

---

# **MATERIALES EN LA INDUSTRIA DEL TRANSPORTE**

**Instituto Mexicano del Transporte**

**Secretaría de Comunicaciones y Transportes**

**Publicación Técnica No. 23  
Querétaro, Qro., 1991**

MATERIALES EN LA INDUSTRIA DEL TRANSPORTE

INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

Publicación Técnica No. 23  
Querétaro, Qro. 1990

**INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE**

**SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES**

**MATERIALES EN LA INDUSTRIA DEL TRANSPORTE**

**Publicación Técnica No. 23  
Querétaro, Qro.  
1990**

## **MATERIALES DE LA INDUSTRIA DEL TRANSPORTE**

### **RESUMEN**

En este artículo se presenta una introducción al lector no especializado en el campo de los materiales que por cuestiones personales, de trabajo o investigación se encuentra relacionados con aplicaciones de éstos en el sector Transporte.

Se incluyen en forma general ciertas características de los polímeros, cerámicos y metales, así como aplicaciones en algunas ramas de la industria del transporte

### **RECONOCIMIENTOS**

Este trabajo fue realizado en el Instituto Mexicano del Transporte por el Ing. Octavio Domínguez Espinós, el Dr. Alejandro Lozano Guzmán y revisión del Dr. Miguel Martínez Madrid. Los autores agradecen el trabajo de Socorro Alvarez Tostado en la mecanografía del informe.

# I N D I C E

I	Introducción.....	1
II	Polímeros.....	3
III	Cerámicas.....	10
IV	Metales.....	15
V	Aplicaciones.....	21
	V.1 Automóviles.....	22
	V.2 Aviones.....	25
	V3 Barcos y Trenes.....	29
VI	Referencias.....	32

## I INTRODUCCION

El primer motor térmico de elevada potencia, transformador de energía calorífica en energía mecánica nació en el siglo XVII; es así que la aparición de la máquina de vapor fue el factor determinante de la revolución industrial. En el siglo XIX, la invención del motor de combustión interna por Alphonse Beau de Rochas, su realización práctica por August Otto, el desarrollo de la extracción de petróleo y el empleo de los materiales adecuados, constituyeron la base de la revolución de los transportes. Actualmente se está produciendo una nueva fase de la revolución tecnológica. Estamos viviendo la revolución energética ligada a la aparición de materiales sorprendentes y a la explotación de nuevas fuentes de energía.

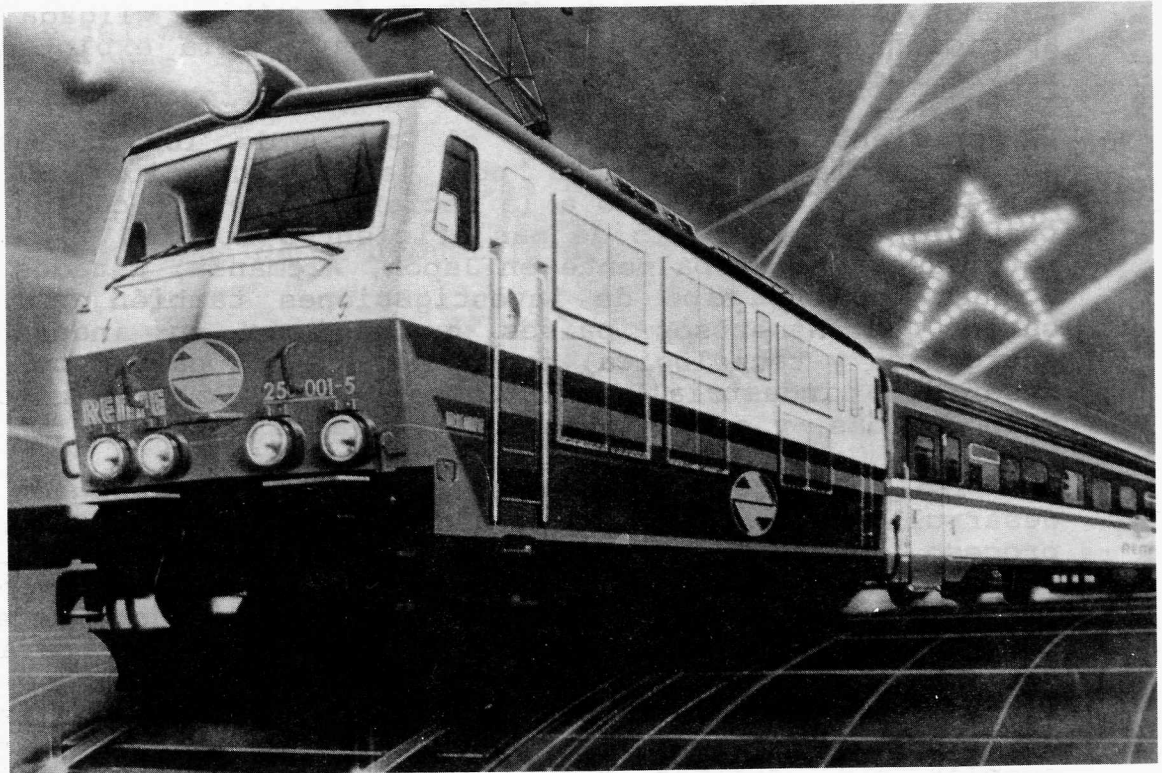
El creciente incremento en el costo de los combustibles aunado a la preocupación por la conservación del medio ambiente ha contribuido a la reciente intensificación de los trabajos de desarrollo de mas eficientes motores y de nuevos materiales, principalmente en Japón, Alemania, Estados Unidos y Suecia. Este tipo de investigaciones también comienzan a surgir en numerosos países que buscan su independencia energética y tecnológica, especialmente los países con cierto desarrollo industrial del tercer mundo, cuya limitaciones tecnológicas y energéticas son cruciales.

En este contexto, en nuestro país, la investigación en el desarrollo de materiales, en general no ha estado ligada al proceso de diseño de equipos. Normalmente los ingenieros emplean los resultados de las pruebas de materiales para el diseño de estructuras y componentes, procediendo a determinar los esfuerzos ya sea teórica o experimentalmente para luego ser comparados con los valores permisibles, obtenidos en las pruebas de materiales. Por otra parte, los especialistas en materiales y metalurgistas producen materiales para que cumplan con ciertos requerimientos mecánicos, físicos y químicos y solamente les concierne la relación entre propiedades, microestructura y durabilidad. Esto no propicia una investigación aplicada, bien dirigida y tiende a dispersar esfuerzos. Es así que se requiere una mayor vinculación entre los ingenieros de diseño y los científicos en cuestión de materiales.

El presente artículo tiene por finalidad la de introducir al lector no especializado en el campo de materiales que por cuestiones personales, de trabajo o investigación, se encuentra relacionado con aplicaciones de éstos en el sector transportes.

