, tal es el caso del aluminio, el cual México se ve forzado a importar puesto que no cuenta con mantos de bauxita (mineral del cual se extrae el aluminio); sin embargo, ese mineral será refinado en el país para producir aluminio, ya que existe el proyecto de importar la bauxita de Jamaica⁽¹⁴⁾ (principal productor de este mineral, junto con Surinam) el cual México refinará a menor costo.

Las empresas que controlan la producción de aluminio en el mundo son cinco: las estadounidenses Alcoa, Kayser y Reynolds; la Alcan de Canada, y la industria Puk de Francia.⁽¹⁴⁾

En cuanto al cobre la producción y refinación nacional ha ido ascendiendo en forma considerable de tal forma que cubre el mercado nacional y el resto es exportado a países como Alemania Federal (país donde se refina el cobre mexicano),

TABLA 2.1 Lugar que ocupa México en la producción minera mundial por principales productos.

	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979
Plata	3°	3°	3°	3°	3°	2°	1°	1°	1°	1°
Plomo	4°	5°	5°	5°	5°	5°	5°	5°	5°	5°
Zinc	4°	5°	5°	5°	4°	5°	5°	4°	5°	5°
Mercurio	3°	2°	3°	3°	2°	3°	5°	4°	4°	-
Antimonio	3°	3°	3°	3°	3°	3°	3°	3°	4°	3°
Cadmio	3°	3°	2°	3°	2°	1°	1°	5°	2°	2°
Bismuto	4°	4°	3°	4°	2°	4°	5°	1°	2°	2°
Selenio	4°	5°	6°	7°	6°	4°	5°	6°	4°	4°
Fluorita	1°	1°	1°	1°	1°	1°	1°	1°	1°	1°
Barita	3°	3°	3°	3°	3°	2°	4°	6°	4°	7°
Grafito	2°	2°	1°	1°	1°	1°	1°	2°	2°	2°
Azufre	5°	6°	6°	5°	4°	4°	4°	5°	5°	5°

FUENTE: Elaborado con datos del Mineral Commodity Summaries, Bureau of Mines, U.S.A, 1972-1980.
 Secretaría de Patrimonio y Fomento Industrial. Dirección General de Minas y Consejo de Recursos Minerales, Anuario Estadístico de la Minería Mexicana, 1970-1978. (1)

TABLE 2.2 Volumen de la Producción Minero-Metalúrgica
(Toneladas)

PRODUCTOS	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979
Minerales Metálicos *										
Metales Preciosos										
Oro (Kgs.)	6,166	4,694	4,543	4,123	4,182	4,501	5,064	6,616	6,283	5,911
Plata (Kgs.)	1 332,362	1 140,166	1 165,852	1 206,436	1 167,814	1 182,822	1 326,243	1 462,798	1 579,393	1 536,772
Metales Industriales										
Antimonio	4,468	3,361	2,976	2,388	2,407	3,137	2,546	2,698	2,457	2,872
Arsénico	6,922	8,717	4,482	3,832	7,199	4,636	4,165	4,350	4,730	4,951
Bismuto	571	570	529	484	718	445	557	729	978	754
Cadmio	1,267	1,662	1,757	1,477	1,960	1,581	1,844	1,781	1,894	1,778
Cobre	61,012	63,150	70,720	80,501	82,670	78,196	88,970	89,662	87,186	107,109
Estaño	533	479	354	292	400	378	481	220	73	23
Hierro	2 612,376	2 818,678	3 053,360	3 113,425	3 338,294	3 369,250	3 644,317	3 587,214	3 556,109	4 040,989
Indio	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-
Manganeso	93,609	96,081	106,424	131,049	145,128	154,245	163,156	175,184	188,340	177,359
Mercurio	1,043	1,220	776	700	894	490	518	333	76	n.d.
Molibdeno	141	79	78	41	43	17	16	1	11	48
Níquel	44	24	17	32	25	50	56	34	22	-
Plomo	176,597	156,852	161,358	166,834	193,114	162,826	164,859	163,479	170,533	173,455
Selenio	128	52	44	39	50	58	58	50	80	75
Tungsteno	238	408	362	348	309	277	235	191	234	252
Zinc	266,400	264,972	271,844	271,373	262,716	228,851	259,183	265,469	244,892	245,477

* Se refiere a contenido metálico

n.d. No disponible

FUENTE: S.P. y P.I. Dirección General de Minas, Consejo de Recursos Minerales
S.P.P. Dirección General de Estadística. (1)

TABLA 2.3 Volúmen de la importación minero-metalúrgica
(Toneladas)

PRODUCTOS	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978
Minerales Metálicos									
Metales Preciosos	439	329	740	629	103	57	5,039	12	83
Oro (Kgs.)	175	90	78	106	-	-	-	-	-
Paladio (Kgs.)	-	-	202	210	103	39	21	-	76
Plata (Kgs.)	213	188	431	280	-	-	5,013	-	-
Platino (Kgs.)	51	51	29	33	-	18	5	12	7
Metales Industriales	1 144,916	747,055	743,032	1 322,087	1 218,760	1 650,126	862,915	596,389	990,189
Aluminio	74,427	791	8,650	29,511	26,553	12,705	16,301	9,243	42,460
Arsénico	66	62	11	6	-	-	-	-	-
Berilio	-	-	-	-	-	-	-	12	11
Bismuto	-	1	2	5	2	29	-	-	-
Cadmio	-	-	-	-	2	18	-	1	1
Cobalto	-	4	27	44	62	30	79	54	56
Cobre	432	569	825	927	5,422	352	544	265	22,105
Cromo	25,000	38,169	26,144	36,793	53,082	39,293	51,261	49,167	50,786
Estaño	2,989	2,713	1,499	3,011	2,649	3,240	3,162	2,842	3,825
Hierro	1 015,013	673,454	678,958	1 219,811	1 061,268	1 570,542	720,390	426,936	761,382
Magnesio	-	-	-	-	1,765	911	2,050	3,313	2,113
Manganeso	-	-	-	-	24,382	1,165	17,037	58,022	37,395
Mercurio	1	1	1	1	-	-	-	-	-
Molibdeno	-	327	434	523	982	14	609	521	969
Níquel	1,160	1,860	1,805	1,256	1,429	3,189	2,118	3,247	3,111
Plomo	19	30	22	16	85	556	509	821	281
Selenio	-	-	-	-	-	-	-	1	1
Titanio	25,783	29,041	24,594	30,103	40,992	7,688	49,769	42,038	65,554
Tungsteno	19	9	15	26	18	329	28	32	24
Zinc	7	22	64	14	65	65	58	74	111

FUENTE: S.P. y F.I. Consejo de Recursos Minerales
S.P.P. Dirección General de Estadística. (1)

TABLA 2.4 Volúmen de la exportación minero-metalúrgica *
(Toneladas)

PRODUCTOS	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978
Minerales Metálicos									
Metales Preciosos	544,733	669,968	402,097	14 497,967	19 672,418	32 140,396	33 649,872	30 034,491	30 108,539
Oro (Kgs.)	131	27	15	-	-	180	-	-	-
Plata (Kgs.)	544,602	669,941	402,062	14 497,967	19 672,418	32 140,216	33 649,872	30 034,491	30 108,539
Metales Industriales	520,855	542,068	675,518	588,157	790,836	559,839	585,059	637,118	550,674
Aluminio	-	-	-	-	220	130	4	51	-
Antimonio	15,836	9,028	7,863	6,327	6,684	9,761	6,305	3,530	5,255
Arsénico	7,097	7,071	2,797	5,351	5,400	3,255	4,710	3,244	2,802
Bismuto	695	377	761	675	838	479	4,771	331	187
Cadmio	994	913	604	404	1,563	813	559	964	759
Cobalto	-	-	-	-	-	-	-	-	8
Cobre	6,119	10,049	40,939	36,016	13,272	20,530	7,755	18,880	1,529
Estaño	-	-	-	-	-	5,550	-	-	62
Hierro	5,726	58,255	55,716	25,280	333	16,659	22,187	21,659	23,771
Manganeso	7,762	63,075	147,706	195,863	265,695	194,091	179,164	257,213	198,509
Mercurio	1,208	1,278	824	746	1,012	397	297	478	216
Molibdeno	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Níquel	-	-	1	-	-	-	-	-	2
Plomo	89,252	76,862	75,391	67,301	130,715	101,892	73,148	88,251	86,921
Selenio	31	20	43	35	71	42	44	52	30
Tungsteno	459	522	475	522	349	3,053	301	407	437
Zinc	385,875	314,417	342,398	249,636	365,703	203,187	285,042	247,057	230,186
No Especificados	-	-	-	-	-	-	1,486	-	-

* Se refiere a peso bruto

FUENTES: S.P. y F.I. Consejo de Recursos Minerales
S.P.P. Dirección General de Estadística
Banco de México, S. A. (1)

Bulgaria, Corea del Sur, República Popular China, Estados Unidos y Japón, sin embargo, los principales países productores son Chile, Estados Unidos, U.R.S.S., Canada, Zambia, Zaire, Perú, Polonia, Filipinas, Australia.

En la distribución mundial de las reservas de cobre, México tiene una participación de 4.6% con 25 000 000 toneladas, mientras que Estados Unidos cuenta con 101 000 000 ton, lo que le otorga un 18.6% y Chile con 107 000 000 ton el 19.7%.

Ahora bien, si se considera la capacidad cuprífera del país, se puede concluir que México se perfila como uno de los grandes productores de cobre, capaz de competir con Chile. Especialistas en el ramo suponen que México pasará del decimoséptimo al sexto lugar mundial de producción de cobre antes de 1985. (16)

Entremezclados con el cobre se encuentran dos minerales de importancia: molibdeno y cobalto; el primero se utiliza en la fabricación de armamento y el cobalto en la construcción de aparatos de alta precisión, como los de aeronavegación y aeroespacial. Investigadores del área minera informan que se han encontrado minas cupríferas con alto contenido de cobalto en Durango, Sinaloa y Puebla, lo único que falta es el capital necesario para su explotación, por lo que México resultará muy atractivo para las corporaciones transnacionales.

Otro de los principales metales no ferrosos con que México cuenta son:

Plomo, el cual aporta el 5.1% de la producción mundial con 173 000 toneladas y ocupa uno de los primeros lugares entre los principales países productores junto con Estados Unidos, Australia y Canada. La participación en las reservas mundiales es de 3.2%, mientras que Estados Unidos cuenta con el 26.8%, Australia el 14% y Canada 12.7%.

Otro metal con que México cuenta es el zinc, el cual está siendo estudiado para poder reemplazar a otros metales en diversas utilidades; México se encuentra entre los primeros lugares de producción mundial con una aportación de 4.3%, siendo superado por Canada con 18%, Australia con 8.5%, Perú con 8.3%. Estudios recientes aseguran que las aleaciones de zinc están tendiendo a reemplazar en algunos casos a las fundiciones de hierro, fabricaciones de acero y baleros de bronce. (14), (15)

México también ocupa uno de los primeros lugares en la producción de cadmio junto con Japón, Estados Unidos y Bélgica.

Desde el punto de vista minero, la zona más importante de México es el norte. Chihuahua, Coahuila, Durango, Zacatecas y San Luis Potosí aportan en conjunto el 100% del carbón, el 87% del plomo, el 80% del zinc, el 75% de la fluorita,

el 54% de la plata, el 47% de fierro y el 38% del oro que se produce en el país. En esta región además se encuentran las mayores plantas de beneficio de minerales.

En Baja California se produce el 63% del cobre y menores cantidades de oro y plata. En la zona centro-occidente se produce el 50% de fierro y la cuarta parte de la producción nacional de oro, también se explota plata, cobre, plomo y barita. La zona centro es importante en la producción de manganeso y también produce algo de plata.

Uno de los problemas de la industria minera en México, es que no cuenta con suficiente capital; es por esto que las empresas transnacionales, asociadas a consorcios mexicanos, controlan la mayor parte de la producción minera nacional. Desafortunadamente México depende de países altamente desarrollados no solo en cuanto a capital, sino también en lo que se refiere a nueva maquinaria, equipo e innovaciones técnicas. No obstante, durante los últimos diez años la participación de los inversionistas nacionales y la del Estado es cada vez mayor.

Una investigadora del Instituto de Geografía dice: "Actualmente en México, conviven tres tipos de minería; la llamada "gran minería", los pequeños y medianos mineros y la minería de participación estatal. La primera está concentrada en unos cuantos consorcios de carácter transnacional, aún cuando haya en ellos capital mexicano, entre los que sobresalen: Industrias Peñoles, Industrial Minera México, Compañía Minera de Cananea y la Minera Frisco; además de la Dominicana, Industrias Luismin, Compañía Minera Autlán, Mexicana de Cobre.

Estas empresas controlan la mayor parte de la producción total del país, tanto de minerales en bruto, como de productos beneficiados; el plomo, zinc, antimonio, arsénico, bismuto, grafito, fluorita y la fosforita.

En tanto, la pequeña y mediana minería apoyada por los planes estatales, dependen en gran parte de la gran minería, ya que no poseen fundidoras ni plantas de beneficio; este grupo minero es responsable de la producción total del estaño, mercurio, tungsteno y barita, a la vez que participa de modo importante en la obtención de oro y plata.

Por último, el sector oficial tiene a su cargo varias regiones mineras y produce más de la mitad de la plata, del fierro y del cobre, y cerca del 90% del manganeso." (14)

2.2. UTILIZACION DE LOS METALES NO FERROSOS.

En las últimas décadas el uso de los metales no ferrosos y sus aleaciones se ha ido extendiendo considerablemente y en algunos casos han desplazado a otros materiales.

Se acostumbra describir las aleaciones comerciales no ferrosas, organizándolas en familias, con base en los principales elementos que se encuentran en ellas, tales como las aleaciones de aluminio, las de cobre, etc.

2.2.1. ALUMINIO.

El aluminio es utilizado en la industria automotriz, en aviación, en la industria de la defensa; sus uso es cada vez más importante en: a) la distribución de electricidad: cables de aluminio-acero; b) en construcción y arquitectura: cubiertas, carpintería metálica, paneles; c) la construcción automotriz: carrocerías de camiones y autobuses; d) los transportes: vagones para trenes de pasajeros y mercancías; e) la marina: superestructuras y cuadernas; f) el embalaje: recipientes y papel aluminio; g) los utensilios domésticos.

El aluminio tiene buena maleabilidad y formabilidad, alta resistencia a la corrosión y gran conductividad eléctrica y térmica. Una de las características más importantes del aluminio es su maquinabilidad y su capacidad para ser trabajado; se puede fundir mediante cualquier método conocido, laminado a cualquier espesor deseado, estampado, estirado, rolado, forjado y extruido a casi cualquier forma imaginable; su densidad es aproximadamente una tercera parte de la del acero o de las aleaciones al cobre. Todo eso le ha llevado a ser el segundo metal más utilizado después del hierro.

El aluminio puro tiene una resistencia tensil de unas 13 000 lb/pulg²; sin embargo, pueden obtenerse grandes incrementos en resistencia mediante el trabajado en frío o por aleación; algunas aleaciones, adecuadamente tratadas en forma térmica, se aproximan a resistencias tensiles de 100 000 lb/pulg².

Para que una aleación exista, los elementos aleados deben de ser compatibles entre sí, con características semejantes, los elementos que pueden alearse con el aluminio son: magnesio (Mg), cobre (Cu), zinc (Zn), manganeso (Mn), titanio (Ti), silicio (Si), circonio (Zr), plomo (Pb).

Las aleaciones de aluminio se han ideado para cumplir una gran variedad de funciones muy específicas, una de las primeras aleaciones que se fabricaron fue el duraluminio, que se empleó en la construcción de dirigibles y en forma modifica

da, en nuestros días , en aeronavegación.

El duraluminio es una aleación ligera con una excelente resistencia mecánica, se compone de 94.5% de aluminio, 4% de cobre, 0.5% de manganeso, 0.5% de magnesio, y proporciones menores de hierro y silicio. Este metal puede ser vaciado, laminado, forjado, estirado, etc, con facilidad y puede ser endurecido sometándolo a tratamientos térmicos, su uso se debe en gran parte a su poco peso y su elevada resistencia a los agentes químicos.

Las adiciones de otros elementos para formar aleación con el aluminio tienen efectos específicos; por ejemplo, el cobre se añade principalmente para formar un sistema de aleación que puede endurecerse por envejecimiento o precipitación, aunque el cobre perjudica la resistencia a la corrosión del aluminio, sus efectos dañinos se minimizan por medio de un tratamiento apropiado de solución y precipitación. El silicio se añade para mejorar las características de colado , ayuda a la fluidez de las piezas de fundición, aunque es perjudicial para la ductilidad y la facilidad de trabajo de las aleaciones fraguadas. Junto con el silicio puede añadirse magnesio, para mejorar la resistencia a la corrosión y formar una aleación de magnesio y silicio, que se puede endurecer por envejecimiento.

Dentro de los desarrollos importantes para el aluminio, en los modelos automotrices, esta el nuevo motor V8 del Cadillac que reemplaza 200 lb (90 Kg) de volumen con unas 42 lb (19 Kg) de aluminio; en tanto Ford Co. piensa ahorrar 40 lb (18 Kg) usando aleación de aluminio AA319 para reemplazar fundición de hierro en las cabezas de cilindro del motor V6 del Continental. ⁽¹⁵⁾

También los múltiples de admisión de aluminio para cuatro, seis y ocho cilindros están reemplazando virtualmente a la fundición de hierro.