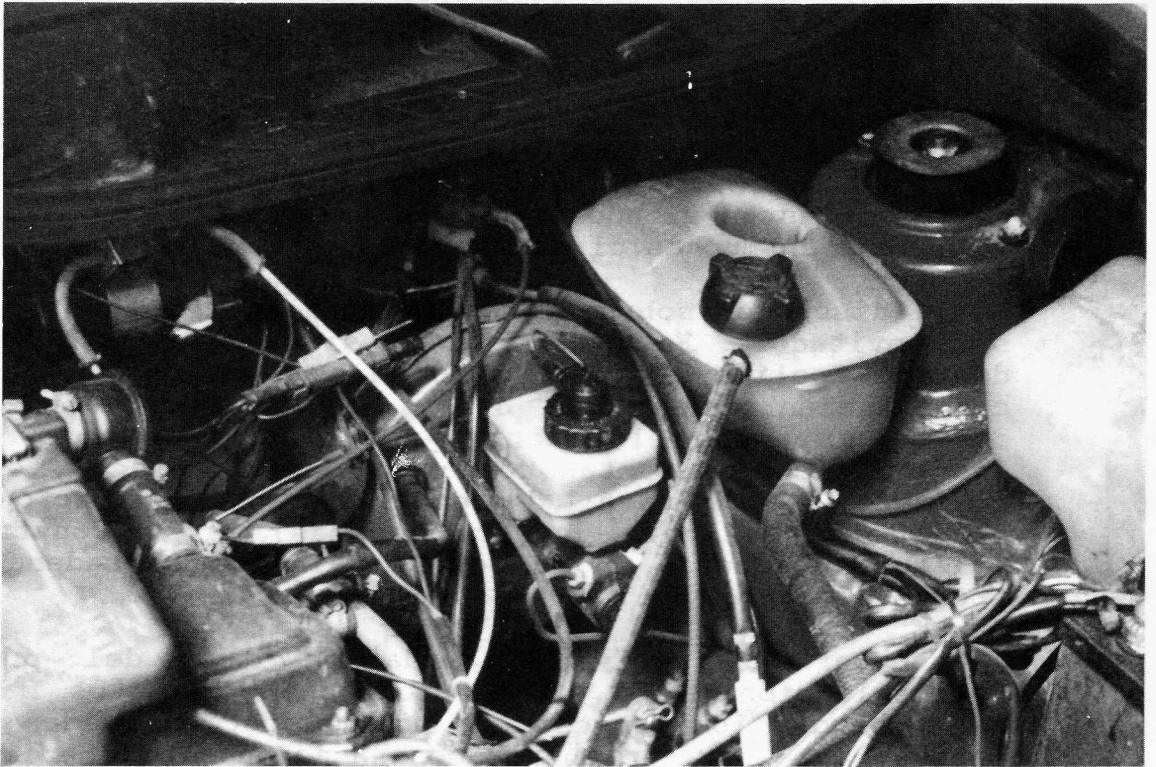
Se ha tratado de presentar en forma general ciertas características de los polímeros, cerámicos y metales, así como aplicaciones en algunas ramas de la industria del transporte. Sin embargo, se han omitido explicaciones

matemáticas y formulas detalladas, por quedar fuera del contexto del presente trabajo.



TREN LIGERO EUROPEO CAPAZ DE DESARROLLAR VELOCIDADES DE 300 KM/H., EN GRAN MEDIDA GRACIAS AL EMPLEO DE NUEVOS MATERIALES.

## II P O L I M E R O S



CONTENEDORES FABRICADOS A BASE DE POLIMEROS  
TERMOPLASTICOS, EMPLEADOS COMUNENTE PARA ALMACENAR  
LIQUIDOS EN LOS AUTOMOVILES



## POLIMEROS

El uso de los polímeros en Ingeniería, ha ido en aumento en los últimos 25 años, al punto de que se les encuentra actualmente en muchas aplicaciones comerciales. Aunque en general proporcionan una modesta resistencia, tenacidad y pobres propiedades con la temperatura, algunos tienen excelente características contra la corrosión, adecuada resistencia a la tensión y alta tenacidad a temperatura ambiente. Además, los polímeros pueden tener una variedad de propiedades únicas que no pueden obtenerse en otros materiales.

Existe una variedad tan grande de estos materiales en uso hoy en día, que no hay actividad en la que no estén presentes. Por otra parte, su utilidad en ingeniería ha crecido a tal grado que están siendo empleados para reemplazar a materiales metálicos en muchas circunstancias.

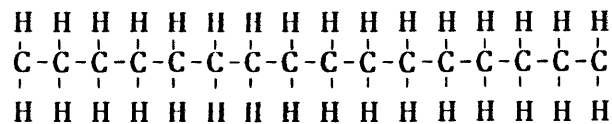
En la discusión sobre estos materiales, el término plástico será evitado. Este término ha sido comúnmente usado para designar polímeros, pero sólo tiene sentido en términos de comportamiento mecánico, i.e., deformación plástica. Para distinguir entre el material y el comportamiento (no todos los plásticos presentan comportamiento plástico), el término polímero se empleará, debido a que es más apropiado que plástico. Polímero implica cadenas largas construidas de moléculas pequeñas en las que usualmente la cadena contiene átomos de carbón.

Al hablar de polímeros, nada se dirá del proceso de polimerización usado en la producción de estos materiales, sin embargo, los procesos de polimerización pueden dividirse en dos: polimerización por condensación y polimerización por adición [13].

En la polimerización por condensación, dos o más moléculas orgánicas reaccionan para producir una cadena a base de combinaciones de las moléculas originales, dando como producto de reacción generalmente agua, la cual es eliminada.

En el caso de polimerización por adición, en alguna molécula que contiene un doble enlace, éste se separa por la acción de un catalizador, el cual produce electrones impares en la molécula, los cuales generan enlaces con moléculas cercanas que se encuentran en las mismas condiciones, hasta que se produce una cadena larga. Las condiciones necesarias para iniciar estas reacciones son complejas, por lo que las propiedades del polímero pueden ser alteradas durante el proceso de polimerización.

Considerando al polímero como una cadena de unidades repetidas, ciertas características de la cadena pueden ser consideradas para describir su estructura. Una característica significativa de la molécula del polímero es el grado de polimerización [11], el cual es el número de veces que se repite la unidad de estructura en la cadena. A cada unidad repetida, la cual es químicamente igual a la molécula inicial, se le llama monómero. Por ejemplo, la estructura de la figura siguiente es la repetición del monómero etileno ( $C_2 H_4$ ), por lo que la estructura presenta ocho monómeros y su grado de polimerización es 8.



CADENA DE POLIMERO CON OCHO  
MONOMEROS ETILENO.

Para los polímeros más simples con una estructura basada en la del etileno, los hidrocarburos que contienen de 5 a 20 monómeros, son gases y líquidos a temperatura ambiente. Cuando el número de monómeros es mayor de 50, el polímero es un sólido suave (cera), y a mayores grados de polimerización, de 200 a 2000, se obtiene polietileno sólido, el cual se emplea en la fabricación de artículos para el hogar.

Mientras que los átomos de carbón de la cadena están unidos entre sí por fuertes enlaces covalentes, las fuerzas que enlazan a las cadenas son producto de dipolos electrostáticos transitorios, a los cuales se les conoce como fuerzas de Van der Waals [14]. Cuando las cadenas se someten a esfuerzo, estas tienden a deslizarse unas sobre otras, ocurriendo la falla por separación de cadenas y no por rompimiento de enlaces dentro de la cadena. Estos enlaces entre las cadenas se pueden mejorar incrementando los enlaces de Van der Waals. Algunos polímeros son entrelazados (cross-linked) [2] o sea que existen enlaces covalentes entre las cadenas. El entrelazamiento generalmente se desarrolla cuando hay enlaces de carbón insaturados; polímeros altamente entrelazados tienen una alta resistencia a la tracción y baja ductilidad.

A diferencia de los metales, la mayoría de los polímeros se encuentran preferentemente en estado no cristalino o amorfo. Presentan una temperatura de fusión poco definida, no como los metales, sino que pasan a estado de líquido viscoso al enfriarse a la temperatura conocida como temperatura de transición  $T_g$ . Por debajo de este rango de temperatura, el movimiento molecular prácticamente ha cesado por lo que existe un marcado cambio en las propiedades [3]. Estos polímeros son duros, rígidos, frágiles y usualmente transparentes; en estado amorfo, la estructura del polímero no es diferente de la de los vidrios inorgánicos.

Algunos polímeros son parcialmente cristalinos y su estructura se caracteriza por un grado de cristalización, la cual normalmente se expresa en porcentaje y representa una medida del grado de ordenamiento tridimensional de largo alcance dentro del polímero, siendo los polímeros simples con cadenas poco complicadas los más fáciles de cristalizar.

Los polímeros con gran cantidad de entrelazamiento no tienden a cristalizar, ya que el entrelazamiento ocurre a altas temperaturas para asegurar que al momento de enfriar por debajo de  $T_m$  (punto de fusión cristalino), estos no tendrán suficiente movilidad para alinearse a la estructura cristalina o parcialmente cristalina. Como resultado, el enfriamiento por debajo de  $T_g$  entra al estado amorfo sin presentar cristalización apreciable. Aunque  $T_g$  y  $T_m$  se mencionan como temperaturas específicas, en realidad son intervalos de temperaturas dentro de los cuales ocurren cambios.

Estas temperaturas se pueden detectar midiendo los cambios de volumen específico por medio de técnicas de análisis térmico diferencial, obteniéndose curvas distintas para cada tipo de polímero [4].

Para la mayoría de los polímeros  $T_g$  y  $T_m$  están relacionadas en forma sencilla, ya que ambas dependen de la estructura de la cadena y de la simetría.

No existe aún modelo satisfactorio para la estructura cristalina y parcialmente cristalina de los polímeros. Las primeras teorías consideraban que el polímero estaba formado por pequeñas regiones en las que existía ordenamiento, mientras que en otras regiones no lo había; las regiones alineadas, llamadas cristalitas, entonces estaban rodeadas de regiones amorfas.

Teorías más recientes para polímeros altamente cristalizados consideran a estos en forma análoga a los metales, en los que la estructura es cristalina, pero contiene defectos [12].

Por deformación mecánica, sea elástica o plástica, en especial entre  $T_m$  y  $T_g$ , aumentará la cristalización y orientación de las cadenas moleculares. Tal deformación se puede realizar durante la fabricación, como en el caso de fibras y láminas. El resultado es un aumento en la resistencia debido al alineamiento de las moléculas por el proceso, por lo que al aplicar un esfuerzo, éste es soportado por los enlaces covalentes fuertes a lo largo de la fibra, cosa que no ocurre en los polímeros amorfos.

El tipo y grado de entrelazamiento en polímeros tiene una influencia importante en su comportamiento térmico [4]. Cuando los polímeros que se mantienen unidos principalmente por fuerzas de Van der Waals, se calientan, las fuerzas moleculares son fácilmente vencidas, por lo que se reblandecen y deforman fácilmente. En tal condición el material es fácil de conformar, por lo que sus propiedades de fusión, en especial su viscosidad de fusión, son características importantes. A este tipo de materiales se les denomina termoplásticos [13]. Los polímeros altamente entrelazados no se reblandecen fácilmente al ser calentados, debido a que la energía térmica requerida para vencer los enlaces covalentes es mucho mayor que la de los enlaces de Van der Waals. Este tipo de polímero se degrada al ser calentado, por lo que pueden ser tratados de igual forma, denominándoseles por el nombre de termoendurecidos [13].

Además de la naturaleza del enlace entre las cadenas del polímero, variaciones estructurales dentro de la cadena pueden tener una influencia importante en sus propiedades. Cuando consideramos polímeros que sólo contienen átomos de

carbón e hidrógeno, el arreglo de los átomos de hidrógeno es de poca importancia, ya que son tan pequeños que no interfieren unos con otros y sus posiciones sólo están dictaminadas por los requerimientos de enlace de los átomos de carbón.

Si el polímero es ligeramente más complejo, por ejemplo uno a base de la molécula de cloruro de vinil,  $C_2H_5Cl$ , una nueva condición se introduce [12]. Las posiciones ocupadas por los átomos de cloro (o moléculas) tienen una influencia sobre las propiedades ya que estructuradas asimétricamente presentan menos regularidad y cristalizan más difícilmente.

Usualmente al incrementar el punto de cedencia y la rigidez de un polímero sin aumentar la resistencia a la tensión, da por resultado un aumento en la fragilidad del material, por lo que se requiere de un balance entre resistencia a la cedencia y resistencia a la tensión para proporcionar al material de una ductilidad adecuada para aplicaciones en ingeniería.

Una propiedad que depende del peso molecular y de la cristalización es la fatiga a la flexión. Aumentando el peso molecular se mejora ésta, mientras que al aumentar la cristalización disminuye; otro aspecto de los polímeros que debe también ser considerado, es su tendencia a la deformación dependiente del tiempo. De hecho los polímeros presentan tanto comportamiento elástico como viscoso, al cual se le llama viscoelasticidad [3]. Cuando un polímero, en particular uno amorfo, se le somete a un esfuerzo, existe una respuesta elástica inmediata. Esta respuesta es seguida por un flujo viscoso dependiente del tiempo, el cual disminuye conforme transcurre el mismo hasta alcanzar un estado estacionario. Si se retira la carga, el material se recupera elásticamente seguido de una recuperación dependiente del tiempo, sin embargo, queda una deformación permanente. A la recuperación dependiente del tiempo se le conoce como memoria plástica.

Una propiedad de los polímeros amorfos que es importante en algunas aplicaciones en ingeniería es la transparencia, la cual se pierde en la cristalización. Los polímeros cristalinos son generalmente translúcidos u opacos, mientras que los amorfos son transparentes. Las regiones cristalinas que son considerablemente más densas que las amorfas, producen una diferencia en el índice de refracción entre las regiones, ocasionando dispersión de la luz, lo que a su vez da por resultado que el material sea translúcido u opaco.

La adición de plastificantes, cargas (fillers) y otros modificadores pueden cambiar significativamente las propiedades de los polímeros [39]. Los plastificantes son

comúnmente polímeros de bajo peso molecular (o monómeros), los cuales separan las cadenas en el polímero, reduciendo la cristalización.