The Aluminum Assn. estudia una nueva aleación que proporciona alta resistencia en calibres pequeños para partes estampadas de la carrocería, esta aleación es llamada X2038, tiene una elongación del 25%, con tratamiento térmico T4, una resistencia a la tensión de 55 000 psi y límite elástico de 47 000 psi. Otras nuevas aplicaciones automotrices son listadas por The Aluminum Assn., ellas son: - ruedas forjadas y fundidas, soportes para la estructura de la transmisión (usando la aleación 7021) para camiones ligeros, y el uso en partes estampadas de las defensas, hechas de la aleación 7029. ⁽¹⁵⁾

En Chrysler Co. con su nuevo motor de cuatro cilindros se reemplazaron piezas que para motores de seis y ocho cilindros eran de hierro fundido como son la ca

beza y el múltiple de admisión con fundiciones de aluminio y los pistones tanto de 4, 6 y 8 son fabricados con aluminio.

2.2.2. COBRE.

Después del aluminio, el cobre es uno de los metales no férreos más importantes, se utiliza ampliamente en la industria eléctrica para un extenso campo de aplicaciones, desde los cables de alta tensión aéreos que transportan megavattios de potencia hasta los de las instalaciones eléctricas domésticas. Aunque últimamente, el aluminio resulta más barato que el cobre y gracias a su gran comercialización un conductor más barato; actualmente esta desplazando al cobre en aplicaciones tales como tendidos aéreos de alta tensión; pero nunca llegará a sustituirlo completamente como material eléctrico para aplicaciones en las que se dispone de poco espacio, como en los devanados de motores, donde la conductividad por unidad de volumen es el criterio determinante. Además, el cobre goza de la ventaja de que es fácil de soldar, y por su buena resistencia a la oxidación los interruptores se comportan de modo satisfactorio cuando están dotados de contactos de cobre.

Las aleaciones comerciales de cobre más importantes se pueden clasificar como se indica en la tabla 2.5 y sus usos se mencionan a continuación.

LATONES. Son aleaciones de cobre y zinc, algunas de las cuales tienen pequeñas cantidades de otros elementos, como plomo, estaño o aluminio, las variaciones en composición dan como resultado las características de color, resistencia, ductilidad, maquinabilidad, resistencia a la corrosión deseadas o una combinación de tales propiedades.

Los latones alfa (α) que contienen hasta 36% de zinc poseen relativamente buena resistencia a la corrosión y buenas propiedades de trabajo. El color de los latones α varía de acuerdo con el contenido de cobre, desde rojo en las aleaciones al alto cobre, hasta amarillo en los contenidos de 62% de cobre. Los latones α pueden dividirse en dos grupos: latones amarillos alfa (α) y latones rojos.

Los latones amarillos α contienen de 20 a 36% de zinc, combinan la buena resistencia con la alta ductilidad y, por tanto, son adecuados para efectuar drásticas operaciones de trabajo en frío.

Los latones amarillos α que más se utilizan son el latón para cartuchos (70Cu 30Zn) y el latón amarillo (65Cu - 35Zn). Entre las aplicaciones típicas se encuentran las automotrices: paneles para radiador, tanques, fanales; cubiertas -

TABLA 2.5 ALEACIONES DE COBRE.

-
- Latones. Aleaciones de cobre y zinc
 - a) Latones alfa. Aleaciones que contienen hasta 36% de zinc
 - i) Latones amarillos alfa, 20 a 36% de zinc
 - ii) Latones rojos, 5 a 20% de zinc
 - b) Latones alfa más beta, 54 a 62% de cobre (38 a 46% de zinc)
 - c) Latones beta, más de 46% de zinc
 - Bronces. Hasta 12% de elemento de aleación
 - a) Bronces al estaño
 - b) Bronces al silicio
 - c) Bronces al aluminio
 - d) Bronces al berilio
 - Cuproníqueles. Aleaciones de cobre y níquel
 - Platas níquel. Aleaciones de cobre, níquel y zinc
-

para linternas eléctricas portátiles, aditamentos para lámpara, cubiertas para tornillo; ferretería: ojos de cerraduras, remaches, resortes; accesorios para plomería y componentes para municiones.

La adición de 0.5 a 3% de plomo mejora la maquinabilidad, de manera que el latón plomado se utiliza en piezas de máquinas para hacer tornillos, llaves, piezas de cerraduras, tambores, engranes y piezas para reloj.

Los latones rojos contienen entre 5 y 20% de zinc; generalmente tienen mejor resistencia a la corrosión que los latones amarillos. Los latones al bajo zinc más comunes son el oropel (95Cu - 5Zn), el bronce comercial (90Cu - 10Zn), el latón rojo (85Cu - 15Zn) y el latón bajo (80Cu - 20Zn).

Los latones que contienen de 54 a 62% de cobre (38 a 46% de zinc) son los llamados latones alfa más beta ($\alpha + \beta$), el más utilizado es el metal muntz (60Cu - 40Zn), el cual tiene alta resistencia y excelentes propiedades de trabajado en caliente, en forma de láminas se utiliza para cubiertas de barcos, cabezas de condensador y trabajos de arquitectura, así como para vástagos de válvulas, varillas para soldadura en latón y tubos de condensadores. El metal muntz plomado que contiene de 0.40 a 0.80% de plomo tienen mayor maquinabilidad.

Los latones beta que contienen más del 46% de zinc, son más duros pero menos

dúctiles que los alfa.

BRONCES. El término bronce se aplicó originalmente a las aleaciones cobre - estaño; sin embargo, ahora el término se emplea para designar cualquier aleación de cobre que contenga hasta aproximadamente 12% del elemento principal de aleación. Los bronce comerciales son sobre todo aleaciones de cobre - estaño, aluminio, silicio o berilio; además, pueden contener fósforo, plomo, zinc o níquel.

Los bronce al estaño generalmente se refieren a bronce al fósforo, ya que éste siempre se halla presente como un desoxidador al fundir; el rango usual de contenido de fósforo está entre 0.01 y 0.5% y el del estaño entre 1 y 11%. Los bronce al fósforo se caracterizan por: tenacidad, alta resistencia a la corrosión, bajo coeficiente de fricción y libertad de presencia de fisuras por esfuerzo de corrosión; se utilizan ampliamente para bujes, discos de embrague y resortes.

A fin de mejorar la maquinabilidad y la resistencia al desgaste se le añade plomo; el bronce al estaño al alto plomo puede contener 25% de plomo y se utilizan para bujes y cojinetes sujetos a cargas moderadas o ligeras.

Los bronce al silicio son los más fuertes de las aleaciones de cobre endurecibles por trabajo, tienen propiedades mecánicas comparables a las de los aceros al medio carbón y resistencia a la corrosión comparable a la del cobre; se utilizan para tanques, recipientes de presión, construcción marina y conductos hidráulicos sujetos a presión.

La mayoría de los bronce al aluminio comerciales contienen entre 4 y 11% de aluminio. Los bronce al aluminio que contienen hasta 7.5% de aluminio muestran buenas propiedades de trabajado en frío y gran resistencia, combinadas con resistencia a la corrosión por ataque atmosférico y por agua; se utilizan en tubos para condensador, piezas trabajadas en frío, recipientes que resisten la corrosión, tuercas y tornillos y cubiertas de protección en aplicaciones marinas. Si la aleación posee entre 7.5 y 11% de aluminio podrá templarse; estos bronce al aluminio tratados térmicamente se utilizan para engranes, ejes motrices, aleatas, piezas de bombas, cojinetes, bujes, herramientas que no formen chispas y dados para estiramiento y formado.

Los bronce al berilio se utilizan para piezas que necesitan una combinación de excelente formabilidad en la condición suave con alta resistencia de cedencia, mediana resistencia a la fatiga y resistencia a la fluencia en la condición de endurecido (muchos resortes); piezas que requieren resistencia a la corrosión, alta resistencia y relativamente alta conductividad eléctrica (diafragmas, puen

tes de contacto, instrumentos quirúrgicos, pernos y tornillos); piezas duras - que se desgastarán bastante contra acero endurecido (troqueles, herramientas - que no provoquen chispas).

CUPRONIQUELES. Son aleaciones al cobre - níquel que contienen hasta 30% de níquel, tienen alta resistencia a la corrosión por fatiga y a la acción corrosiva y erosiva del rápido movimiento del agua de mar; se emplean mucho en tubos de - condensadores, destilerías, evaporadores e intercambiadores de calor para recipientes navales y plantas de energía costera.

PLATA ALEMANA O LATON AL NIQUEL. Son aleaciones ternarias de cobre, níquel y - zinc; las aleaciones comerciales se producen con la siguiente variación de composición: cobre de 50 a 70%; níquel de 5 a 30%; y zinc, de 5 a 40%. Se utilizan para remaches, tornillos, utensilios de mesa, joyería de fantasía; entre las - aplicaciones típicas de las platas alemanas se incluyen resortes y contactos en equipo para teléfonos, alambres para resistencias, ferretería y equipo quirúrgico y dental.

2.2.3. NIQUEL.

Otras aleaciones que contienen cobre son el monel y el constantán pero caen dentro de las aleaciones de base níquel. Los elementos de aleación más comunes con níquel son el cobre, el hierro, el cromo, el silicio, el molibdeno, el manganeso y el aluminio.

El monel es la más importante de las aleaciones níquel - cobre; contiene aproximadamente dos terceras partes de níquel y una de cobre; tiene alta resistencia a los ácidos, álcalis, salmueras, aguas, productos alimenticios y a la atmósfera; además, posee propiedades mecánicas mayores que las de los latones y bronce. El monel tiene amplia y extensa utilización en los campos químico, farmacéutico, marino, energético, eléctrico, de lavandería, textil y equipo de fabricación de papel.

El constantán (45% níquel, 55% cobre) tiene la más alta resistividad eléctrica, el más bajo coeficiente de resistencia eléctrica a la temperatura y la más alta fem térmica junto con el platino, de cualquiera de las aleaciones cobre-níquel. Las dos primeras propiedades son importantes para resistores eléctricos, mientras que la última es deseable para termopares.

2.2.4. PLOMO.

Uno de los metales con que México cuenta en abundancia es el plomo. En términos generales la mayor parte de la producción mundial de plomo se utiliza en la manufactura de acumuladores eléctricos, seguido por el uso de plomo tetraetilo como ingrediente antidetonante en la gasolina de alto rendimiento.

El alto peso del plomo lo hace adecuado para usos como pesos y contrapesos y su alta densidad para proteger contra rayos β y γ , su suavidad para hacer empaquetaduras y para uniones apretadas a martillo en tubos de hierro fundido y su flexibilidad para forrar cables. Como recubrimiento sobre alambre, el plomo actúa como lubricante de estiramiento. Se aprovecha la alta resistencia a la corrosión del plomo utilizándolo para equipo en la industria química (como material para techos) y en la industria de la plomería (como tubo para transportar agua y sustancias químicas). Además, el plomo se emplea para mejorar la maquinabilidad de bronces, latones y aceros de alta maquinabilidad.

Los elementos de aleación más comunes del plomo son el antimonio y el estaño. El metal Terne es una aleación plomo - estaño que contiene de 10 a 25% de estaño, se utiliza con el fin de recubrir láminas de acero para techos y en aplicaciones de tanques de combustible para automóviles.

Las aleaciones plomo - estaño - antimonio se utilizan ampliamente en la industria tipográfica como tipos (caractères) de imprenta. La base de plomo proporciona bajo costo, bajo punto de fusión y facilidad de fundición; las adiciones de antimonio proporcionan dureza y resistencia al desgaste, además de disminuir la temperatura de fundición; las adiciones de estaño incrementan la fluidez, reducen la fragilidad y dan una estructura más fina.

Las aleaciones que tienen como base al plomo se conocen comercialmente como babbits o aleaciones de metal blanco. Estas aleaciones se utilizan principalmente como cojinetes.

2.2.5. ESTAÑO.

El estaño como metal casi siempre se utiliza combinado con otros metales, en forma de recubrimiento protector o de aleación. La hojalata, empleada principalmente para fabricar botes y latas de conservas, consume más del 40% del estaño producido y es por lo tanto la aplicación más importante de este metal.

Los elementos de aleación más comunes para el estaño son el antimonio y el cobre para producir peltre (aproximadamente 92% de estaño, 6% de antimonio y 2% -

de cobre) y las aleaciones de babbit a base de estaño que se utilizan para anti-friccionantes de alta calidad (la gran mayoría de cojinetes de fricción).

2.2.6. ZINC.

El zinc se emplea principalmente como recubrimiento para el acero a fin de evitar la corrosión (galvanización) mientras que la fabricación de latón utiliza otro tanto.

Para propósitos de estiramiento profundo, debe utilizarse zinc relativamente pu ro; entre las aplicaciones típicas se incluyen cascos estirados y extruidos para pilas, ojos de cerraduras y arandelas. Agregar plomo y cadmio da como resultado mayor dureza, rigidez y una reacción uniforme al ataque químico; se utiliza para latas soldadas para batería y placas para fotograbado.

Una de las aplicaciones más importantes del zinc es la fundición de piezas por moldeo en matriz (a presión), ya que combina un bajo punto de fusión con buena resistencia. Una aleación típica para moldeo a presión es la llamada Zamac.

Las dos aleaciones de uso general se conocen como Zamac-3 (ASTM AG40A, SAE 903) y Zamac-5 (ASTM AC41A, SAE 925). Ambas contienen aproximadamente 4% de aluminio y 0.04% de magnesio. La Zamac-3 tiene ductilidad ligeramente mayor y retiene su resistencia a cargas aplicadas con impacto mejor a temperatura ligeramente elevada. La Zamac-5, con aproximadamente 1% de cobre, es un poco más dura y fuerte y tiene capacidad de fundido ligeramente menor. Ambas se utilizan para piezas de automóvil, utensilios domésticos, ferretería de edificios, candados y juguetes.

La aleación de zinc que contiene 1% de cobre y un 0.1% de titanio se utiliza como material para el acabado de techos; esa pequeña cantidad de titanio aumenta enormemente la resistencia del material a la deformación por deslizamiento; en el otro extremo, la aleación de zinc y aluminio es muy dúctil.

El zinc mejora sus propiedades al combinarlo con un 3 o 5% de aluminio, se logra una aleación muy especial por sus propiedades superplásticas; esto es, la aleación obtenida puede estirarse en ciertas condiciones de temperatura y rapidez de deformación, hasta un 10 000% con cargas tan bajas como 3 Kg/mm², ello resulta impresionante al considerar que el aluminio no puede ser estirado, en las mismas condiciones, más allá de un 80% sin fracturarse. (14)

Las aleaciones de zinc con un mínimo de 22% y un máximo de 40% de aluminio pueden substituir satisfactoriamente a productos fabricados con aleaciones ricas en aluminio para la industria de la construcción. (14)

The International Lead Zinc Research Organization Inc. (Organización Internacional de Investigación de Zinc, Plomo) afirma: "El crecimiento de aleaciones 8,12 y 27 de fundición de zinc - aluminio continúa acelerándose y moviéndose en los mercados anteriormente servidos por bronce, aleaciones de aluminio y hierro fundido." (15)

También estudios recientes realizados en el Instituto de Investigaciones en Materiales (IIM) señalan que las aleaciones de zinc - aluminio pueden substituir al aluminio⁽¹⁴⁾. Esta es una buena noticia para México pues por una parte reduce el consumo nacional de aluminio, que se ha duplicado en los últimos años, pasando de 72 692 toneladas en 1977 a 149 000 en 1980, además de no aumentar el consumo de la energía eléctrica empleada para la producción de aluminio y por último se aprovecha el zinc, una materia prima nacional abundante y subutilizada, ya que de las 170 000 toneladas de zinc refinado producidas en México en 1978, se exportaron 100 000 a un precio muy inferior al del aluminio primario.

Concluida la etapa experimental en el IIM se inicia la de aplicaciones para el uso comercial de las aleaciones de zinc y aluminio que por su ligereza y alta resistencia a la corrosión van desplazando al hierro en la industria de la construcción. Comenta un miembro del IIM, "Considerando que el consumo de aluminio en esta rama es de 60 000 toneladas al año, las aleaciones de zinc con un 20% de aluminio lograrían un ahorro mínimo de 48 000 toneladas, que podrían ser utilizadas en aquellos casos en que la ligereza si es importante; al mismo tiempo, se utilizaría una cantidad apreciable de zinc, que se dejaría de exportar a precios muy bajos." (14)

3. MECANISMOS DE ENDURECIMIENTO EN METALES NO
FERROSOS Y SUS ALEACIONES.

3.1. DESLIZAMIENTO Y DISLOCACIONES

3.2. ENDURECIMIENTO POR DEFORMACION O
TRABAJO EN FRIO.

3.3. ENDURECIMIENTO POR ENVEJECIMIENTO
O PRECIPITACION.

3.4. ENDURECIMIENTO POR SOLUCION.
(ALEACIONES).

3.5. ENDURECIMIENTO POR DISPERSION

3.6. ENDURECIMIENTO POR TEXTURA

La industria requiere en variadas ocasiones de materiales "fuertes", que sean - tenaces y resistentes para ser utilizados en áreas de trabajo pesado (para que un material sea tenaz, no solo debe poseer resistencia, sino también ductilidad, siendo esta última la capacidad que tienen los metales para deformarse permanentemente, antes de la ruptura); para lograr estas características se requiere - que el material sea endurecido; esto es, que sufra cambios a favor de un incremento en resistencia y dureza; estos cambios dependen principalmente de la estructura del material. De aquí se desprende que la estructura es un factor primordial para definir el comportamiento mecánico de un material, este parámetro depende de la composición química, de los procesos mecánicos y térmicos a los - cuales se sometió el material.