Las cargas son de muchos tipos [38], se añaden para impartir una variedad importante de propiedades a los polímeros. Las cargas se pueden dividir en fibras y partículas. Las partículas son generalmente materiales como la sílice (arena, cuarzo), silicatos (mica, talco, asbestos), vidrios (granos, esferas, escamas), polvos metálicos, compuestos inorgánicos (caliza, alúmina, magnesia), celulosa y otros polímeros. Las fibras incluyen celulosa, fibras sintéticas (nylon, poliéster, acrílico), cerámicas (vidrio, carbón, boro, alúmina, carburo de silicio, nitruro de titanio), y otros. En general las partículas mejoran la resistencia a la compresión, la resistencia al desgaste, el impacto y a la temperatura. Por otra parte, las fibras imparten mayor resistencia a la tensión y al impacto.

### III C E R A M I C A S



RECUBRIMIENTO CERAMICO EMPLEADO PARA  
PROTEGER LA ESTRUCTURA DE UN VEHICULO  
AEROSPAIAL, EN EL REINGRESO A LA ATMOSFERA.

## CERAMICOS

Las cerámicas se pueden definir como materiales inorgánicos con enlace iónicos y covalentes. La cerámica tradicional comprende las materias primas y los productos de la industria alfarera tal como porcelana, gres, stoneware y ladrillos. Naturalmente la materia prima principal es la arcilla, la cual consiste de pequeños cristales de aluminosilicatos hidratados [16], esto es, compuestos que contienen  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$  en diferentes proporciones. Después de darle la forma deseada por deformación plástica, la pieza cerámica es sancochada a alta temperatura para quitarle el agua y llevar a cabo varias reacciones. La microestructura final consiste en un compuesto refractario cristalino, sumergido en una matriz amorfa, siendo un sistema complejo, heterogéneo, metaestable y realizado en condiciones no muy controladas, debido a que lo que se busca es un producto económico. Arte y empirismo son factores importantes, ya que apenas los físicos del estado sólido han comenzado a tratar de explicar las propiedades en términos de cada una de las fases presentes.

Actualmente el término cerámica abarca un campo mucho más amplio, ya que además de la cerámica tradicional basada en la arcilla, hoy en día comprende nuevos productos cerámicos como son: óxidos, carburos, nitruros y boruros de alta pureza, grafito, cemento y concreto, cermets, vidrios y cristales cerámicos [10].

La industria cerámica (incluyendo loza, ladrillos refractarios y de construcción, cemento y vidrio) por mucho tiempo ha sido una de las más grandes e importantes. Después de la II Guerra Mundial, surgieron nuevos requerimientos en ramas como ingeniería mecánica, electrónica y nuclear, que los materiales ingenieriles convencionales no podían satisfacer, especialmente los metales. Solamente las nuevas cerámicas pudieron satisfacer las arduas especificaciones y consecuentemente, gran parte en el desarrollo de materiales nuevos han sido en el campo de las cerámicas, las cuales ya son reconocidas como una clase de material tecnológicamente importante, junto con los metales y los polímeros.

Los nuevos materiales cerámicos cubren una variedad de compuestos de alta pureza. En su forma impura han sido usados como abrasivos, por ejemplo la alúmina y el carburo de silicio. Mediante mejores técnicas de manufactura, se ha logrado producirlos en un grado de mayor pureza, totalmente cristalizados sin fase amorfa presente y con una densidad cercana a la teórica [29]. La porosidad típica es menor de 0.5% comparada con el 5 al 15% de la cerámica tradicional de alta calidad.

Por otra parte, el cemento [4] consiste de complejos compuestos de calcio, sílice y alúmina, los cuales se



combinan con el agua durante el fraguado. El cemento y el concreto son sistemas cerámicos extremadamente complejos, en los cuales su química no está muy bien entendida, y su física casi no ha progresado. Sin embargo, es el material que mayor uso tiene en aplicaciones ingenieriles, consumiendo anualmente más de una tonelada por persona.

Los cermets son partículas cerámicas cristalinas que se mezclan con un 5 a 15% de metal, con el objeto de quitarle lo quebradizo a los cerámicos y alterar sus propiedades.

Por otra parte, los vidrios se pueden considerar como materiales cerámicos por varias razones. Estos están hechos a base de mezclas de óxidos; aún cuando se encuentran en estado amorfo en lugar de cristalino, presentan propiedades muy similares, tal como baja conductividad térmica y eléctrica y prácticamente nada de ductilidad. Recientemente se han desarrollado vidrios cerámicos en los cuales el vidrio se hace cristalizar en forma controlada para producir una cerámica de grano muy fino, libre de porosidad.

Las propiedades mecánicas y físicas de las cerámicas dependen de sus enlaces atómicos y sus estructuras cristalinas [3]. Los enlaces son iónicos o intermedios entre iónicos y covalentes, por lo que la ausencia de electrones libres es responsable de la mala conductividad eléctrica y térmica que presentan, motivo por el cual se les emplea como aislantes. Cuando la separación de energía entre las zonas de Brillouin y las zonas completas de electrones, es pequeña, el material cerámico es semiconductor.

Sus enlaces son altamente estables, por lo que las cerámicas tienen muy altos puntos de fusión y una gran estabilidad química.

Por ejemplo, el carburo de hafnio tiene el punto de fusión más alto que se conoce, 4150 °C. Consecuentemente, las cerámicas se emplean ampliamente en el recubrimiento de hornos y en contenedores para reacciones que se realicen a muy altas temperaturas [10].

Sus propiedades electrónicas son extensas; los materiales iónicos tienen cargas eléctricas separadas y por la naturaleza de sus enlaces, los dipolos responden cuando se aplica un campo eléctrico, fenómeno que los hace útiles en la fabricación de dieléctricos.

En cuanto a sus propiedades mecánicas, se caracterizan por falta de plasticidad, gran rigidez y una muy alta resistencia a la compresión. La resistencia a la tensión es baja debido a la influencia de microgrietas, por lo que su comportamiento mecánico está en contraste con el de los metales.

La ausencia de plasticidad en las cerámicas se debe a la naturaleza de sus enlaces. Se sabe que el mecanismo de flujo plástico se debe al movimiento de defectos en la estructura cristalina (dislocaciones) sobre ciertos planos, llamados planos de deslizamiento [2]. Es suficiente hacer notar que estos pueden moverse a bajos esfuerzos en los metales, debido a que por los enlaces metálicos que no son direccionales, se producen una gran cantidad de dislocaciones, mientras que en las cerámicas covalentes, los enlaces altamente direccionales, ocasionan pocas dislocaciones y una alta resistencia al movimiento. Consecuentemente, el punto de cedencia al cual las dislocaciones se mueven, es mucho mayor en los materiales cerámicos que en los metálicos, aproximándose en los primeros al esfuerzo de ruptura, por lo cual, las cerámicas covalentes son quebradizas.

Por otra parte, en las cerámicas iónicas el enlace no es tan direccional, debido a la interacción electrostática entre todos los iones positivos y cristalinos del arreglo. Las dislocaciones son amplias y la resistencia al movimiento es relativamente pequeña, habiendo flujo plástico en estos a una escala considerable. Mientras los metales tienen muchos sistemas de deslizamiento, los cristales iónicos sólo pueden presentar deslizamiento en un número limitado de planos, debido a la restricción de que iones con cargas similares no pueden estar en posiciones aledañas.

Esta falta de plasticidad es responsable de la baja resistencia a la tensión de la mayoría de las cerámicas, estando muy por debajo de su valor teórico. De acuerdo a la teoría de Griffith [1], la fractura de materiales quebradizos no ocurre a los esfuerzos teóricos, debido a la presencia de pequeñas grietas en el cristal o en la superficie del material cerámico que se propagan a esfuerzos menores.

La cuestión para mejorar los materiales cerámicos está en aumentar su resistencia a la fractura al valor teórico. Para esto, existen dos posibles caminos; uno es eliminar las microgrietas y el otro es introducir plasticidad [29]. Lo primero se logra durante la fabricación cuidadosa de fibras cerámicas y vidrios, obteniéndose resistencias que se aproximan a la teórica; lo segundo tiene la ventaja de que las microgrietas no conducen a la fractura prematura, lográndose esto mediante transformaciones de microestructura ( $ZrO_2/MgO$ ), dispersión metálica ( $Al_2O_3/Ni$ ,  $ZrB_2/Zr$ ), refuerzo con fibras ( $Si_3N_4/SiC$ ,  $Al_2O_3/SiC$ ), interconexión de granos, etc. [29].

Como muchos materiales cerámicos se usan a grandes temperaturas, su habilidad para soportar choques térmicos es de gran importancia [34]. En este sentido, los esfuerzos térmicos deben considerarse cuidadosamente, ya que materiales anisotrópicos pueden tener diferentes coeficientes de dilatación térmica y cambios bruscos en la temperatura

producirán esfuerzos entre granos. Por otra parte, cambios rápidos de temperatura producen gradientes térmicos y ocasionan expansión térmica diferencial, así que el enfriamiento rápido es usualmente más desastroso que el calentamiento rápido, ya que el primero pone a la superficie en tensión.

IV METALES



RIN DEPORTIVO, FABRICADO A BASE DE  
ACERO FORMADO.

## METALES

El primer intento por describir el estado metálico aparece con la teoría del electrón libre propuesta en 1900 por Drude y desarrollada por Lorentz [5]. En esta teoría el cristal metálico era considerado como un arreglo de iones positivos alrededor de los cuales vagaban los electrones de valencia. El arreglo está sumergido en la nube electrónica y cada electrón de valencia es compartido por todos los átomos del cristal. Las fuerzas de enlace surgen de la siguiente manera; los electrones libres esconden a los iones positivos de unos a otros, evitando de esta forma la repulsión entre ellos. A su vez, los iones positivos forman una región de baja energía potencial para los electrones y es esta reducción en la energía potencial de los electrones lo que da origen a las fuerzas de enlace.

El modelo del electrón libre explicaba cualitativamente muchas de las propiedades características de los metales, como la alta conductividad térmica y eléctrica de estos, la opacidad y reflectividad de las superficies metálicas y algunas propiedades mecánicas. Pero la teoría de Drude-Lorentz tenía fallas importantes, debido a que trataba el movimiento de los electrones en términos de ecuaciones clásicas de movimiento, es decir, física newtoniana. En 1928, Sommerfield aplica los conceptos de la mecánica cuántica [7] al movimiento de los electrones, logrando explicar y cuantificar más fenómenos, para que posteriormente llegara la teoría de zonas de Brillouin [9], con la cual se explicaron las propiedades de los metales en términos de su valencias.

Como materiales estructurales, los metales soportan cargas sin apreciable deformación plástica o fractura, motivo por el cual han sido ampliamente utilizados por el hombre a través de la historia. Al mismo tiempo, cargas superiores o las mismas pero a mayores temperaturas, se emplean para su conformado, como por ejemplo forjado, rolado o extrusión.

Las tres etapas que presentan los metales como respuestas a los esfuerzos son [40]: deformación elástica, plástica y fractura. La deformación elástica desaparece cuando deja de actuar el esfuerzo, y tiene su origen en el alargamiento de los enlaces atómicos y en el cambio de la energía interna del metal. Las deformaciones elásticas máximas en los metales andan alrededor del 0.2% antes de que empiece la deformación plástica. Cabe hacer notar, que ciertos polímeros llamados elastómeros [13], muestran deformaciones elásticas mayores debido a la rotación de enlaces covalentes de los átomos de las cadenas; a este tipo de elasticidad se le conoce como elasticidad entrópica, llegando la deformación elástica a valores de hasta 500%.

La deformación plástica no desaparece cuando el esfuerzo deja de aplicarse. Se debe básicamente al deslizamiento de unos planos atómicos sobre otros; el proceso ocurre heterogeneamente mediante defectos de red llamados dislocaciones [6]. La máxima deformación plástica varía de unos metales a otros, debido a los diferentes tipos de enlaces atómicos y a la facilidad o dificultad que encuentran las dislocaciones para moverse en la red cristalina. Los metales destacan por su habilidad a la deformación plástica, llegando hasta valores del 100% en algunos de ellos.

Finalmente en la fractura, los planos atómicos se separan y nuevas superficies se forman. La habilidad de los metales a la deformación plástica antes de la fractura, es invaluable en aplicaciones estructurales, aunque el uso de materiales quebradizos no está completamente descartado, ya que, muchos puentes largos de hierro colado que fueron construidos en el siglo pasado, aún continúan en pie. Sin embargo, en los materiales dúctiles el factor de seguridad puede ser mucho menor debido a que el flujo plástico previene la concentración de esfuerzos localizados con alta generación de fallas, agujeros, cambios de sección, etc.; los concentradores de esfuerzos, si no son eliminados, pueden llegar a ser capaces de iniciar agrietamientos aunque el esfuerzo promedio esté dentro del rango elástico [1]. Si una grieta se formase, la gran absorción de energía por la deformación plástica alrededor del frente de avance de la grieta previene que ésta crezca rápidamente y fracture catastróficamente, siempre y cuando no se haya superado el esfuerzo crítico.

La importancia comercial de los metales radica principalmente en su facilidad para combinarse unos con otros para obtener aleaciones con propiedades que no podrían ser obtenidas a partir de los metales puros. Casi universalmente, los objetos metálicos comerciales son solidificados desde una fase líquida a cualquiera de sus formas finales, llamadas fundiciones, o en formas intermedias, llamadas lingotes, las cuales se transforman mediante trabajo, al producto final [4]. Como las propiedades del resultado final están determinadas, en gran medida, por la naturaleza del proceso de solidificación, son de la mayor importancia práctica los factores implicados en la transformación desde líquido hasta sólido.

Un hecho sorprendente es que las fases líquidas de la mayor parte de los metales son muy similares en sus propiedades, aún cuando estas pueden ser bastante diferentes en el estado sólido. Los metales pueden combinarse de diferente manera para formar una aleación, pero los componentes de la aleación generalmente son solubles en estado líquido, sin embargo, en estado sólido estos pueden formar soluciones sólidas, compuestos o mezclas mecánicas.