Para lograr esos cambios en el material se recurre a los mecanismos de endurecimiento; entre los cuales, en los metales no ferrosos los más importantes son:

- Endurecimiento por Deformación o Trabajo en frío
- Endurecimiento por Envejecimiento o Precipitación
- Endurecimiento por Solutos (Aleación)
- Endurecimiento por Dispersión
- Endurecimiento por Textura

Es importante recordar que siempre que haya distorsión de la estructura reticular, ya sea resultado de deformación plástica, tratamiento térmico o aleación , habrá un incremento en la resistencia y dureza del material.

Un concepto básico para la comprensión de algunos mecanismos de endurecimiento es la Teoría del Deslizamiento y las Dislocaciones, que se explica a continuación.

3.1. DESLIZAMIENTO Y DISLOCACIONES.

El deslizamiento es un resbalamiento de capas planas y paralelas de átomos, en los cristales de sustancias metálicas. La disposición ordenada de los átomos - dentro de las capas es la misma antes y después del movimiento, y no cambia la alineación de las celdas unitarias en los cristales; sin embargo, los átomos de una capa cualquiera se alinean con nuevos vecinos distintos de capas adyacentes, como resultado del deslizamiento. Este se produce con mayor facilidad en ciertos planos cristalográficos que en otros, y dentro de esos planos, con mayor facilidad en ciertas direcciones que en otras. El deslizamiento se produce paralelamente a los planos atómicos más densamente poblados de átomos.

Un sistema de deslizamiento consiste en la combinación de una línea de alta den

sidad atómica, que se encuentra en un plano también de alta densidad; o sea, un sistema de deslizamiento incluye una dirección y un plano de deslizamiento.

Una dislocación es una imperfección o defecto lineal en la estructura de un cristal y puede ser de borde o de tornillo (fig 3.1). El vector de Burgers b es una propiedad de la dislocación y describe la magnitud y dirección del deslizamiento.

Cuando se presenta una dislocación, el deslizamiento se produce debido al movimiento de la dislocación a través del plano de deslizamiento (fig 3.2).

La densidad de las dislocaciones se indica de acuerdo con el número de veces que las líneas de dislocación intersectan un área unitaria del cristal. Las estimaciones de la concentración, en cristales buenos y cuidadosamente preparados se acercan a 10^5 cm^{-2} , y alcanzan aproximadamente 10^{12} cm^{-2} en cristales deformados.

Cuando un material metálico se somete a un esfuerzo, las dislocaciones, en el interior del sólido, tienden a desplazarse.

Si dos dislocaciones paralelas de signo contrario se desplazan, una hacia la otra, cuando se encuentran se produce una cancelación, como resultado de ello, el material se hace más fuerte. Las dislocaciones de signo contrario pueden alejarse también una de la otra, dirigiéndose hacia los límites del cristal, al llegar a la superficie, quedan eliminadas de la estructura; esto también da como resultado un aumento de la resistencia. La intersección de un par de dislocaciones no paralelas, produce un codo o escalón en una o ambas líneas de dislocación. La presencia de codos disminuye la movilidad en las dislocaciones por lo que se requiere una mayor cantidad de trabajo para desplazar una dislocación con codos que un recta.

Cuando una dislocación es desplazada se supone que los átomos se deslizan consecutivamente, empezando en un sitio en el plano de deslizamiento y que después se mueven hacia afuera sobre el resto del plano. Puede hacerse una analogía con el movimiento de un gusano, en la fig 3.2 se muestra que, con la aplicación de la fuerza tangencial, se ha formado un plano extra de átomos (dislocación) encima del plano de deslizamiento. Esta dislocación se mueve a través del plano de deslizamiento y deja un escalón cuando sale a la superficie del cristal.

La facilidad con que una dislocación se mueve de un lado a otro del plano de deslizamiento es indicación de la ductilidad del material; sugiere que los materiales pueden hacerse más duros si se colocan varios obstáculos en el camino de las dislocaciones.

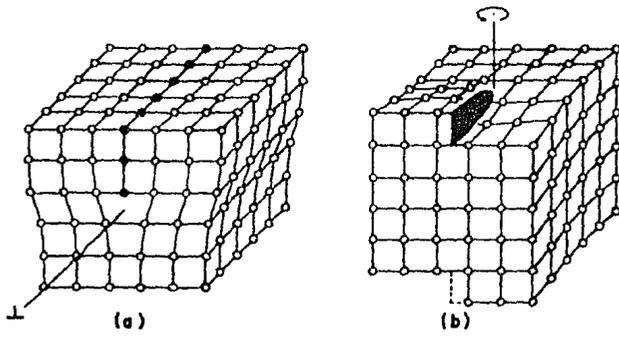


Figura 3.1 Geometría de las dislocaciones simples: (a) dislocación de borde y (b) dislocación de tornillo. Se indican las líneas usadas normalmente para la representación de las dislocaciones, así como los símbolos para éstas \perp y \odot

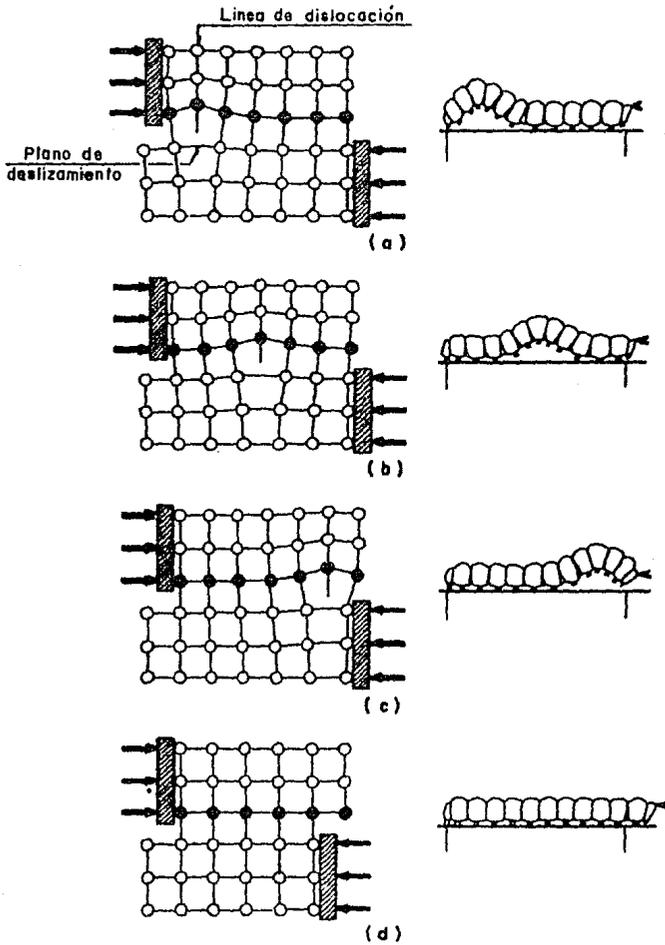


Figura 3.2 Analogía entre el movimiento de una dislocación a través de un cristal y el movimiento de un gusano conforme arquea su parte posterior mientras avanza.

Si la dislocación es bloqueada por una obstrucción, las dislocaciones siguientes, en el mismo plano y con el mismo signo, se amontonan detrás; las obstrucciones que causan bloqueos incluyen átomos extraños y defectos, tales como los límites de grano (esto nos lleva a pensar que los metales también pueden ser endurecidos reduciendo el tamaño de los granos). Con el fin de desplazar las dislocaciones bloqueadas más allá de la obstrucción, debe incrementarse la fuerza aplicada; es por esto, que los bloqueos hacen aumentar la resistencia del material.

Teniendo presentes los conceptos anteriores es posible comprender los mecanismos de endurecimiento que a continuación se describen.

3.2. ENDURECIMIENTO POR DEFORMACION O TRABAJO EN FRIO.

Antes de exponer este mecanismo de endurecimiento, expliquemos que el término "frío" es relativo, significa que se trabaja a una temperatura que no altera los cambios estructurales producidos por el trabajo; el trabajo en frío hace que los átomos se muevan y que se formen nudos de dislocación. La temperatura que distingue al trabajo en frío del trabajo en caliente no es fija, sino que, más bien, es una temperatura que varía de acuerdo con la composición particular que se esté estudiando.

El trabajo mecánico que no produce endurecimiento por deformación se conoce como trabajo en caliente, esto es, a una temperatura suficiente para que ocurra la recristalización al mismo tiempo que se deforma o trabaja el material. El trabajo en frío es la deformación a temperaturas a las que no puede ocurrir la recristalización y produce endurecimiento por deformación. El trabajo en frío provoca el aplanamiento de los granos, en tanto que, el trabajo en caliente produce una distorsión momentánea de los granos; pero se forman inmediatamente nuevos granos no distorsionados, que absorben a los distorsionados. A diferencia del trabajo en frío, el trabajo en caliente, no solo no produce endurecimiento por deformación, sino que tampoco consume ductilidad y tenacidad.

Cuando un material cristalino se deforma elásticamente; significa que, si la carga se elimina, la pieza recupera su longitud original. Se dice que el material sobrepasó su límite elástico cuando la carga es de magnitud suficiente para iniciar una deformación plástica, esto es, que el material no recupera su longitud original si se elimina la carga aplicada.

Cuando el material sufre la deformación plástica, se vuelve más resistente; esto es, se endurece por deformación o trabajo y se requiere un aumento de esfuerzo

para continuar deformándolo. La pendiente de la curva de esfuerzo contra deformación define la velocidad de endurecimiento.

Para ilustrar este mecanismo de endurecimiento veamos la fig 3.3. A medida que se aplica un esfuerzo en la región de deformación plástica, ocurre un deslizamiento en los planos de orientación preferida, produciéndose dislocación y movimiento. Sin embargo, al presentarse más y más deslizamiento, las dislocaciones interactúan, se amontonan y se forma un nudo de dislocación. Esto hace que cada vez sea más difícil el deslizamiento. Todo ello lo muestra la curva creciente de esfuerzo - deformación. Para que se produzca mayor deformación, se necesita mayor esfuerzo.

Cuando se obtiene el punto A en la fig 3.3(a) todos los planos ya han sido ocupados, así como los lugares de dislocación que permitían un deslizamiento fácil. Cuando se retira la carga esta situación no varía; si se aplica nuevamente la carga, no es posible obtener una deformación plástica hasta no alcanzar el nivel de esfuerzo del punto A. En consecuencia, se encuentra únicamente deformación elástica hasta un nivel mayor que el de la fig 3.3(a) y el límite de fluencia es correspondientemente mayor.

En la laminación, estirado y otros procesos de deformación en frío, aproximadamente el 90% de la energía requerida se disipa como calor, el resto se almacena en la red cristalina aumentando así la energía interna. La energía almacenada aumenta a la par con la deformación hasta alcanzar un valor de saturación. Parte de este almacenamiento puede atribuirse a la formación de vacancias, pero en su mayoría se debe a la generación e interacción de las dislocaciones.

El endurecimiento está relacionado únicamente con el aumento de la densidad de dislocaciones. Por lo general, la densidad inicial de dislocaciones en un cristal es de magnitud menor a la requerida para producir la deformación a fractura. Por ejemplo, una densidad de dislocaciones típica para metales policristalinos recocidos, es alrededor de 10^7 a 10^8 líneas/cm³, mientras que el mismo material después de una severa deformación plástica contiene de 10^{11} a 10^{12} líneas/cm³.

3.2.1. PROCESOS DE FABRICACION CON ENDURECIMIENTO POR TRABAJO.

Si queremos aumentar el límite de resistencia a la fluencia con endurecimiento por trabajo o deformación solo necesitamos producir un deslizamiento, esto puede lograrse bajo un esfuerzo de compresión o tensión, por lo tanto, existe una gran variedad de métodos, de los cuales se dan unos ejemplos en la fig 3.4; con la ventaja de que al mismo tiempo, se puede producir la forma definitiva desea-

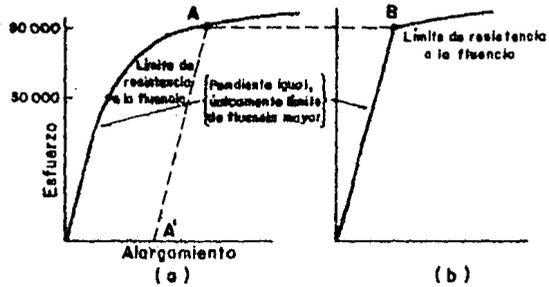


Figura 3.3 Correlación del endurecimiento por trabajo en frío con la curva esfuerzo-deformación. Las unidades del esfuerzo están en $[lb./pulg.^2]$

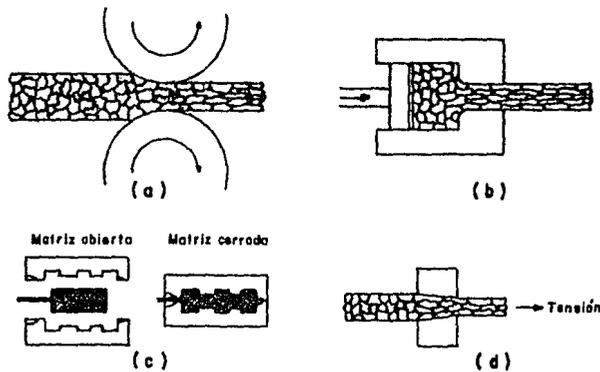


Figura 3.4 Métodos para endurecer por trabajo durante el procesamiento. (a) Laminado en frío de varillas o láminas. (b) Extrusión en frío. (c) Formado en frío, estampado, forja. (d) Trefilado en frío.

da. En todos estos casos la pieza se hace más resistente por medio del trabajo en frío; otro efecto importante es que la pieza se endurece, y se hace más resistente al desgaste y a la fricción.

Es necesario aclarar que en muchos procesos comerciales de trabajado de metales existe un límite en la cantidad de deformación que puede aplicarse a una pieza, sin romperla. Por esta razón a menudo se recuece el material para eliminar los efectos del trabajo en frío. En el recocido el metal o la aleación que se ha trabajado en frío, se calienta a una temperatura adecuada, después del trabajo, esa temperatura se denomina temperatura de recocido y es mayor que la temperatura de recristalización. El recocido y la recristalización son la causa de la eliminación de un número elevado de dislocaciones, ya que por medio de este tratamiento se producen nuevos granos, libres de deformación. También como resultado del recocido, tiende a reducirse la resistencia elástica, mejorando la tenacidad y la ductilidad con respecto a las condiciones del trabajado en frío recuperando la blandura; el material así reblandecido puede deformarse nuevamente.

3.3. ENDURECIMIENTO POR ENVEJECIMIENTO O PRECIPITACION.

De los métodos de endurecimiento enunciados al principio, dos son los principales para aumentar la resistencia y la dureza de una aleación dada: Trabajo en Frío y Tratamiento Térmico. El proceso de tratamiento térmico más importante para aleaciones no ferrosas es el de endurecido por envejecimiento o por precipitación. Para aplicar este tratamiento térmico, el diagrama de equilibrio debe mostrar solubilidad sólida parcial, y la pendiente de la línea solvus debe ser tal que haya mayor solubilidad a una temperatura mayor que a un menor. Una aleación típica que puede endurecerse por precipitación es el sistema aluminio - cobre que se muestra en la fig 3.5, donde puede observarse que se cumple la condición de solubilidad.

El cobre y el aluminio reaccionan químicamente para formar un compuesto intermetálico, que es el CuAl_2 . En ciertos aspectos, el CuAl_2 se comporta como un metal puro; tiene un punto definido de fusión, es soluble en el aluminio sólido, formando una solución sólida conocida como α , y el aluminio, a su vez, es ligeramente soluble en CuAl_2 sólido; formando la solución llamada θ .

En la fig 3.5 aparece el diagrama de fases del sistema, tomando el aluminio como uno de los componentes y el CuAl_2 como el otro. Puede verse que el CuAl_2 tiene una solubilidad máxima en el aluminio a 1018°F (548°C), 10.4 por ciento por peso del CuAl_2 es soluble a esa temperatura. Al disminuir esta últi-

ma, se reduce la solubilidad del CuAl_2 . A 575°F (300°C), por ejemplo, la solubilidad del CuAl_2 en el aluminio es de solo 0.83 por ciento por peso. Esa reducción de la solubilidad de un componente en otro, al disminuir la temperatura, es el requisito fundamental para que una aleación tenga la capacidad de endurecerse por medio de la precipitación.

Generalmente se necesitan dos etapas en un tratamiento térmico para producir en endurecido por envejecimiento: tratamiento de solución y envejecido.

TRATAMIENTO TERMICO DE SOLUCION. Si tomamos una aleación que contenga 4.0% de cobre ó 7.4% de CuAl_2 (fig 3.5) y se recalienta a 520°C manteniéndose a esa temperatura durante un período de tiempo suficientemente prolongado, todo el exceso de Θ se disolverá y la estructura será una solución sólida homogénea. Entonces la aleación se enfria con rapidez a temperatura ambiente. Con el exceso de Θ atrapado en la solución, resulta una solución sólida homogénea y supersaturada.

PROCESO DE ENVEJECIDO. La aleación, como se encuentra después de templarse, es una solución sobresaturada sólida y se encuentra en un estado inestable; a la temperatura ambiente, se descompone lentamente por medio de la precipitación de partículas de CuAl_2 (el exceso de soluble tiende a salir de la solución), las cuales aumentan de tamaño. Esas partículas bloquean el movimiento de las dislocaciones bajo esfuerzo, lo cual da como resultado un mejoramiento en la dureza y la resistencia; no obstante, puesto que ese crecimiento de las partículas depende de la difusión a la temperatura ambiente, el aumento de dureza se produce lentamente, en un período de varios días, es por esto que se conoce como en endurecimiento por envejecimiento natural.

La velocidad a que ocurre la precipitación varía con la temperatura; se ha experimentado que a baja temperatura, la razón de difusión es tan lenta que no hay precipitación apreciable; a alta temperatura, el endurecimiento se presenta pronto, debido a la rápida difusión, pero los efectos suavizantes también se aceleran, dando como resultado una dureza máxima menor. La temperatura óptima es la intermedia, a la que ocurre el máximo endurecimiento dentro de un tiempo razonable.

Las aleaciones que se recalientan a elevadas temperaturas para alcanzar su máxima resistencia reducen el tiempo necesario para la precipitación (dependiente de la difusión), y el endurecimiento se lleva a cabo en unas cuantas horas, las aleaciones así endurecidas se conocen como aleaciones de envejecimiento artificial o simplemente endurecimiento por precipitación.

La refrigeración retarda la razón de envejecimiento natural. A 32°F (0°C), el principio del proceso de envejecido se retarda por varias horas, mientras que - el hielo seco (-50 a -100°F; -45 a -73°C) retarda el envejecimiento por un largo período. En la industria aeronáutica se utiliza este hecho cuando los remaches de aluminio aleado, que suelen envejecer a temperatura ambiente, se mantienen dentro de refrigeradores con un alto grado de congelación hasta que se remachan; los remaches se han tratado previamente con un tratamiento de solución, y como tienen una fase única son muy dúctiles. Después de ser remachados, tendrá lugar el envejecimiento a temperatura ambiente, lo cual dará como resultado un incremento en la resistencia y en la dureza.

La primera teoría del proceso de envejecimiento establecía que la fase en exceso sale de la solución como finas partículas submicroscópicas, muchas de las cuales se ubican en los planos de deslizamiento. Se consideró que estas partículas tenían una acción clave, interfiriendo así con el movimiento a lo largo de los planos de fácil deslizamiento y aumentando de este modo la resistencia y la dureza.

Posteriores estudios han permitido comprender en forma más completa el proceso de endurecido por envejecimiento. El fortalecimiento de una aleación que se puede tratar térmicamente se debe no solo a la presencia de un precipitado, sino también a la distribución uniforme de un precipitado submicroscópico finamente disperso y a la distorsión de la estructura reticular por aquellas partículas - antes de que alcancen un tamaño visible.

No es posible establecer en forma definitiva de qué manera las partículas del - precipitado endurecen la matriz o red del solvente. Aunque hay diversas teorías acerca del endurecimiento por precipitación, la más útil es la coherente reticular. Después del tratamiento de solución y el templado, la aleación está en condiciones de sobresaturación, con los átomos del soluto distribuidos al azar dentro de la estructura reticular (fig 3.6 a).

Durante un período de incubación, los átomos de soluto excedentes tienden a emigrar a ciertos planos cristalográficos, formando racimos de precipitado. Durante el proceso de envejecimiento, estos racimos forman una estructura intermedia cristalina o red transicional, manteniendo coherencia con la estructura reticular de la matriz. La fase en exceso tendrá diferentes parámetros reticulares - que los del solvente y, como resultado de la coherencia de los átomos, habrá - una considerable distorsión de la matriz (fig 3.6 b). La distorsión de la matriz se extiende sobre un volumen mayor de lo que sería el caso si la fase en exceso

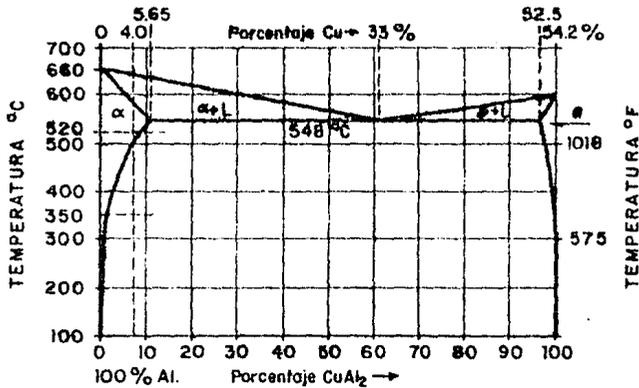
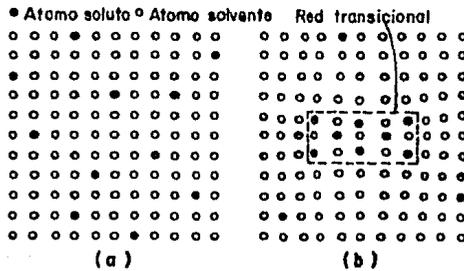


Figura 3.5 Endurecimiento por precipitación. Diagrama de equilibrio para el sistema Al-CuAl₂. En la parte superior del diagrama, se indica la composición en peso por ciento de cobre. El porcentaje por peso de CuAl₂ se muestra en la parte inferior del diagrama. En el texto se analiza una aleación que tenga 4.0 por ciento de cobre y el resto de Aluminio.



Precipitado en equilibrio

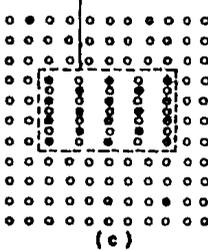


Figura 3.6 Etapas en la formación de un precipitado en equilibrio
 a) Solución sobresaturada sólida. b) Red transicional coherente con la solución sólida. c) Precipitado en equilibrio esencialmente independiente de la solución sólida.

fuera una partícula discreta. Esta distorsión interfiere con el movimiento de las dislocaciones y causa el rápido incremento en la dureza y en la resistencia durante el proceso de envejecimiento. Eventualmente, el equilibrio de la fase en exceso se forma con su propia estructura reticular (fig 3.6 c), lo cual da lugar a una pérdida en coherencia con la matriz y a menor distorsión. La dureza y la resistencia disminuirán, y la aleación estará "sobreenvejecida". Ahora habrá una frontera entre la fase en exceso y la matriz, de modo que la partícula precipitada será visible bajo el microscopio.

La dureza final obtenida por medio del endurecimiento por precipitación depende de varios factores. Entre otros se encuentran el tiempo y la temperatura empleada para la precipitación, y el grado de supersaturación del componente de precipitación.

Es importante recordar que uno de los requisitos que deben satisfacerse para obtener una aleación que pueda endurecerse por precipitación es una reducción de la solubilidad de un componente en otro, al disminuir la temperatura. Los diagramas de equilibrio que muestran esta característica tienen probabilidades de presentar aleaciones capaces de endurecerse por precipitación. Algunos ejemplos de aleaciones que se endurecen por medio de tratamientos de precipitación son : aluminio más cobre, aluminio más silicio, aluminio más níquel y cobre, cobre más berilio, cobre más silicio, cobre más estaño, magnesio más aluminio. Además, hay ciertos sistemas de base níquel, base de hierro y metales preciosos, que forman aleaciones endurecibles por precipitación.

3.4. ENDURECIMIENTO POR SOLUCION (ALEACIONES).

Cuando se alean pequeñas cantidades de un metal con grandes cantidades de otro, el resultado por lo general, es un mejoramiento de la resistencia del segundo metal. Cuando se excluye el tratamiento térmico, se dice que los resultados se obtienen por medio de la aleación simple. Los átomos extraños actúan como obstáculos para el desplazamiento de las dislocaciones, lo cual da como resultado un aumento de resistencia.

Entre los conceptos utilizados al analizar la aleación; uno de los más importantes es el de solución sólida.

El criterio básico de cualquier solución, ya sea sólida, líquida o gaseosa, es la homogeneidad. Esta característica de las soluciones requiere una distribución al azar y microscópicamente uniforme de los átomos o las moléculas de un tipo sobre las de otro; esa distribución da como resultado la similitud de aspecto y

otras propiedades, en toda la solución.

Las soluciones sólidas se forman con facilidad, por medio de la solidificación de soluciones líquidas, en las que ya existe homogeneidad. La elevación de la temperatura de las mezclas sólidas, hace que disminuya el tiempo necesario para la solución y la homogeneización, de tal modo que en estado sólido, a temperaturas cercanas a las de fusión, la solución se lleva a cabo con mucha rapidez.

Solvente y Solute. El ingrediente presente en mayor cantidad se conoce como solvente, o sea la substancia que efectúa la solución. El ingrediente presente en cantidades menores se denomina solute, o la substancia que se disuelve.

Los dos tipos más importantes de soluciones metálicas sólidas son el intersticial y el substitucional. Se produce una solución sólida intersticial, cuando los átomos del soluto, con radios atómicos de menos de 10^{-8} cm (H, C, B, δ N), se dispersan en los espacios situados entre los átomos del solvente. La solución sólida substitucional implica la substitución de átomos del soluto por otros del solvente, en la estructura cristalina. Este tipo de solución sólida está limitada por la diferencia de tamaño entre los átomos del soluto y los del solvente.

Ambos tipos de solución sólida producen distorsiones en la estructura cristalina, que obstaculizan el movimiento de las dislocaciones, con lo que aumenta la resistencia y la dureza y disminuye la ductilidad y conductividad eléctrica y térmica.

La razón de que las distintas materias disueltas (solute) varíen en su efectividad como endurecedores se debe a su tamaño atómico relativo al del solvente, y del porcentaje agregado.

Si el átomo de soluto es más grande que el del solvente, se inducen campos de deformación a compresión, mientras que si es más pequeño, son de tensión. La presencia de cualquiera de los dos impide el movimiento de las dislocaciones. Si es grande la diferencia en tamaños, el fortalecimiento es más marcado que cuando los átomos del soluto y del solvente son de tamaños semejantes.

Las soluciones sólidas no siempre son aleatorias, de tal forma que puede ocurrir que los átomos de soluto prefieran a los átomos solventes para que sean sus vecinos, lo que produce un arreglo ordenado de átomos.

Cuando una dislocación unitaria se mueve por un material ordenado, destruye la distribución especial de los átomos disueltos, lo que requiere trabajo adicional, y por lo tanto un esfuerzo extra, de manera que el material se endurece más que si fuera una solución sólida al azar. Si los vecinos más próximos son -

los átomos iguales, puede ocurrir un acumulamiento de los átomos disueltos. Estos pequeños cúmulos deben ser cortados por las dislocaciones, con lo que producen todavía mayor endurecimiento.

Se ha mencionado que la homogeneidad es una característica de las soluciones que requiere una distribución al azar de los átomos; aunque, cabe también mencionar que existen límites de solubilidad para la mayoría de las soluciones de un metal puro en otro, en estado sólido, siendo excepciones importantes a esta regla las soluciones sólidas de cobre y níquel y las de plata y oro. El cobre disuelve cualquier cantidad de níquel que se le añada, y viceversa, lo mismo sucede con las soluciones sólidas de plata y oro.

3.5. ENDURECIMIENTO POR DISPERSION.

Una de las técnicas más modernas para el endurecimiento de los metales se conoce como endurecimiento por dispersión.

La presencia de una dispersión de pequeñas partículas aumentan la resistencia del material en una cantidad que depende del de la fracción de volumen y tamaño de las partículas, y por lo tanto del espaciado entre las partículas.

El endurecimiento por dispersión se realiza mediante la mezcla de polvos metálicos finos, con partículas muy finas de una substancia cristalina inerte o utilizando partículas metálicas recubiertas por una capa de óxido. Entre las substancias inertes que pueden utilizarse con buenos resultados en este procedimiento, podemos mencionar óxidos metálicos, nitruros, carburos y boruros. Después de la mezcla del polvo metálico con las partículas inertes, se comprime y sinteriza el producto, y puede remoldearse por medio del trabajo adicional en caliente. Las partículas extrañas que se encuentran presentes bloquean los movimientos de dislocación a través de una masa del material en cuestión.

Un ejemplo es la dispersión de sílice en el cobre como resultado de la oxidación interna. Se forma una solución sólida de Cu-Si y luego se difunde oxígeno en el material, dejando que reaccione con el silicio para formar sílice.

Para obtener una resistencia máxima, es conveniente disponer de partículas de tamaño muy fino; existe un tamaño mínimo para las partículas de cada uno de los materiales extraños que se emplean. El aumento de porcentaje de volumen de las partículas extrañas reduce la distancia media entre ellas; pero si se utiliza una concentración demasiado grande de partículas extrañas, éstas pueden congregarse para formar una red o un plano casi continuo de partículas. Las redes o los planos de este tipo tienen un efecto debilitante, debido a la falta de fuerza de

unión entre el metal básico y las partículas dispersas.

Aleación por dispersión. Las aleaciones endurecidas por dispersión obtienen dureza y resistencia por medio de mecanismos similares a los que resultan del tratamiento térmico y el endurecimiento por envejecimiento. Además, puesto que las partículas son inertes e insolubles, las aleaciones permanecen estables a lo largo de una gama mucho más amplia de temperaturas que las tratadas térmicamente. Se han desarrollado aleaciones de dispersión de base de aluminio, cobre y níquel para prestar servicio en condiciones mucho más rigurosas, que las que pueden resistir las aleaciones ordinarias de esos mismos metales.

3.6. ENDURECIMIENTO POR TEXTURA.

Al aplicar un esfuerzo cortante, en un plano cristalino, se produce un desplazamiento atómico con respecto a la posiciones originales. Si dos planos atómicos completos y perfectos se deslizan uno sobre el otro, el esfuerzo cortante deberá sobrepasar la fuerza de atracción entre cada átomo en un plano y su vecino inmediato en el plano adyacente. Este valor de esfuerzo ha sido calculado y es del orden de 1×10^6 lb/pulg² a 2×10^6 lb/pulg².

Los cálculos de la resistencia teórica de los metales son complicados; sin embargo, sirven para ilustrar la gran diferencia entre la resistencia observada de trozos ordinarios de metal y la resistencia teórica.

Aunque no se ha llegado aún en los laboratorios a la resistencia teórica de los metales, se han alcanzado resistencias mucho mayores que los valores obtenidos en los metales convencionales. Esto se ha realizado mediante el uso de monocristales de diámetro muy pequeño, llamados "barbas" (whiskers). Los diámetros de estos últimos son variables; pero se encuentran en la gama de 0.0001 a 0.0010 pulg. Se cree que los cristales diminutos (barbas) más fuertes, están libres (o casi) de dislocaciones. Por lo común, las resistencias mayores se observan en las barbas de menor tamaño; aunque el tamaño pequeño no indica por sí solo una resistencia elevada. Se cree que las dislocaciones se encuentran distribuidas al azar en las barbas y, por ello, es más probable que las de menor tamaño tengan menos dislocaciones. Solo entre pocos cristales de diámetros más pequeños se han medido las resistencias máximas.

La resistencia de las barbas metálicas, que son cristales casi perfectos, ha logrado aproximarse a la resistencia teórica y apoya la teoría de las dislocaciones.

En un material con dislocación, los átomos no están sostenidos muy firmemente y

la dislocación se desplaza fácilmente. En otras palabras, obtenemos una menor resistencia a la fluencia. La gran resistencia de las barbas se debe a la ausencia de dislocaciones en la dirección en la cual fueron probadas.

En barbas de cobre se han medido resistencias de 400 000 lbs/pulg²; y se han alcanzado resistencias de 1 900 000 lbs/pulg² en barbas de hierro; por lo tanto, el comportamiento de las barbas parece respaldar firmemente la teoría de las dislocaciones. (11)

4. INFLUENCIA DE LOS MECANISMOS DE ENDURECIMIENTO
EN SUS PROPIEDADES MECANICAS.

4.1. CAMBIOS EN LAS PROPIEDADES DEBIDO AL
ENDURECIMIENTO POR TRABAJO EN FRIO.

4.2. CAMBIOS EN LAS PROPIEDADES DEBIDO AL
ENDURECIMIENTO POR PRECIPITACION.

4.3. CAMBIOS EN LAS PROPIEDADES DEBIDO AL
ENDURECIMIENTO POR ALEACION.

4.4. CAMBIOS EN LAS PROPIEDADES DEBIDO AL
ENDURECIMIENTO POR DISPERSION.

4.5. CAMBIOS EN LAS PROPIEDADES DEBIDO AL
ENDURECIMIENTO POR TEXTURA.

para definir el comportamiento mecánico de los sólidos, es innegable que la estructura es un factor primordial para hacerlo; este parámetro depende en primer lugar de la composición química, además de procesos mecánicos y térmicos posteriores; estos últimos incluyen la fundición, sinterizado, trabajo en caliente y tratamientos térmicos. Estas etapas de la producción afectan las propiedades mecánicas debido a su efecto en el tamaño de grano, gradientes de concentración, inclusiones, huecos, fases metaestables, fases dispersas y otros tipos de imperfecciones cristalinas.

Las estructuras metálicas de mayor resistencia, dureza y resistencia al desgaste están compuestas de dos o más fases en una dispersión bien controlada. Generalmente no encontramos esta microestructura en la pieza fundida o lingote original, sino que ésta se forma a través de un cuidadoso proceso controlado que involucra trabajo en caliente y tratamiento térmico. Por ejemplo, las propiedades de una aleación común de aluminio 2014 utilizada para fabricar partes estructurales en aviones son:

	Límite de fluencia (convencional del 0.2%) *	Resistencia a la tensión lb/pulg ² x 10 ³ *	Alargamiento porcentual
Aleación 2014, * recocida	14	27	18
Aleación fortalecida por medio del trata- miento térmico	60	70	13

* Para obtener MN/m², multiplique por 6.9×10^{-3}

* Aleación 2014: 4% Cu, 0.8% Si, 0.8% Mn, 0.6% Mg.

Por lo tanto, si un ingeniero tiene que diseñar un avión basándose en el límite de fluencia del material recocido, aquel tendría que ser cuatro veces más pesado y quizás nunca podría despegar.

Es importante hacer una observación de tipo general que nos ayude a comprender las relaciones que hay entre la estructura y las propiedades, no solo en los metales sino en todos los materiales. Las propiedades de un material dependen de la naturaleza, cantidad, tamaño, forma, distribución y orientación de las fases.

a) Naturaleza de las fases. En la aleación de aluminio 2014, de dos fases, están involucradas una solución sólida de cobre en aluminio y un compuesto intermetálico CuAl_2 .

b) Cantidad de las fases. Las cantidades de las dos fases en la aleación son significativas.