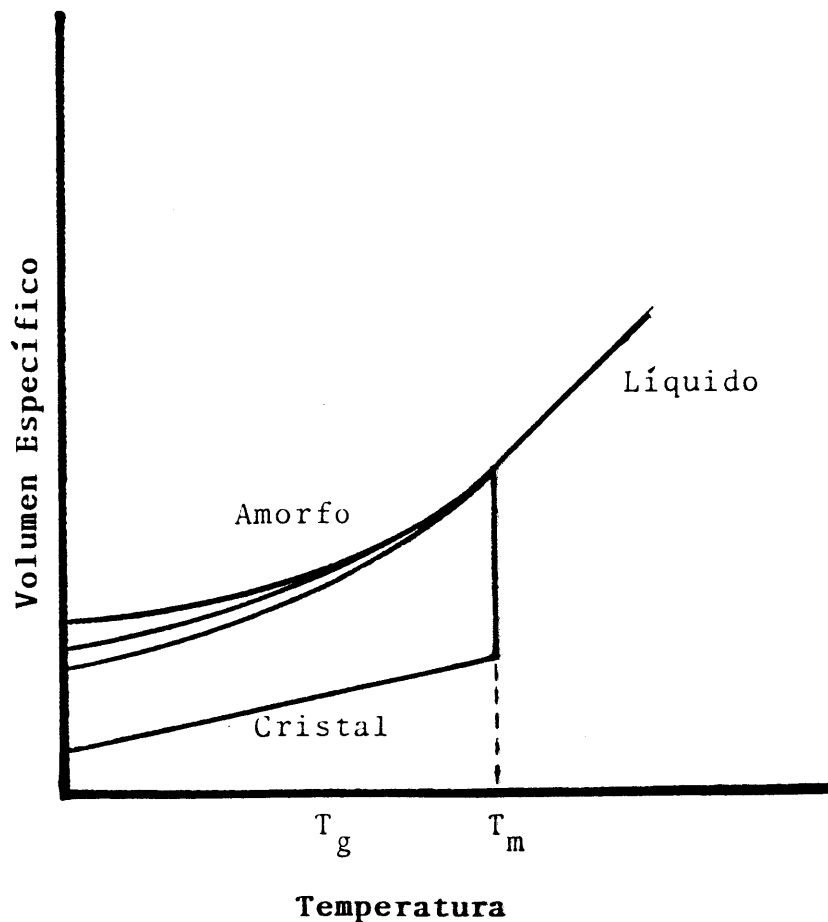
Las soluciones sólidas pueden ser sustitucionales o intersticiales, dependiendo de la posición que ocupen los átomos de soluto en la red cristalina. Por consiguiente, la solubilidad de un elemento en otro, está controlado por la relación de diámetros entre los átomos de solventes y soluto, por la electronegatividad relativa entre los átomos de uno y otro y por la valencia relativa entre átomos de solvente y soluto [14]. En general, la dureza y la resistencia de la solución sólida son mayores que la del solvente sólo.

Compuestos formados entre metales y no metales son comunes y bien conocidos para todo aquel que esté familiarizado con los fundamentos de la química. Ejemplo de esto son la sal, el óxido de fierro y la sílice, quienes tienen carácter no metálico. Por otra parte, compuestos formados entre dos metales y entre metal y metaloide, poseen características metálicas como lo son su gran dureza y fragilidad.

Frecuentemente entre dos soluciones sólidas se presenta una fase intermedia, la cual tiene estructuras cristalográficas diferentes a las otras, y cuya composición puede variar sobre ciertos límites. Algunas veces, fases intermedias existen sobre un intervalo minúsculo de composición, en cuyo caso se llaman compuestos intermetálicos [41]. Estos difieren en forma notable de los compuestos químicos ordinarios, por su aparente violación a las reglas de valencia, como por ejemplo el cobre, el cual aparenta tener valencia de tres cuando se combina con el zinc ( $\text{CuZn}_3$ ), pero en realidad, la estructura de los compuestos intermetálicos está determinada por las reglas de Pauling [14]. Por otra parte, muchos sistemas metálicos presentan endurecimiento por precipitación de alguna fase o compuesto intermetálico, como en el caso del sistema Al-Cu, en donde la fase nueva que aparece, es la solución sólida que está caracterizada por el compuesto  $\text{CuAl}_2$ .

Para las condiciones de solidificación normalmente empleadas, los metales son sólidos cristalinos, pero recientemente, el enfriamiento rápido de aleaciones líquidas está adquiriendo importancia ya que produce sólidos no cristalinos, esto es metales amorfos [42]. Un líquido se convierte en vidrio si su viscosidad excede de aproximadamente  $10^{13}$  poises, pues los átomos ya no pueden moverse. La figura siguiente muestra la disminución del volumen específico al enfriar un metal líquido. Si no se le da tiempo para que se formen núcleos cristalinos, entonces un estado metaestable [37] (amorfo) aparece por debajo de la temperatura  $T_g$ . Este sólido se contrae al enfriarse en forma análoga a un cristal, pero su volumen específico es mayor, significando que cierto volumen libre ha sido "solidificado", lo cual se pierde durante la relajación del material, la cual ocurre a la temperatura  $T_x = T_g + 20^\circ\text{C}$  y es la temperatura a la cual el metal cristaliza de nuevo.

La solidificación rápida (enfriamiento de  $10^5$   $^{\circ}\text{K}/\text{seg}$ ) se realiza experimentalmente cuando un metal líquido se vacía sobre un disco frío que rota a varios miles de revoluciones por minuto, y se forma una delgada banda amorfa (de 50 micras de espesor) [24]. Además se pueden obtener superficies amorfas sobre un metal masivo, mediante el empleo de un haz de electrones o un laser, en donde la extracción rápida de calor se hace a través del mismo metal. Como solo ciertas aleaciones y no los metales puros se pueden transformar en metales amorfos, se necesitan las funciones de distribución radial de cada uno de los componentes de la aleación. Los resultados muestran que aún en el estado amorfo existe cierto ordenamiento de corto alcance en ciertas regiones.



COMPARACION CUALITATIVA DE LAS PROPIEDADES ENTRE METALES AMORFOS Y CRISTALINOS, AL VARIAR LA TEMPERATURA.



La más importante pregunta en la metalurgia física de amorfos, es la de que aleaciones se pueden llevar al estado amorfo. Varias clases de tales aleaciones se pueden distinguir:

- a)  $T_8M_{20}$  - materiales amorfos a base de 80% de un metal de transición (Fe,Co,Ni,Pd) y 20% de un metaloide (B,C,Si,P) por ejemplo  $Fe_{40}Ni_{40}B_{20}$ ,  $Pd_{80}Si_{20}$ .
- b)  $T_1T_2$  - amorfos con metales de transición del final (Fe,Co,Ni) y metales de transición del principio (Ti,Zr,Nb), por ejemplo tenemos  $Ni_{60}Nb_{40}$ ,  $CuZr$ .
- c) AB - materiales amorfos entre Mg, Ca,..... por un lado y Al, Zn, Cu,..... por el otro lado, como en  $Mg_{70}Zn_{30}$ .