- c) Tamaño de las fases. Si todas las partículas de una fase se concentraran en unas pocas áreas, la estructura no sería tan resistente como lo es cuando se utiliza la misma cantidad en forma dispersa. Se prefiere una dispersión fina de CuAl_2 .
- d) Forma de las fases. En el caso de un precipitado en la microestructura, se obtienen diferentes propiedades según tenga forma, esferoidal o de plaquetas.
- e) Distribución de las fases. En una microestructura habrá diferencia en las propiedades si una fase de precipitado se localiza en la frontera de los granos en lugar de distribuirse uniformemente.
- f) Orientación de las fases. Para obtener propiedades magnéticas óptimas, es muy importante obtener cierta orientación de las partículas o precipitados en una cinta magnética.

También los límites de grano ejercen ciertas influencias sobre el comportamiento de los metales. Entre las consideraciones primarias se encuentra su efecto sobre el movimiento de los átomos, que puede clasificarse como ordenado o fortuito; por ejemplo, el deslizamiento es una forma de movimiento atómico ordenado, mientras que la difusión es un movimiento fortuito. Los límites granulares obstaculizan el movimiento atómico ordenado y favorecen el fortuito; por lo tanto, los metales de grano fino son más firmes que los de grano grueso, a la temperatura ambiente, y la difusión se produce con mayor facilidad en los primeros que en los últimos. A temperaturas muy elevadas y con velocidades bajas de deformación, las dislocaciones abandonan a los granos y se acumulan en los límites para producir huecos internos, fragilización y fracturas probables.

Los límites de grano son muy importantes en los procesos de tratamiento térmico, por ejemplo, durante el recocido de metales trabajados en frío, se formarán nuevos granos a partir de átomos de alta energía, que se encuentren en posiciones de desequilibrio. Esos átomos requieren una energía adicional mínima, en este caso térmica, para que se desplacen a posiciones de equilibrio en una estructura nueva y relativamente libre de deformaciones. Así pues, la recristalización se produce en gran parte en los límites de grano, que es donde se forma la mayor parte de los granos nuevos, durante el recocido, en los metales trabajados en frío.

Otro aspecto que afecta a las propiedades mecánicas, es la elevación de la temperatura, que perjudica a la mayoría de ellas, entre las que se encuentran el esfuerzo de cedencia, la resistencia a la tensión, la resistencia a la ruptura, los módulos de elasticidad y corte, y la dureza. Por lo común, la ductilidad -

tiene tendencia a aumentar; aunque, finalmente, resulta también perjudicada; además, es probable que haya gamas de temperatura intermedias, en las que disminuye de la ductilidad. La tenacidad puede aumentar o disminuir, dependiendo del comportamiento de las propiedades de ductilidad y resistencia a la deformación, como se explicará posteriormente.

Entre las propiedades mecánicas más comunmente utilizadas para especificar un material se encuentran: la resistencia a la tensión, el límite de fluencia, el alargamiento porcentual, el módulo de elasticidad y la dureza. Otras propiedades para conocer el comportamiento del material son la ductilidad y la tenacidad.

Resistencia a la tracción o a la tensión. Se calcula dividiendo la carga máxima soportada por la probeta en una prueba de tensión, entre el área original de sección transversal de la misma. Se conoce también como resistencia máxima o final.

El límite de fluencia, conocido también como esfuerzo de cedencia es el valor más importante en el diseño e implica una deformación específica de 0.2%; este concepto se refiere a lo siguiente: cuando se somete a carga la probeta de tensión se presentan dos tipos de deformación: elástica y plástica. La deformación elástica desaparece cuando se retira la carga; mientras que permanece la deformación plástica causada por la deformación permanente debida al deslizamiento. Se sabe que la deformación plástica comienza con esfuerzos muy bajos; pero, una deformación plástica del 0.2% puede tolerarse en la mayoría de los usos en ingeniería. El esfuerzo de cedencia se ve afectado considerablemente por la cantidad de trabajo en frío y el tratamiento térmico a que se sometió el material.

El alargamiento es una referencia en porcentaje de la deformación que sufrió la probeta en la prueba de tensión, y es un parámetro de la ductilidad.

Módulo de elasticidad. A los esfuerzos inferiores al límite proporcional, el esfuerzo y la deformación son directamente proporcionales entre sí. La constante de proporcionalidad que relaciona el esfuerzo con la deformación, se conoce como módulo de elasticidad, y se utiliza para calcular la deflexión bajo carga de una pieza determinada.

La dureza de los materiales metálicos se mide, por lo común, determinando su resistencia a la penetración de una bola metálica dura o un penetrador de diamante de forma especial. Los valores de dureza no se relacionan muy bien con las resistencias a la tensión, ya que el esfuerzo de cedencia, que determina en gran parte la dureza, es más sensible a los procesos sufridos por el material -

que la resistencia a la tensión.

La ductilidad es la capacidad que tienen los metales para deformarse permanentemente, antes de la ruptura y se indica por medio de mediciones de la elongación o alargamiento y la reducción de área. Las indicaciones sobre la ductilidad tienen una gran importancia en la ingeniería, puesto que muestran hasta que punto puede deformarse el material sin fracturar. La ductilidad es esencial en las operaciones de moldeado para materiales metálicos, puesto que es conveniente producir en una sola operación tanta deformación como sea posible, sin causar una ruptura. La ductilidad es también esencial para evitar la iniciación de un resquebrajamiento en un punto en el que los esfuerzos locales son elevados, como resultado del diseño o las técnicas de fabricación. Además, la ductilidad es un factor que influye en el valor de la tenacidad.

La tenacidad es la capacidad de absorber energía hasta el punto de la fractura. El área situada bajo la curva de esfuerzo y deformación de tensión, puede utilizarse como aproximación de la capacidad de un material metálico para absorber energía, hasta el punto de la ruptura. El área bajo la curva representa la energía absorbida por volumen del material, hasta el punto de ruptura. El consumo de energía Pd , es el resultado de la fuerza F , aplicada durante la prueba, que se desplaza a lo largo de una distancia d , igual a la deformación del espécimen. Para que un material sea tenaz, no solo debe poseer resistencia, sino también ductilidad, como se indica en la fig 4.1.

4.1. CAMBIOS EN LAS PROPIEDADES DEBIDO AL ENDURECIMIENTO POR TRABAJO EN FRIO.

Después que el metal fundido se ha colado para formar lingotes, se somete casi siempre a trabajos mecánicos que implican la deformación permanente de los metales sujetándolos a esfuerzos que van más allá de su esfuerzo de cedencia. Los cambios de forma van acompañados de variaciones de sus propiedades. La naturaleza de estas variaciones dependen del tipo y la intensidad de la deformación, la temperatura a que se produce y el metal o la aleación de que se trate. Las propiedades se alteran a veces todavía más después del trabajo mecánico, por medio del tratamiento térmico. Hay dos tipos principales de trabajo mecánico: en caliente y en frío. El que un trabajo dado se lleve a cabo en frío ó en caliente, depende en parte, del esfuerzo de cedencia y la ductilidad con que se trata, la intensidad de la deformación requerida y el efecto sobre las propiedades que se desee obtener.

Las propiedades mecánicas de los metales trabajados en caliente son superiores a las de las piezas de fundición, lo cual se debe a la mayor homogeneidad y -

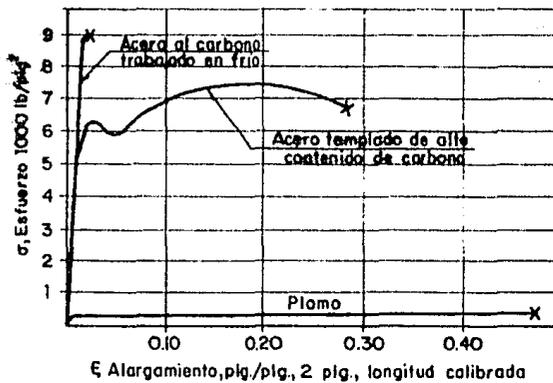


Figura 4.) La tenacidad según la curva de esfuerzo y deformación. La tenacidad es una propiedad de los metales que indica la capacidad para absorber cantidades relativamente grandes de energía, hasta el punto de ruptura. Lo poseen los metales que muestran un límite elástico elevado y buena ductilidad, lo cual produce una gran superficie bajo la curva de esfuerzo y deformación. Las unidades del área situada bajo la curva son libras-pulgada por pulgada cúbica; o sea, la energía que puede absorber un volumen dado de metal. Las X en la gráfica, indican los puntos de ruptura. El plomo, que tiene buena ductilidad, pero baja resistencia a la deformación, no es tenaz, como tampoco lo es el acero trabajado en frío. Este tiene una elevada resistencia a la deformación, pero casi no tiene ductilidad. El acero templado, de alto contenido de carbono es tenaz, puesto que posee buena ductilidad y un punto de cedencia elevado.

firmeza.

El trabajo en frío consiste en una deformación permanente a una temperatura y un índice de deformación que hacen que aumente la dureza del metal y disminuya su ductilidad. Durante el trabajo en frío, los granos se distorsionan y no se someten a la recristalización.

Las propiedades mecánicas de los metales se ven afectadas todavía más por el trabajo en frío que por el caliente; aunque no siempre se desea máxima dureza y resistencia en una pieza ya que, a medida que la dureza aumenta, la ductilidad disminuye.

Todas las propiedades de un metal que dependan de la estructura se ven afectadas por la deformación plástica o trabajo en frío. La resistencia a la tensión, la resistencia a la cedencia o fluencia y la dureza aumentan, mientras que la ductilidad, representada por el porcentaje de alargamiento, disminuye (tabla 4.1 y fig 4.2). Aunque la resistencia y la dureza aumentan, la rapidez de cambio para cada una no es la misma.

La resistencia a la cedencia aumenta más rápidamente que la resistencia a la tensión, así que a mayor intensidad de deformación plástica, el intervalo entre las resistencias de cedencia y de tensión es menor (fig 4.3). Esto es importante en ciertas operaciones de formado en que se necesita una deformación apreciable; por ejemplo, en el estirado la carga debe tener un valor superior al punto de cedencia para lograr una deformación apreciable, pero debe ser menor a la resistencia a la tensión para evitar fallas. Si el intervalo es reducido, se necesita un control muy preciso de la carga aplicada.

Los efectos nocivos de la deformación en frío pueden eliminarse por medio de un tratamiento térmico llamado "recocido", en el cual el metal se ablanda en función de la temperatura de calentamiento (fig 4.4) y el tiempo transcurrido a esta temperatura. En este tratamiento es costumbre distinguir tres regiones de temperatura: recuperación, recristalización y crecimiento de grano.

Recuperación. Durante la recuperación no se observan cambios en la estructura de los granos. La conductividad eléctrica se aproxima a la del metal recocido y los rayos X indican la disminución de esfuerzos internos en la red cristalina; la dureza y la resistencia no cambian radicalmente durante este período, pero la resistencia a la corrosión mejora. A medida que la temperatura del tratamiento térmico se eleva a un nivel superior al del intervalo de recuperación, se liberan los esfuerzos internos.

REDUCCION POR LAMINADO EN FRIO Porcentaje	RESISTENCIA TENSIL Lb/pulg. ²	ELONGACION Porcentaje en 2 pulg.	DUREZA ROCKWELL X ^a
0	43 000	70	12
10	48 000	52	62
20	53 000	35	83
30	60 000	20	89
40	70 900	12	94
50	80 000	8	97
60	90 000	6	100

* ROCKWELL X= 1/16 pulg. del indentador de bola, 75 Kg. de carga.

Tabla 4.1 Efecto de la deformación plástica sobre las propiedades de un latón 70-30

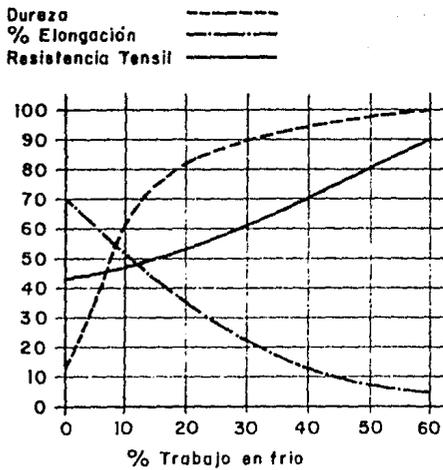


Figura 4.2 Gráfica del efecto de la deformación plástica sobre las propiedades de un latón 70-30

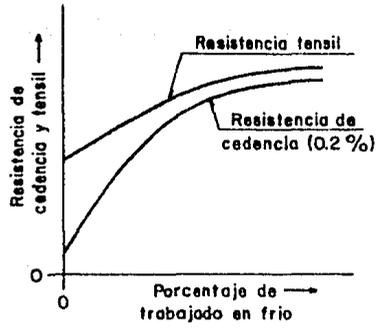


Figura 4.3 Efecto del trabajo en frío sobre resistencia tensil y de cedencia del cobre.

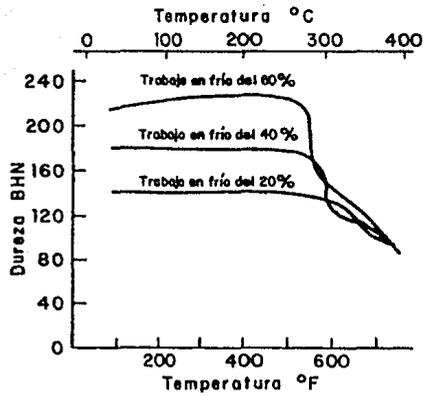


Figura 4.4 Efectos del calentamiento en la dureza del latón trabajado en frío con 65 % Cu, 35 % Zn.

Recristalización. En esta gama de temperatura, se inicia un proceso de substitución de la estructura deformada mediante la formación de nuevos cristales libres de esfuerzos y equiaxiales, lo que conduce a una dureza y resistencia menores y una mayor ductilidad. La densidad de dislocaciones disminuye también en forma apreciable.

Crecimiento de granos. A medida que la temperatura se eleva aún más, los granos continúan su crecimiento; el tamaño de los granos es mayor a temperaturas más elevadas. La dureza y la resistencia disminuyen con el tamaño de grano, pero la elongación aumenta. Esto puede explicarse desde un punto de vista microscópico. El deslizamiento en un plano determinado cesa cuando se alcanza al límite de un grano, en donde el límite del grano es un área de gran densidad de dislocación y nudos. Por lo tanto, cuantas más fronteras de grano haya, mayor será la limitación del deslizamiento y mayor la resistencia, es por esto que los materiales de grano fino presentan una resistencia mayor. La ductilidad (elongación) es menor debido a que el deslizamiento está limitado por la mayor área de fronteras de grano.

Estos tres efectos también dependen del tiempo. Un resumen de estos efectos se presenta en forma esquemática en la fig 4.5.

La temperatura requerida para la recristalización varía según el metal y es aproximadamente de un tercio a un medio de la temperatura de fusión de un metal puro, expresada en una escala absoluta. Desde un punto de vista práctico, la temperatura de recristalización se define como aquella a la cual se obtendrá una estructura de granos totalmente nueva en un período de una hora; una definición más estricta muestra, no una temperatura definida, sino un intervalo de temperaturas, cuyo nivel inferior depende en el tamaño inicial de grano, la composición, la cantidad de deformación previa, el ciclo de temperatura y el tiempo. Entre mayor sea la cantidad de trabajo en frío, menor será la temperatura de recristalización, debido a la energía acumulada, como lo muestra la reducción súbita de dureza para el latón con 65% de cobre y 35% de zinc en la fig 4.4.

En la manufactura de prácticamente todas las piezas estampadas y formadas en frío, es necesario hacer un balance entre las propiedades deseadas en la pieza final y los problemas económicos y de ingeniería que se presentan al formar la pieza. El trabajo en frío, cuando se utiliza hábilmente, junto con el recocido, rinde productos cuyas propiedades pueden controlarse estrechamente. Si se desean una dureza y una resistencia particulares en una pieza, es posible lograr ese resultado por medio de varios ciclos diferentes de trabajo en frío y recocido.

Recordemos los siguientes aspectos.

Efecto de:	Resistencia	Dureza	Elongación porcentual	Reducción porcentual del área
Aumento de trabajo antes del ensayo	Aumenta	Aumenta	Disminuye	Disminuye
Aumento de la temperatura de recocido	Disminuye	Disminuye	Aumenta	Aumenta

Por lo tanto, para obtener una máxima facilidad de trabajo, se necesita una pieza bien recocida; pero para obtener la mayor resistencia y dureza, se necesita un máximo de trabajo de frío.

Analicemos el siguiente problema. Se tiene una materia prima en barra (varilla cilíndrica) de latón recocido de 70% de Cu y 30% de Zn, y de 0.35 pulg (0.889 cm) de diámetro. Se requiere producir una barra de 0.21 pulg (0.533 cm) de diámetro con una resistencia a la tensión de más de 60 000 lb/pulg² (414 MN/m²) y una elongación de más de 20 por ciento.

Una forma de resolver el problema es determinar primero cuál debe ser la etapa final en el trabajo en frío. Se puede leer en la fig 4.6 que para obtener una resistencia a la tensión de 60 000 lb/pulg² (414 MN/m²), se necesita más de un 15% de trabajo en frío. Para obtener la elongación requerida se debe trabajar en frío menos del 23%. Se puede decidir por un trabajo en frío del 20% como etapa final de trabajo, ya que ésta cumple con la resistencia a la tensión y las especificaciones de elongación. Luego,

$$\text{Porcentaje de trabajo en frío} = \frac{\Delta A}{A} = \frac{\frac{1}{4} \pi d^2 - \frac{1}{4} \pi (0.21)^2}{\frac{1}{4} \pi d^2} \times 100 = 20$$

en donde d es el diámetro en el cual deseamos comenzar la deformación final (comenzando con una estructura recocida). Resolviendo tenemos $d=0.235$ pulg (0.596 cm). Por lo tanto, se obtendrá un 20% de trabajo en frío, que va de un diámetro de 0.235 pulg a 0.21 pulg (0.596 a 0.533 cm).

El siguiente problema es como reducir el diámetro de 0.35 pulg a 0.235 pulg (0.889 a 0.596 cm), con un material dúctil esto se puede hacer en frío en varias etapas. En este caso sería necesario recocer antes de la etapa final; de otra manera, la elongación sería muy baja (el efecto de trabajo en frío es acumulativo). Una alternativa sería trabajar en caliente (a la temperatura de recristalización o una mayor) hasta un diámetro de 0.235 pulg (0.596 cm). Después de trabajarlo en caliente puede presentarse una estructura recristalizada que podría

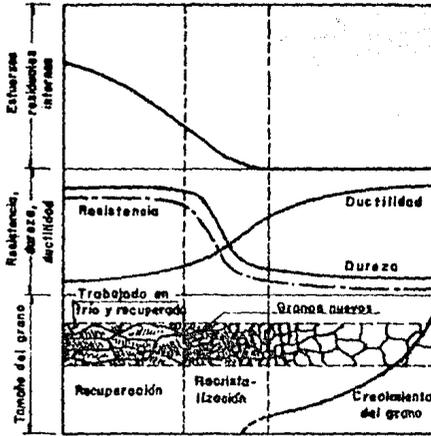


Figura 4.5 Resumen de los efectos del recocido (representación esquemática)

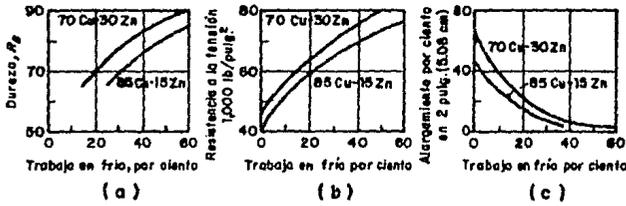


Figura 4.6 Efecto de la cantidad de trabajo en frío en las propiedades mecánicas. (Para obtener la resistencia a la tensión multiplique los lb/pulg² por 6.9×10^{-3} para obtener MN/m².)

ser luego trabajada en frío. La solución más económica dependería de la calidad de la superficie deseada y del equipo disponible.

4.2. CAMBIOS EN LAS PROPIEDADES DEBIDO AL ENDURECIMIENTO POR PRECIPITACION.

Generalmente, los efectos de la precipitación sobre las propiedades mecánicas, son grandemente acelerados y acentuados, por recalentamiento del material templado. Los efectos no son completamente atribuibles a un cambio en la velocidad de reacción, debido a que los cambios estructurales que ocurren a elevadas temperaturas difieren en forma fundamental de aquellas que ocurren a temperatura ambiente, estas diferencias son reflejadas en las características o propiedades mecánicas y físicas de los materiales.

Un aspecto característico de los efectos del envejecimiento a elevada temperatura sobre las propiedades de tensión, consiste en incrementar el límite de fluencia, siendo más pronunciado que el incremento en la resistencia a la tensión, - también la ductilidad disminuye como medida del porciento de alargamiento.

La conductividad eléctrica disminuye durante el proceso de envejecido, debido a la distorsión reticular, y luego aumenta cuando tiene lugar la precipitación. La fig. 4.7 muestra el efecto del tiempo de envejecido sobre algunas propiedades.

Las propiedades físicas y mecánicas dependen no solamente de que el soluto sea o no puesto en solución, sino también, de la distribución atómica específica ; así como también del tamaño y dispersión de cualquier fase precipitada.

Cuando un material ha sido sobre-envejecido la resistencia a la tensión y el límite de fluencia disminuyen, pero la ductilidad generalmente no es recuperada en proporción a la reducción de la resistencia, de manera que las combinaciones de estas propiedades desarrolladas por sobre-envejecimiento son consideradas inferiores a aquellas que prevalecen en condiciones sub-envejecidas.

El proceso de envejecido no tiene el mismo efecto sobre las propiedades de todas las aleaciones. En algunas aleaciones, el cambio en dureza y resistencia puede ser pequeño; en otras, los cambios pueden ser grandes. Esto se debe no a la cantidad disuelta en exceso del límite de saturación, sino al efecto del precipitado en la distorsión reticular; por ejemplo, el magnesio puede disolver 46% de plomo a la temperatura eutéctica, pero solo 2% de plomo a la temperatura ambiente. Mediante el tratamiento térmico adecuado tiene lugar la precipitación, pero no se presenta ningún endurecimiento por envejecido. Esto se debe a la ausencia de una red de transición y a muy poca distorsión localizada durante la precipitación. Por otra parte, si la precipitación implica extensos cambios en la red, se

presenta una gran cantidad de distorsión con amplios cambios en las propiedades. En este caso, cuanto mayor sea la cantidad de metal disuelto en exceso del límite de saturación, mayor serán tanto la distorsión producida como el efecto en la dureza y en la resistencia.

Un ejemplo se ilustra en la tabla 4.2 para algunas aleaciones de cobre-berilio. El cobre disuelve hasta un máximo de 2.2% de berilio a 1600 °F (871°C). A temperatura ambiente, la solubilidad del berilio en cobre es de aproximadamente 0.2%. Si se consulta la tabla 4.2, se podrá notar que mientras no hay diferencia en la resistencia y dureza de ambas aleaciones después del recocido de solución (tratamiento de solución), hay una diferencia después del envejecido. La aleación que contiene 1.90 - 2.15% de berilio está más próxima a la solubilidad máxima de berilio en cobre, y del tratamiento de envejecido se precipitará más de la fase δ (gamma), dando como resultado mayor dureza y resistencia, según se muestra.

Otro ejemplo de endurecimiento por envejecimiento se considera en las aleaciones de aluminio-cobre (fig 3.5) por el mencionado proceso de tres pasos que incluye un tratamiento de solución alrededor de 950°F (510°C) en el cual, (1) la fase CuAl_2 se disuelve en la matriz, (2) la aleación se temple a la temperatura ambiente, manteniendo aún la solución sólida que se formó a alta temperatura, y (3) una vez templada, la aleación se envejece naturalmente, o sea, se mantiene a la temperatura ambiente o se envejece artificialmente, calentándola a temperaturas relativamente bajas (200 a 400°F, 95 a 205°C).

Durante el proceso de envejecimiento se precipita el CuAl_2 y endurece la aleación. La dispersión final del precipitado es bastante más fina que la dispersión en el lingote original.

Dado que la difusión es menor a temperatura ambiente, la cantidad de equilibrio de Θ se precipita lentamente y la tasa de endurecimiento es baja. A una temperatura intermedia se obtiene un endurecimiento más rápido. Sin embargo, si la aleación es calentada por períodos largos o a una temperatura demasiado alta, el precipitado se vuelve basto y se reduce la dureza; este es el llamado "sobreenvejecimiento" (fig 4.8). No todos los precipitados producen este grado de endurecimiento al envejecer la pieza; solamente en aquellos casos en los cuales el espaciamiento entre los átomos en el precipitado es cercano al espaciamiento en la matriz, en los cuales se obtiene lo que se denomina un precipitado "coherente". En este caso una región de material deformado rodea la partícula precipitada haciendo más difícil que ocurra el deslizamiento en esta región y, por lo -

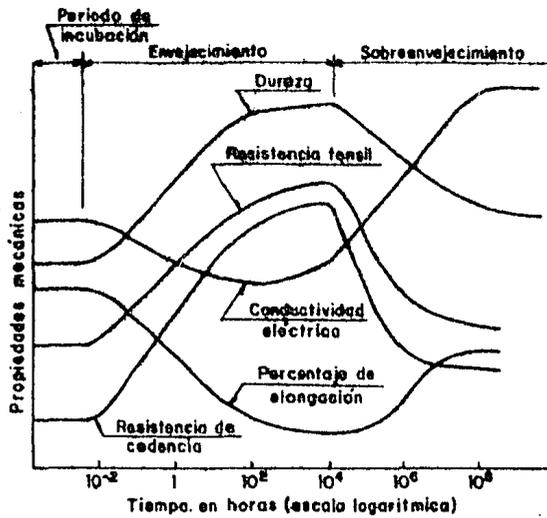


Figura 4.7 Efecto del tiempo de envejecimiento sobre las propiedades mecánicas

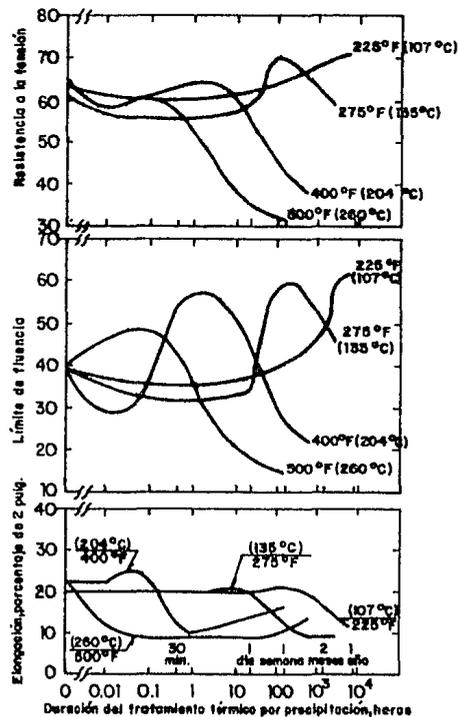


Figura 4.8 Efecto del endurecimiento por envejecimiento en las propiedades mecánicas de una aleación de 4.5 de cobre-aluminio (2014).

TABLA 4.2 Efecto del envejecido y la composición en las propiedades mecánicas de algunas aleaciones cobre-berilio.

ALEACION Y CONDICION	RESISTENCIA TENSIL, LB/PULG ²	ELONGACION, PORCENTAJE EN 2 PULG	DUREZA ROCKWELL
1.90-2.15% Be:			
Recocido de solución	60 000-80 000	35-50	B 45-65
Después del envejecido	165 000-180 000	5-8	C 36-40
1.60-1.80% Be:			
Recocido de solución	60 000-80 000	35-50	B 45-65
Después del envejecido	150 000-165 000	5-8	C 33-37

TABLA 4.3 Efecto del envejecimiento sobre las propiedades de una aleación al aluminio 2014 (de 3.5 a 4.5 porcentaje de cobre)

ALEACION Y CONDICION	RESISTENCIA ULTIMA, LB/PULG ²	ELON-GACION, % EN 2 PULG	RESISTENCIA A LA CEDEN-CIA, LB/PULG ²	BHN, 500KG, 10 MM	RESISTENCIA AL CORTE, LB/PULG ²
Recocida	27 000	18	14 000	45	18 000
Solución tratada, envejecida naturalmente	62 000	20	42 000	105	38 000
Solución tratada, envejecida artificialmente	70 000	13	60 000	135	42 000

TABLA 4.4 Propiedades de aleaciones recocidas para el sistema cobre - níquel

COMPOSICION EN PORCEN-TAJE DE NIQUEL	RESISTENCIA TENSIL, LB/PULG ²	ELONGACION, PORCENTAJE EN 2 PULG	BHN, 10 MM, 500 KG	RESISTIVIDAD ELECTRICA, MICROHMS POR CM ³
0	30 000	53	36	1.7
10	35 000	47	51	14
20	39 000	43	58	27
30	44 000	40	67	38
40	48 000	39	70	46
50	50 000	41	73	51
60	53 000	41	74	50
70	53 000	42	73	40
80	50 000	43	68	30
90	48 000	45	61	19
100	43 000	48	54	6.8

tanto, resulta una dureza más alta.

En la tabla 4.3 se muestra el efecto del envejecimiento sobre las propiedades de una aleación de aluminio 2014.

4.3. CAMBIOS EN LAS PROPIEDADES DEBIDO AL ENDURECIMIENTO POR ALEACION.

Una forma común de aumentar la dureza y el esfuerzo de cedencia de un material es introducir átomos de materia disuelta a la red solvente, formando de esa manera una solución sólida o aleación. Los átomos de solución, sean de sustitución o intersticiales, inducen deformaciones elásticas locales en el material, que - obstaculizan el movimiento de las dislocaciones, con lo que aumenta la resistencia del material.

En general, en un sistema de aleación que da lugar a una serie continua de soluciones sólidas, la mayoría de los cambios de propiedades son causados por distorsión de la red cristalina del metal solvente por adiciones del metal soluble.

Las propiedades de cualquier aleación multifásica dependen de las características individuales de las fases y la forma en que estas últimas se hallan distribuidas en la microestructura. La resistencia, dureza y ductilidad se relacionan con el tamaño, número, distribución y propiedades de los cristales de ambas fases.

Otro punto importante es que la mayoría de las propiedades resultantes de una mezcla se parecen principalmente a las de la fase continua, o sea, la fase que forma la base o matriz en la que las partículas de la otra fase están incrustadas. Si esta fase es plástica, la serie completa de aleaciones mostrará alguna plasticidad; si es frágil, la serie entera de aleaciones será relativamente frágil.

Las materias disueltas varían en su efectividad como endurecedores debido a su tamaño atómico relativo al del solvente. En la fig 4.9 se observa que si es grande la diferencia en tamaños, como para el Sn en el Cu, el fortalecimiento es más marcado que cuando los átomos de la materia disuelta y del solvente son de tamaños semejantes, por ejemplo el Si en el Cu.

La tabla 4.4 muestra el efecto de la composición sobre algunas propiedades físicas y mecánicas de aleaciones recocidas para el sistema cobre - níquel. La resistividad eléctrica depende de la distorsión de la estructura reticular; como la distorsión aumenta con la cantidad de metal soluble añadido, y dado que cualquiera de los dos metales puede considerarse como el solvente, la máxima resis-

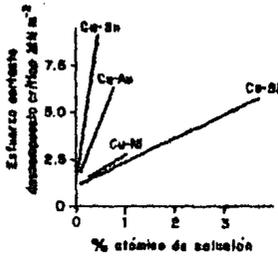


Figura 4.9 Efecto de las adiciones de aleaciones por sustitución en el esfuerzo cortante crítico de monocristales de Cu.

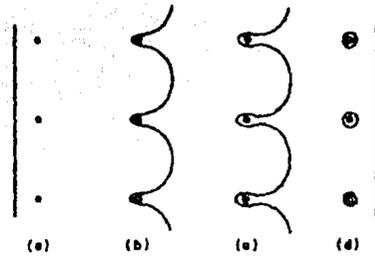


Figura 4.10 Secuencia de eventos cuando una dislocación se arquea para pasar partículas por el mecanismo de Orowan.

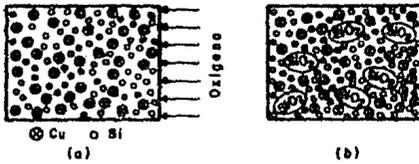


Figura 4.11 Difusión de O_2 en un compuesto Cu-Si

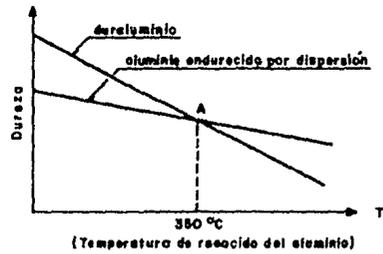


Figura 4.12 Comparación del duraluminio con aluminio endurecido por dispersión

tividad eléctrica debe ocurrir en el centro del intervalo de composición, esto - lo verifican los valores que se dan en la tabla. A medida que se agrega cobre - al níquel, la resistencia física de la aleación aumenta; y a medida que se agre - ga níquel al cobre, la resistencia de esa aleación también aumenta. Por tanto , entre cobre puro y níquel puro debe existir una aleación que muestre la máxima resistencia. Esta llega a ser aproximadamente dos tercios de níquel y un tercio de cobre, aleación comercial muy útil, conocida como Monel; la cual muestra bue - na resistencia y buena ductilidad, además de alta resistencia a la corrosión. El mismo comportamiento es similar en lo que se refiere a la dureza en la que ha - brá una aleación que muestre la máxima dureza, aún cuando la máxima resistencia a la tensión y la dureza no necesariamente obtengan la misma composición.

Veíamos que los metales se utilizan principalmente en la forma de aleaciones, de - bido a que la aleación puede mejorar las propiedades mecánicas y muchas de las físicas. También la resistencia a la corrosión de muchos metales puede mejorarse mediante procedimientos de aleación. En la tabla 4.5 se indican algunos de - los efectos importantes de la aleación.

Pero además de ser superiores, en muchos aspectos, a los metales puros, las - aleaciones pueden mejorarse todavía más por medio del tratamiento térmico y el trabajo en frío.

Las propiedades mecánicas del cobre mejoran por medio de la aleación de solución s - ólida con zinc, estaño, aluminio, silicio o níquel. La resistencia y dureza de esas aleaciones mejoran todavía más, mediante el trabajo mecánico. El endurecimiento por precipitación se usa comúnmente para las aleaciones de berilio y co - bre y para varias otras aleaciones distintas. En general, las propiedades mecá - nicas de las aleaciones con base de cobre son superiores a las del aluminio y - el magnesio; pero inferiores a las aleaciones ferrosas. Las aleaciones de beri - lio y cobre, de muy alta resistencia, se usan como substitutos que no producen chispas de las herramientas de acero, y se usan muchas aleaciones de base de co - bre en los casos en que resulta desventajoso el ferromagnetismo del acero. Aún cuando la ductilidad del cobre es excelente, puede mejorarse por medio de adi - ciones a la aleación inicial de elementos que forman soluciones sólidas.