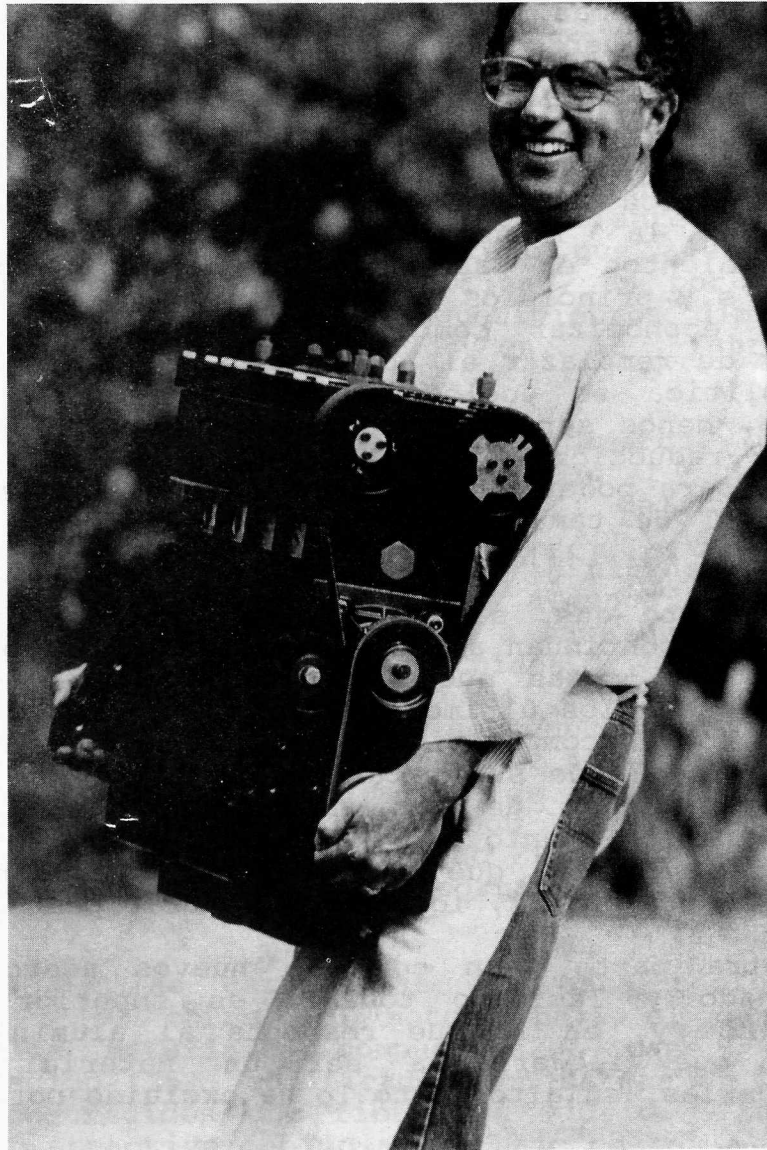
Por otra parte, se están haciendo modelos teóricos para relacionar la habilidad de sistemas binarios y ternarios de metales para formar aleaciones amorfas a partir de funciones y datos termodinámicos [36].

El porqué la fácil formación de fases amorfas aparece cuando la relación entre metal de transición y metaloide es de 4:1 ha sido señalado por Polk [8]; él supone un compactamiento denso aleatorio de los átomos del metal de transición y clasifica los orificios dejados en esta estructura de acuerdo a su tamaño y frecuencia. Los tres tipos de intersticios grandes miden entre 71 y 82% del diámetro del átomo de transición y su frecuencia es 1/4 de la de éstos; entonces, si se llenan estos agujeros con metaloides, se encuentra el porqué de esta particular estequiometría en las aleaciones amorfas TM (elemento de transición y metaloide).

Además de estos argumentos para la habilidad de formar amorfos, existen los electrónicos, dados por las reglas de Hume-Rothery [6]. El volumen libre de los metales amorfos es un factor esencial en las propiedades de éstos, como son la excelente ductilidad que presentan a grandes esfuerzos.

El campo de la solidificación rápida es prácticamente nuevo, por lo que muchos sistemas metálicos están todavía sin estudiar.

## V APLICACIONES



MOTOR EXPERIMENTAL, FABRICADO A BASE DE ALEACIONES LIGERAS Y MATERIALES COMPUESTOS DE POLIMEROS Y CERAMICOS.

## V APLICACIONES

El decir que materiales se deben emplear en el sector transportes, es algo bastante difícil y complejo, que involucra factores como rendimiento, flexibilidad en diseño, costo, reducción de peso, ensamblaje, reciclabilidad y reparabilidad. Por otra parte, todos estos factores varían de componente a componente, y estos a su vez, de modelo a modelo. Además, la prioridad de un factor sobre otro, fluctúa de acuerdo a los cambios y estrategias de mercado.

### V.1 AUTOMOVILES

Estos cambios en las condiciones de mercado, son responsables de que la industria automotriz haya alterado los requerimientos en las carrocerías. Por ejemplo, a fines de los 70's y principios de los 80's, la reducción de peso para lograr economizar combustible, era el mayor factor para tratar de remplazar el acero por polímeros. En esta década, la política es ecológica; mientras menos combustibles se quemem, menos serán los contaminantes emitidos, de tal forma que la reducción de peso ha vuelto a tener importancia. De hecho, para poder cumplir con los requerimientos de 1994, el automóvil de tamaño mediano tendrá que ser aligerado entre 250 y 375 kg. [27]

Es por esto que, a pesar de una serie de obstáculos, los polímeros continúan avanzando hacia su empleo en carrocerías. Una de las cosas que han detenido la penetración de los polímeros en los últimos años es el hecho de que el acero se ha vuelto más competitivo de lo que se esperaba. Esto se debe a que, además de sus naturales ventajas, se han solucionado los problemas de corrosión en puertas por doble galvanización, junto con el advenimiento de nuevos aceros de alta resistencia, que han permitido reducir el espesor de lámina hasta un 25%, lográndose reducir peso y costo.

Por otra parte, aun con los nuevos aceros, el costo de maquinado y laminado todavía es superior al de ciertos polímeros y, en lo que respecta al aluminio, del cual se pensó que llegaría a ser un material muy usado en carrocerías, su alto costo lo ha excluido por el momento.

El problema más serio durante un proceso de ensamblaje de carrocerías, es que ésta se sujeta al marco del vehículo y se transfiere a un baño electrolítico después del cual se hornea a temperaturas de 175 a 200 °C, para luego pasar a la estación de pintado. El encontrar polímeros que puedan soportar las temperaturas de horneado, es algo difícil, ya

que los termoplásticos presentan coeficientes de dilatación térmica [4] mucho más grandes que el acero, por lo que durante el horneado deben de tener espacio suficiente para no interferir con las partes vecinas y estar sujetos al marco de tal forma que no se produzcan agrietamientos.

Por lo general, los guardafangos [30] son la parte de la carrocería en la que los polímeros han tenido una mayor penetración. Esto se debe a que los guardafangos tienen un papel más que nada decorativo, ya que según los fabricantes de automóviles, se puede cambiar toda la apariencia del vehículo simplemente cambiando los guardafangos, y el medio más simple de hacerlo es con polímeros.

Uno de los materiales que presenta suficiente resistencia al calor es el nylon; aunque su coeficiente de dilatación térmica es grande, se ha encontrado que aleándolo con un material amorfo como el polipropileno, da por resultado un material que cumple con los requerimientos dimensionales y mecánicos para ser empleado en la fabricación de guardafangos.