Se puede aumentar la resistencia y la dureza de una aleación de solución s - ólida como cuproníquel o latón por medio de trabajo en frío, de la misma forma en que se endurecen los metales puros. Por lo tanto, se pueden utilizar a un mismo - tiempo los dos mecanismos de aumentar la resistencia, el endurecimiento por tra - bajo en frío y endurecimiento con soluciones sólidas. Al calentar el material -

TABLA 4.5 Comparación de metales puros con aleaciones.

PROPIEDAD	EFFECTO DE LA ALEACION	EJEMPLOS	IMPORTANCIA ESPECIAL
Temperatura de fusión	La reduce	Fe puro: 2800°F (1540°C). Fe + 3.5% C (hierro colado): 2100-2250°F (1150-1250°C)	Mayor facilidad para fundir y colar metal a temperaturas más bajas. Principio utilizado en el desarrollo de aleaciones coladas y de fusión.
Resistencia eléctrica	La eleva	La presencia de 0.004% de P reduce la conductividad del Cu puro, en un 5% Cu puro: 1.67 microohms por cm. Cu + 30%Zn: 6.2 microohms-cm.	Principio aplicado al desarrollo de elementos de calentadores eléctricos de alta resistencia, y para el mejoramiento de conductores eléctricos.
Conductividad térmica	La reduce	Cu puro: 0.94 cal/cm-°C-seg Cu + 30% Zn (latón de cartucho): 0.29 cal/cm-°C-seg	Principio aplicado al desarrollo de metales para intercambiadores de calor y utensilios de cocina.
Esfuerzo de cedencia	La eleva	Al puro (aleación 1100S-0): 5 000 lb/pulg ² Al + 4.0%Cu, 0.5%Mn, 0.5%Mg (aleación 2017S-0): 10 000 lb/pulg ²	
Resistencia a la tensión	La eleva	Aleación 1100S-0: 13 000 lb/pulg ² Aleación 2017S-0: 26 000 lb/pulg ²	
Resistencia a la fatiga	La eleva	Aleación 1100S-0: 5 000 lb/pulg ² , a 500x10 ⁶ ciclos. Aleación 2017S-0: 13 000 lb/pulg ² , a 500x10 ⁶ ciclos.	
Ductilidad	La reduce *	Aleación 1100S-0: 45% en un espécimen de 2 pulg. Aleación 2017S-0: 22% en un espécimen de 2 pulg.	La ganancia en las propiedades de resistencia compensa con creces la pérdida de ductilidad. Queda una cantidad suficiente de ductilidad para satisfacer los requisitos de servicio.

* Una importante excepción es el mejoramiento inicial de la ductilidad del cobre cuando se alea con zinc, estaño y otros metales similares.

encontramos recuperación, recristalización y crecimiento de granos, igual a como encontramos en los metales puros pero en un intervalo de temperatura algo mayor. Los datos típicos para un latón con 65% Cu y 35% Zn se dan en la fig 4.4 . La tabla 4.6 muestra el efecto de la aleación en las propiedades del cobre puro y de la solución sólida con 30% Ni y 70% Cu en el estado recocido.

4.4. CAMBIOS EN LAS PROPIEDADES DEBIDO AL ENDURECIMIENTO POR DISPERSION.

Muchos materiales están formados por dos o más fases, de las que frecuentemente una se presenta como pequeñas partículas distribuidas por todo el material; como se mencionó anteriormente la presencia de una dispersión de pequeñas partículas aumentan la resistencia del material. La fig 4.10(a) muestra una dislocación - que se aproxima a un arreglo de partículas, si la dislocación no puede cortar - las partículas, se tiene que arquear entre ellas, por lo que la dislocación pasa las partículas dejando lazos o gazas alrededor de ellas, a este proceso se le llama mecanismo de Orowan.

Se puede producir una dispersión mediante diversidad de métodos, uno de los cuales es por medio de oxidación interna, un ejemplo es la solución sólida Cu - Si a la cual se le difunde oxígeno dejando que reaccione con el silicio para formar sílice, el que produce un obstáculo mucho mayor (fig 4.11). El tamaño de la molécula de óxido de silicio varía entre 50 y 200 Å°.

Son fácilmente difundibles en los sólidos el oxígeno (O), nitrógeno (N), hidrógeno (H), carbono (C) por ser átomos muy pequeños. Para endurecer por dispersión se prefiere utilizar compuestos que contengan silicio o aluminio porque son oxidables.

El aluminio al ser soluto en la plata solvente y reaccionar con el oxígeno produce una dispersión de alúmina Al_2O_3 en la plata (tabla 4.7), material que con frecuencia se usa para contactos en equipos eléctricos.

A bajas temperaturas el duraluminio es más duro que el aluminio endurecido por dispersión, pero se cambian los papeles a altas temperaturas (fig 4.12), el aluminio endurecido por dispersión tiene un ablandamiento más prolongado; cuando se necesita utilizar aluminio como material refractario (soportando y conteniendo altas temperaturas) es más conveniente el aluminio endurecido por dispersión.

TABLA 4.6 Comparación de las propiedades mecánicas del cobre recocido, y del cuproníquel con 70% Cu, 30% Ni.

PROPIEDAD	COBRE	CUPRONIQUEL
Resistencia a la tensión, lb/pulg ² x 10 ³	30	55
Límite de fluencia, lb/pulg ² x 10 ³	10	20
Módulo de elasticidad, lb/pulg ² x 10 ³	17	22
Alargamiento porcentual en 2 pulg	50	45
Dureza, Rockwell F	40	84

TABLA 4.7 Comparación de esfuerzo en plata endurecida por dispersión.

Compo sición	Tempera tura	20°C	650°C	850°C
Plata pura		25 000 lb/pulg ²	3 000 psi	1 000 psi
Plata + Al ₂ O ₃ dispersión		71 000 psi	23 000 psi	15 000 psi

TABLA 4.8 Comparación del esfuerzo de la plata con whiskers.

Compo sición	Tempera tura	20°C	650°C	850°C
Plata pura		25 000 lb/pulg ²	3 000 psi	1 000 psi
Plata + whiskers cortos Al ₂ O ₃		60 000 psi	50 000 psi	40 000 psi
Plata + whiskers largos Al ₂ O ₃		76 000 psi	70 000 psi	63 000 psi
100% whiskers		250 000 psi		

Nota: Para convertir lb/pulg² a MN/m² multiplíquese por 6.9 x 10⁻³.

4.5 CAMBIOS EN LAS PROPIEDADES DEBIDO AL ENDURECIMIENTO POR TEXTURA.

El fundamento de un nuevo desarrollo denominado "endurecimiento por textura" es la orientación preferente del material; con esto se logra orientar las celdas unitarias de acuerdo a sistemas de deslizamiento, con lo cual si sometemos el material a esfuerzo será más sencillo desplazar los planos. Esto mismo sucede si un monocristal es orientado con seis sistemas de deslizamiento.

La fig. 4.13 muestra las curvas de tensión de varias muestras de cobre policristalinas y monocristalinas. Es evidente que el cobre policristalino es más resistente que un monocristal del mismo metal, el cual muestra deslizamiento simple. Sin embargo, cuando un monocristal de cobre se orienta en tensión de manera que posea seis sistemas de deslizamiento activos, la curva no es muy diferente a la del material policristalino.

Cuando en un monocristal existen seis sistemas de deslizamiento operantes desde la iniciación de la deformación en tensión, la pendiente de la curva es más pronunciada. El endurecimiento es mucho mayor, aún cuando la pendiente de la curva es bastante pronunciada desde el principio. Esta pendiente (velocidad de endurecimiento), disminuye al aumentar el flujo plástico. Esta última curva es semejante a la de un material policristalino.

Si al material policristalino, el cual tiene millones de celdas unitarias, se le somete a esfuerzo, los planos se desplazarán con mayor facilidad de acuerdo a los sistemas de deslizamiento; de igual manera, que si se somete un solo cristal con sus sistemas de deslizamiento orientados en la dirección del esfuerzo, será sencillo desplazar los planos.

El laminado (fig 3.4 a) es una forma de orientar las celdas unitarias. Si laminamos y recocemos hasta obtener un material con orientación casi total, se incrementa la resistencia al deslizamiento del material (el cual tiende a ser isotrópico) de tal manera que se obtendría una fuerte resistencia a los deslizamientos, lo cual constituye un obstáculo para la proliferación de dislocaciones.

Si recordamos que todo lo que obstaculiza las dislocaciones incrementa la dureza, también tendríamos la elevación del punto de cedencia (fig. 4.14).

Los whiskers (barbas) son cristales sin dislocaciones que tienden en alto porcentaje, a ser isotrópicos. Los whiskers pueden ser de vidrio, grafito, metales, óxidos, etc. Los materiales con whiskers de alta calidad tienen una resistencia unitaria mayor que los materiales sin whiskers (fig. 4.15).

El problema de los whiskers es que después de cierto tiempo o a alta temperatura

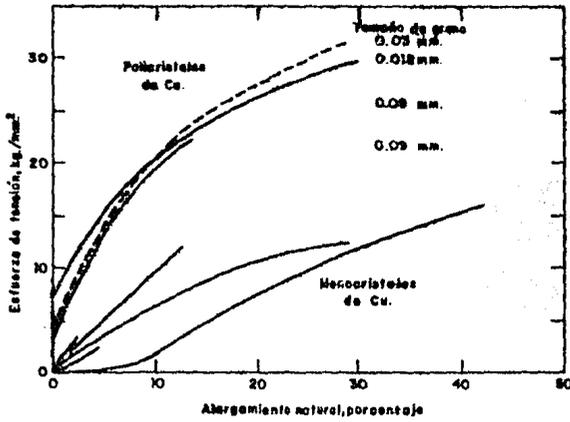


Figura 4.13 Curvas de tensión para monocristales y policristales de cobre.

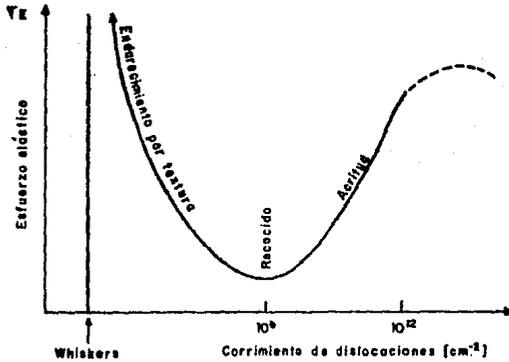


Figura 4.14 Gráfica del esfuerzo en un material que tiende a estar libre de dislocaciones.

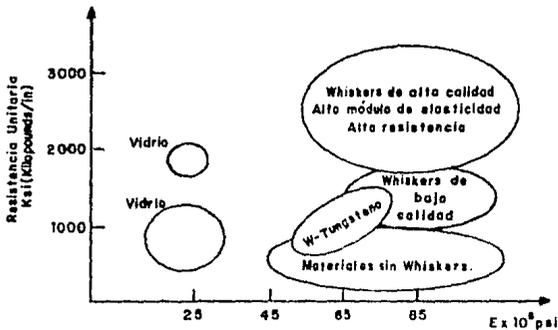


Figura 4.15 Resistencia del material de acuerdo al Whisker.

se disuelven, lo que ocasiona baja resistencia, la solución es colocar una barrera de difusión al whisker. La barrera tendría que ser fabricada de un material en donde no exista difusión, debe de ser de un material con tamaño de átomos diferente, por donde no pueda haber fluidez entre vacancias y que resista alta temperatura.

La producción de texturas (por medio de laminado) se ha usado también por mucho tiempo en la manufactura de lámina de hierro al silicio (aceros con 4% Si) para hacer bobinas de transformador, con la cual se obtienen propiedades magnéticas óptimas.

En la tabla 4.8 se muestra la comparación del esfuerzo obtenido en plata con whiskers.

El uso de los whiskers se encuentra en la aeronáutica tanto civil, militar como espacial, generalmente es aprovechado para altas temperaturas, pues para bajas temperaturas se puede disponer de otras aleaciones más baratas y resistentes.

5. DESARROLLO EXPERIMENTAL

5.1. ANALISIS QUIMICO

5.2. PRUEBAS MECANICAS

5.3. TRATAMIENTO TERMICO

De los diversos métodos de endurecimiento mencionados podrían realizarse infinitud de ejemplos con la gran cantidad de combinaciones en las aleaciones.

Para el desarrollo experimental se ha escogido una aleación de aluminio que pueda ser tratada térmicamente y sea endurecible por precipitación. Esta aleación fué vaciada en un molde permanente y se propone para ser usada en la manufactura de pistones de motor automotriz; sus características particulares, las cuales determinan la aplicación de esta aleación son su bajo coeficiente de expansión térmica, su resistencia a la tensión y dureza a las temperaturas de operación del motor, además de su alta resistencia al desgaste.

Las piezas que fueron probadas (probetas y pistones) fueron proporcionadas por una compañía fabricante de pistones; piezas sin tratamiento térmico, así como tratadas térmicamente.

El tratamiento térmico de las piezas fue realizado en la compañía fabricante de pistones.

Para realizar el desarrollo experimental se tendrán los siguientes puntos.

- Análisis Químico
- Pruebas Mecánicas
- Tratamiento Térmico de Precipitación

5.1. ANALISIS QUIMICO.

El análisis químico se realizó en un espectrofotómetro (foto N° 1) de absorción atómica marca Perkin Elmer modelo 2380.

Se seleccionaron 3 pistones fundidos (parte superior, foto N° 2), a los cuales se les tomó rebaba en forma mecánica (por medio de un taladro) y se mezcló la rebaba.

El siguiente paso fue el de tomar 100 mg de rebaba y llevarla a solución; esto se logró por medio de un ataque primeramente básico con hidróxido de potasio que disolvió la rebaba; posteriormente se aciduló con ácido clorhídrico y ácido nítrico.

La muestra ya en solución se aforo con agua destilada a 100 ml, se tomó una alícuota de 10 ml y se volvió a aforar a 100 ml. El objeto de estas diluciones fue el de entrar en el rango especificado en el espectrofotómetro de acuerdo a standares de cada elemento a determinar.

Los standares utilizados son certificados bajo normas DIN de Alemania y su marca comercial es Merck.

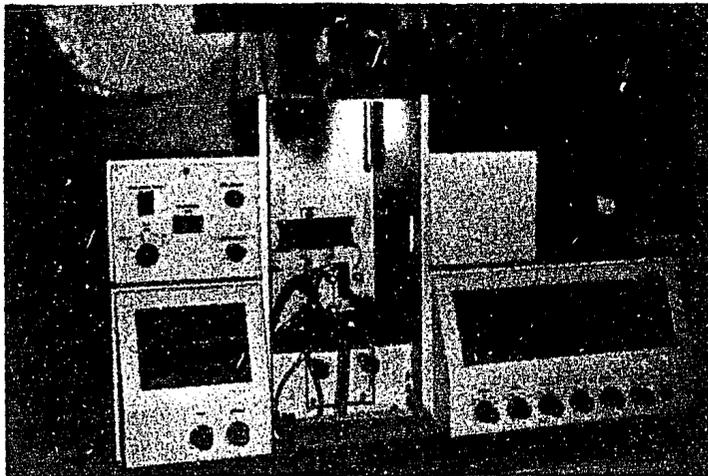


Foto N° 1

Espectrofotómetro

Foto N° 2

Parte superior. Pistón
tal como sale de fundi-
ción.

Parte inferior. Pistón
maquinado.

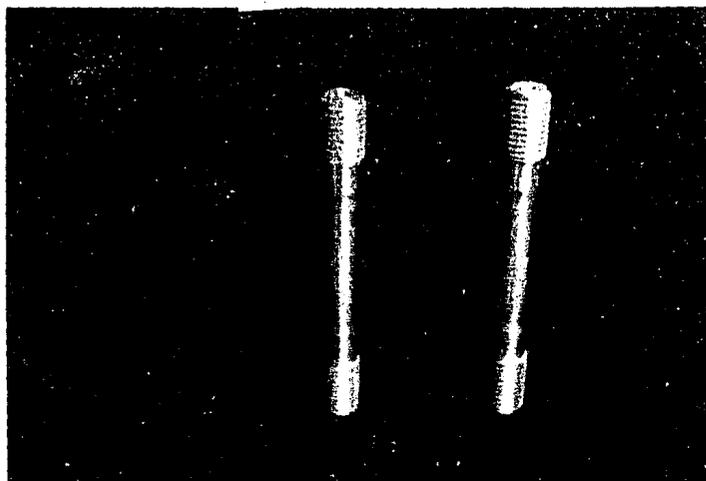
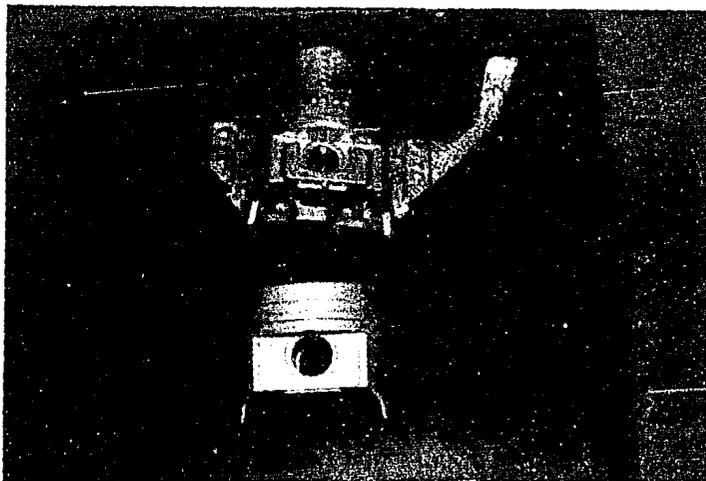


Foto N° 3

Probetas para realizar
la prueba de resisten-
cia a la tensión.

Después de calibrado el espectrofotómetro de acuerdo a los estándares se realizaron las mediciones, obteniéndose los siguientes resultados.

Silicio	9.63%
Cobre	2.66%
Magnesio	1.29%
Hierro	0.48%
Manganeso	0.27%
Titanio	0.046%
Níquel	0.07%
Zinc	0.019%
Aluminio	Resto

De acuerdo al análisis químico la aleación es comparable en composición química con una aleación F332 de Aluminum Association.

Respecto al diagrama de fases, la aleación Al-Si casi no presenta cambios bruscos en líneas de transformación, en contraste con la aleación Al-Cu que muestra cambios apreciables. Algunos autores que han estudiado este tipo de aleaciones, encontraron que el Si forma un sistema cuasibinario con el compuesto intermetálico CuAl_2 , de tal forma que una aleación Al-Cu-Si habrá endurecido por precipitación debido a la solución del Cu en Al.

5.2. PRUEBAS MECANICAS.

Aunque los mecanismos de endurecimiento afectan varias propiedades mecánicas como son resistencia a la tensión, dureza, elongación, límite de cedencia, etc, en este trabajo solo se realizaron pruebas de dureza y resistencia a la tensión, que son las características primordiales en el funcionamiento del pistón, y que además, son las características relevantes por las que se seleccionó esta aleación.

5.2.1. DETERMINACION DE LA DUREZA.

Las pruebas de dureza se efectuaron en una máquina determinadora de dureza marca S.P.V. Brinell Press Alpha Typer. La máquina previamente fue verificada con standar patrón de dureza conocida.

Se seleccionaron 3 pistones (parte inferior, foto N° 2), a los que se les tomaron 6 mediciones de dureza a cada uno; se utilizó un penetrador de 10 mm de diámetro y la carga utilizada fue de 500 Kg, el tiempo de aplicación de carga fue de 1 minuto. Las mediciones fueron tomadas a la cabeza del pistón y se realizaron antes y después de llevar a cabo el tratamiento térmico.

Los resultados se muestran en el capítulo correspondiente.

5.2.2. METODO EMPLEADO PARA LA DETERMINACION DE LA RESISTENCIA A LA TENSION.

La medición de la resistencia a la tensión se llevó a cabo en probetas standard, de acuerdo a la norma ASTM E-8, foto N° 3. La máquina utilizada para tensionar las probetas es una máquina universal marca INSTRON modelo 1137 con capacidad de 30 000 lb, foto N° 4.

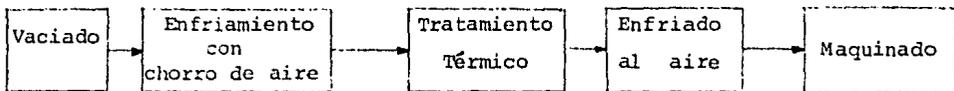
El vaciado de las probetas se llevó a cabo en un molde permanente con dos vías para obtener dos probetas a la vez. Se realizaron 3 vaciadas repartidas a lo largo del lote; es decir, al inicio, a la mitad y al final de la vaciada, teniendo un total de 6 probetas.

Las probetas se tensionaron hasta la ruptura (foto N° 5), tres antes de tratamiento térmico y las otras tres se trataron térmicamente para posteriormente evaluar la resistencia a la tensión.

Los resultados se muestran en el capítulo correspondiente.

5.3. TRATAMIENTO TERMICO.

El tratamiento de endurecimiento por precipitación a que fueron sometidas las probetas y los pistones siguió los mismos parámetros de la producción normal de pistones, a saber:



La secuencia para los pistones y probetas se desarrolló de la siguiente manera.

1. Vaciado. Tanto las probetas como los pistones se vaciaron en moldes permanentes por medio manual y a una temperatura del metal líquido de 730°C.
2. Enfriado al aire. Una vez que fueron vaciados se esperó 2 minutos para dar tiempo a la solidificación antes de sacarlos del molde permanente, transcurrido ese tiempo se desmoldaron y se enfriaron con chorro de aire.
3. Corte del material sobrante. Una vez que el material se enfrió se procedió a cortar la mazarota, tanto a los pistones como a las probetas por medio de una sierra mecánica.
4. Tratamiento Térmico. Los pistones y probetas seleccionados para el tratamiento térmico se metieron junto con un lote de producción normal a horneado durante 8 horas a una temperatura de 205 °C ± 5°C. El tiempo de permanencia empezó a contar hasta que el horno alcanzó la temperatura antes mencionada.

Los pistones y las probetas se cargaron en canastillas para su introducción al

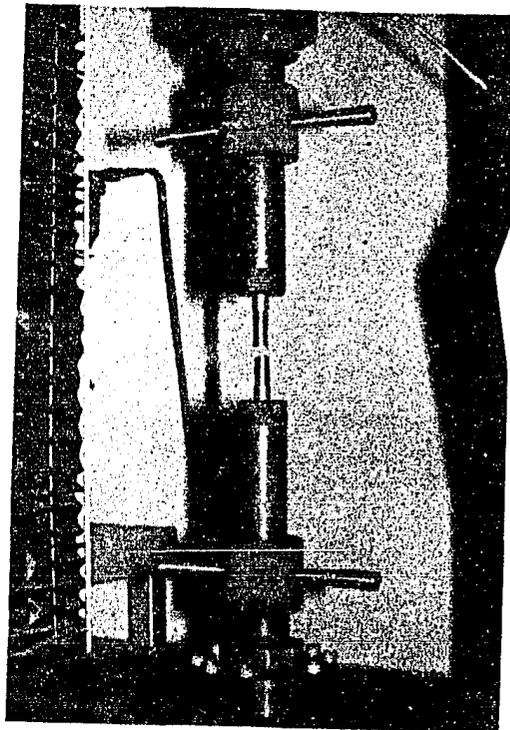


Foto N° 4

Máquina Universal

Foto N° 5

Probeta tensionada hasta la ruptura para prueba de resistencia a la tensión.



horno.

El horno utilizado para el tratamiento térmico es del tipo estacionario con circulación de aire utilizando como combustible gas y con controles automáticos de temperatura.

5. Una vez cumplido el ciclo de 8 hrs del tratamiento térmico de endurecimiento por precipitación se abrió el horno y se sacó la canastilla conteniendo el lote de producción normal y los pistones y las probetas de prueba para dejarlos enfriar al aire.

6. Una vez enfriados se realizaron las pruebas antes mencionadas.

Los pistones de producción normal pasan posteriormente a maquinado.

6. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

6.1. RESULTADOS

6.2. CONCLUSIONES

6.1. RESULTADOS.

Los resultados de la prueba de dureza realizados a la aleación de aluminio se muestran en la tabla 6.1, como se observa, las piezas con tratamiento térmico (pistón 4, 5 y 6) tuvieron una ganancia en dureza del 20% con respecto a las piezas fundidas sin tratamiento térmico (pistón 1, 2 y 3).

En el ensayo de tensión se obtuvo la gráfica que se muestra en la fig 6.1 y los valores obtenidos se muestran en la tabla 6.2. Se aprecia también un incremento en resistencia para las probetas tratadas térmicamente; el incremento en resistencia a la tensión fué de 10% y en el límite de cedencia de 28.5%; así, las piezas tratadas térmicamente tuvieron ganancia tanto en resistencia como en dureza.

En la fig 6.1 se aprecia de una manera gráfica lo que se manifestó en la tabla 6.2, observándose que la deformación es menor en las piezas con tratamiento térmico, esto da por consiguiente áreas menores bajo la curva, lo que nos indica que en este caso el tratamiento generó una pérdida en la tenacidad.

6.2. CONCLUSIONES.

A) Del desarrollo experimental.

1. Se comprobaron los efectos del endurecimiento por precipitación en la aleación de aluminio, ya que la dureza se incrementó (factor importante en el pistón) y la resistencia también aumentó.

2. El realizar el tratamiento térmico en estructura dendrítica (característica de las piezas coladas) implica ganancia en las propiedades, en este caso dureza y resistencia; sin embargo, si este tratamiento se hiciera en la misma aleación después de que fuera forjado (con estructura granular) la ganancia sería mucho mayor y tal vez la tenacidad se comportara también de modo diferente.

3. Aunque no se mencionó en el desarrollo experimental el coeficiente de expansión es una propiedad importante para el pistón; después del tratamiento térmico el coeficiente de expansión disminuye considerablemente con lo que se evitan fricciones en el cilindro y tal vez hasta probables deformaciones a las temperaturas de operación del motor.

4. La aleación de aluminio resulta ser apropiada para el uso propuesto ya que las características de sus propiedades son adecuadas para el uso en pistones.

B) En General.

1. Los mecanismos de endurecimiento son útiles en muchos casos donde se requiere tener propiedades elevadas en relación al mismo peso.

2. No necesariamente buscamos la ganancia de todas las propiedades mecánicas, incluso es difícil lograr esto, debido a que hay propiedades opuestas, por ejemplo, si se gana en dureza la mayoría de las veces se pierde ductilidad. Se deben equilibrar las propiedades deseadas.

3. Finalmente podemos decir que en la actualidad se han desarrollado métodos de endurecimiento en aleaciones no ferrosas que pueden ser capaces de substituir a aleaciones ferrosas (tradicionalmente usadas) con la misma resistencia a menor peso.

TABLA 6.1 RESULTADOS EN PRUEBAS DE DUREZA (BHN)

		<u>1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>4</u>	<u>5</u>	<u>6</u>	<u>PROMEDIO X PISTON</u>	<u>PROM. TOTAL</u>
CON T.T. SIN T.T.	PISTON 1	80	80	80	79	80	80	80	80 SIN T T
	2	79	80	80	80	81	80	80	
	3	80	78	80	80	81	80	80	
	PISTON 4	100	98	100	95	99	100	99	100 CON T T
	5	99	100	100	101	100	100	100	
	6	102	100	101	100	100	100	100	

TABLA 6.2 DATOS OBTENIDOS EN LA PRUEBA DE TENSION

		<u>Ø (PULG)</u>	<u>A (PULG²)</u>	<u>F CEDENCIA (lb)</u>	<u>F MAX (lb)</u>	<u>LIMITE CEDEN- CIA (lb/PULG²)</u>	<u>RESISTENCIA A LA TENSION (LB/PULG²)</u>	<u>PROMEDIO TOTAL</u>	
								<u>LIMITE DE CEDENCIA</u>	<u>RESISTENCIA A LA TENSION</u>
CON T.T. SIN T.T.	PROBETA 1	0.5059	0.20101	4275	6150	21267.59	30595.49	20901.96	30908.97
	2	0.4960	0.19322	3825	5805	19796.08	30043.47	SIN TT	SIN TT
	3	0.5059	0.20101	4350	6450	21640.71	32087.95		
CON T.T.	PROBETA 4	0.5059	0.20101	5850	7110	29103.02	35371.37	26864.32	34028.15
	5	0.5059	0.20101	4800	6495	23879.40	32311.82	CON TT	CON TT
	6	0.5059	0.20101	5550	6915	27610.56	34401.27		

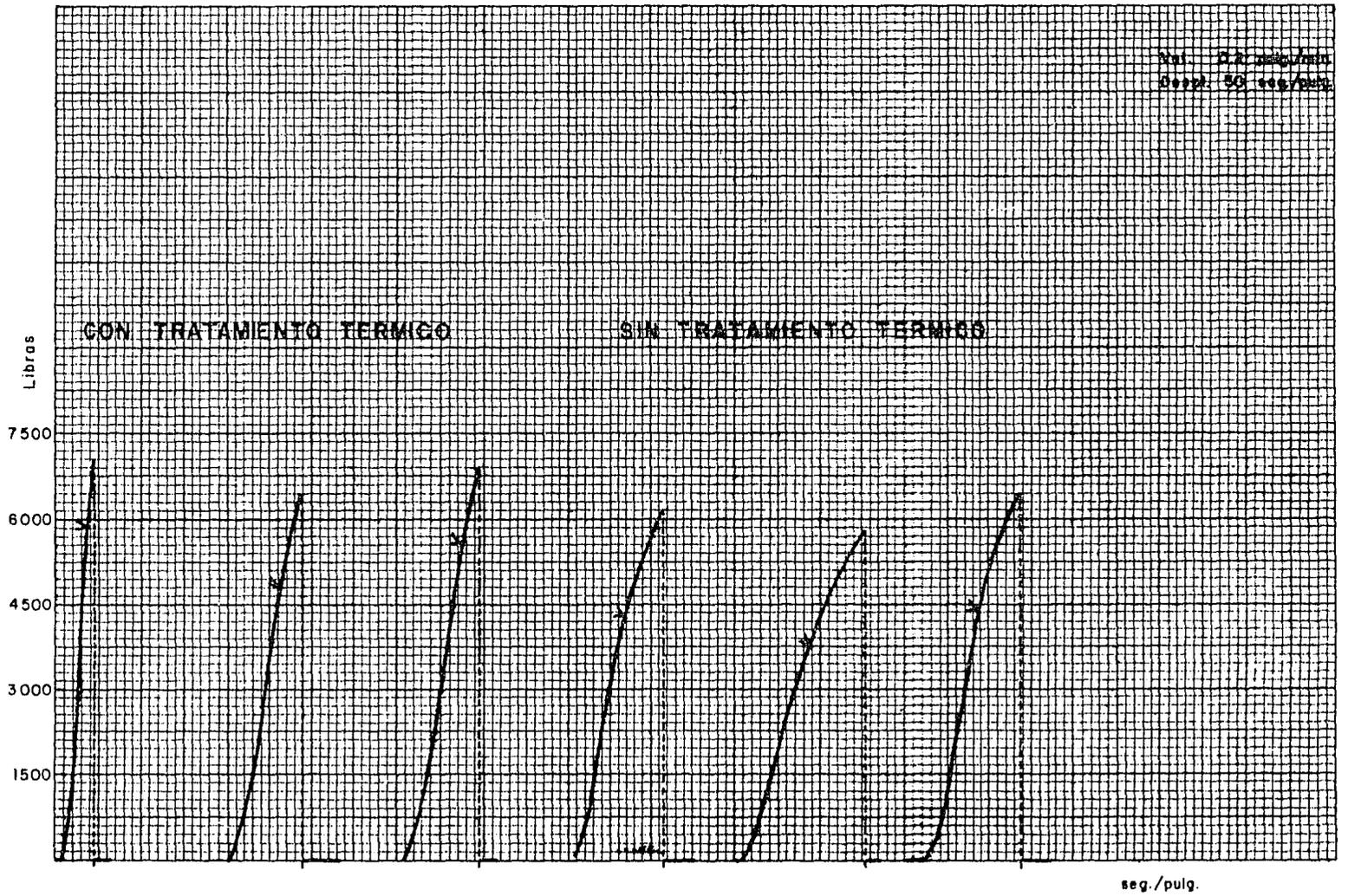


Figura 6.1 Gráfica del Ensayo de Tensión. Fuerza contra desplazamiento.

" BIBLIOGRAFIA "

1. LA MINERÍA EN MÉXICO,
SECRETARÍA DE PATRIMONIO Y FOMENTO INDUSTRIAL
SECRETARÍA DE PROGRAMACIÓN Y PRESUPUESTO
2. ANUARIO ESTADÍSTICO DE LA MINERÍA MEXICANA 1979,
EDITADO POR EL CONSEJO DE RECURSOS MINERALES.
3. LA ECONOMÍA MEXICANA EN CIFRAS,
NACIONAL FINANCIERA, S. A.
4. METALS HANDBOOK, EIGHTH EDITION,
VOLUME 2, HEAT TREATING, CLEANING AND FINISHING
5. METALS HANDBOOK, EIGHTH EDITION,
VOLUME 8, METALLOGRAPHY, STRUCTURES AND PHASE
DIAGRAMS.
6. METALS HANDBOOK, NINTH EDITION
VOLUME 2. PROPERTIES AND SELECTION?
NONFERROUS ALLOYS AND PURE METALS,

7. LAWRENCE H. VAN VLACK
MATERIALES PARA INGENIERÍA
ED. CECSA.

8. SYDNEY H. AVNER
INTRODUCCIÓN A LA METALURGÍA FÍSICA. 2A. EDICIÓN
ED. MC. GRAW HILL

9. WAYNE HAYDEN, WILLIAM G. MOFFAT, JOHN WULFF
PROPIEDADES MECÁNICAS
ED. LIMUSA. MÉXICO 1968.

10. RICHARD A. FLINN, PAUL K. TROJAN
MATERIALES PARA INGENIERÍA Y SUS APLICACIONES
ED. MC. GRAW HILL

11. CARL A. KEYSER
CIENCIA DE MATERIALES PARA INGENIERÍA
ED. LIMUSA

12. J. C. ANDERSON, K. D. LEAVER,
J. M. ALEXANDER, R. D. RAWLINGS.
CIENCIA DE LOS MATERIALES
ED. LIMUSA. MÉXICO 1978.

13. EL COBRE Y SUS ALEACIONES EN LA TECNOLOGÍA.
PUBLICACIÓN CIDEC, GINEBRA, SUIZA.
ASOCIACIÓN MEXICANA DEL COBRE A. C. MÉXICO

14. GACETA U N A M
VOL. V No. 70. OCTUBRE 1981

15. METALS PROGRESS.
TRENDS IN NONFERROUS METAL TECHNOLOGY
VOL. 121. No. 1. JANUARY 1982

16. EXPANSIÓN.
MATERIAS PRIMAS: COBRE
JULIO 1981.

... ¿No hay límites, Juan? pensó, y sonrió.
Su carrera hacia el aprendizaje había empezado.

R. Bach

Juan Salvador Gaviota