También se están probando ciertos elastómeros, los cuales se mezclan con fibras de vidrio para mejorar sus propiedades mecánicas y aumentar su resistencia al calor [33]. Otros materiales que están siendo probados, son las aleaciones de policarbonato-acrilonitrilo con estireno para los guardafangos del Honda CRX, algunos polipropilenos modificados en Europa y aleaciones a base de elastómeros con polipropileno en los Estados Unidos. El problema que presentan todos estos polímeros es el alto costo en relación al acero y al de ciertos materiales compuestos.

Actualmente, para la fabricación de guardafangos se está empleando el proceso de moldeado por inyección de poliureas, tales como las usadas en el Pontiac Fiero y el GM APV, siendo su bajo costo el factor más importante por el cual se han empleado.

Otra parte de las carrocerías que está recibiendo mucha atención, es el cofre del motor, para el cual se están probando los materiales compuestos a base de poliéster termoendurecido [35], modificados con cargas de carbonato de calcio y endurecidos con fibras de vidrio. Este material resulta ser atractivo debido a su bajo costo, alta tenacidad junto con una reducción de peso de aproximadamente un 30% con relación al acero.

En cuanto a las puertas se refiere, estas representan un verdadero reto a vencer para los polímeros [19], ya que como las puertas deben ajustar en un espacio bien definido, las tolerancias dimensionales son estrictas y los grandes coeficientes de dilatación térmica de los polímeros ocasionan serios problemas. Concatenado a esto, está el hecho de que

las puertas deben cumplir con propiedades estructurales específicas, tales como una alta resistencia al impacto para el caso de posibles colisiones laterales, y una buena rigidez a la torsión para que el sellado al momento de cerrar sea bueno. Hasta el momento, una de las pocas aplicaciones en la fabricación de puertas está el uso de aleaciones de poliuretano y poliurea, empleadas en las puertas del Fiero.

Finalmente, no se ha tratado de reemplazar el acero de los techos, ya que esta parte presenta una geometría muy simple, en la cual no se obtiene ninguna reducción de costo si se emplean polímeros.

Otro tipo de materiales que están causando gran expectación, son las cerámicas, ya que presentan bajas densidades y buenas propiedades a temperaturas muy altas. Los expertos en este campo son los japoneses, quienes producen anualmente miles de turbocargadores con cerámica [44]. Inicialmente empezaron a incursionar en el campo de las cerámicas, fabricando plumas, tijeras y raquetas, llegando a producir hoy en día, válvulas, turbocargadores, cabezas de motor, etc.

En los Estados Unidos también se están empezando a utilizar los materiales cerámicos para reemplazar al metal por cerámicas ligeras [28]. Una válvula de salida típica, hecha de acero inoxidable, tiene un peso aproximado de 100 g. mientras que la misma pieza en nitruro de silicio o en carburo de silicio, es de 50 a 60% más ligera. Por otra parte, se producen perturbaciones cuando el resorte de la válvula no es capaz de hacer que ésta siga al árbol de levas. Se han hecho pruebas y se ha encontrado que a partir de 5000 rpm las válvulas fabricadas de acero, ya no son capaces de seguir a la leva, mientras que la válvula cerámica presenta el mismo comportamiento hasta las 6000 rpm [28].

El menor peso de la válvula cerámica ocasiona que la carga sea reducida también y por lo tanto, menos esfuerzo se aplica sobre el árbol de levas. Esto permite emplear otros materiales menos costosos, además de que se incrementa la vida útil de las piezas. También, al reducir de peso las válvulas y otros componentes, se reducen las cargas y la inercia, por lo que los factores de fricción se reducen considerablemente, haciendo al motor más eficiente.

No sería raro que los próximos motores de combustión interna no sean parecidos a los actuales, ya que serán mucho más ligeros, más eficientes y no necesitarán de sistemas de enfriamiento con agua.

Para concluir, en lo referente a metales, se han hecho esfuerzos para reemplazar al acero por aleaciones a base de aluminio [25], cobre y magnesio, siendo este último, el que ha presentado más problemas, debido a su baja resistencia a la corrosión. El cobre se está empleando para fabricar

rodamientos porosos que se autolubriquen, con el objeto de reducir o eliminar baleros, los cuales son caros y pesados. Por su parte, el aluminio se emplea en partes y piezas estructurales, cuando lo que se busca es ligereza y buenas propiedades mecánicas. En cuanto al magnesio, se han mejorado considerablemente las aleaciones de éste, mediante la reducción de elementos como Ni, Fe, Cu, a porcentajes muy bajos. Tal es el caso de la aleación AZ91PH [31], la cual ha sido empleada para la fabricación de cajas de velocidades de los vehículos Ford Ranger y Bronco II.

Pero actualmente, las esperanzas para las aleaciones de magnesio están depositadas en los procesos de solidificación rápida, mediante los cuales se está tratando de mejorar las propiedades mecánicas de las aleaciones de magnesio y por sobre todo su ductilidad.

Se espera que en poco tiempo se hayan logrado desarrollar aleaciones de Mg-Li [23] de muy bajas densidades y buenas ductilidades. Para que al reforzarlas con fibras cerámicas, puedan emplearse en la fabricación de partes estructurales de vehículos automotrices [32].

Evidentemente, todas las mejoras que se han mencionado en los automóviles, tienen repercusiones en todos los demás vehículos, ya sea para uso agrícola, de carga, de construcción, etc.

## V.2 AVIONES

Los requerimientos operacionales de las naves aéreas son considerables, ya que van desde aviones comerciales subsónicos, hasta cazas de combate que logran alcanzar varias veces la velocidad del sonido, por lo que su configuración estructural varía enormemente.

Normalmente, el 25% del peso de un avión corresponde a la estructura o armazón, cuya función principal es la de soportar los esfuerzos resultantes de las maniobras en vuelo y de los despegues y aterrizajes. La estructura está constituida por componentes primarios y secundarios [26]. El componente primario (alas) es importante en las operaciones de vuelo y puede ser crítico durante éste; el componente secundario, tal como los alerones, no está sometido a esfuerzos considerables, por lo que no es crítico en condiciones de vuelo.

Actualmente, el aluminio es el metal que más ampliamente se ha utilizado en la fabricación de estructuras para avión, aunque ciertos metales se emplean para casos específicos, como el acero, el cual se emplea en los trenes de aterrizaje

y el titanio, el cual se emplea en miembros que estén sometidos a tremendos esfuerzos o que tengan que operar a temperaturas altas, como en el caso de ciertas partes de las turbinas [34].

Un campo que está siendo desarrollado considerablemente, es el referente a aleaciones de aluminio para emplearse a muy altas temperaturas, estas aleaciones deben de tener temperaturas de operación de unos 370 °C, y presentar una buena resistencia y tenacidad a exposiciones prolongadas a estas temperaturas, para que puedan reemplazar en algunas aplicaciones a las aleaciones de titánio.

Por el momento, los motores de jets emplean superaleaciones a base de níquel [22], las cuales se emplean en secciones donde las temperaturas son extremas, como es el caso de turbinas y combustores. En el caso de componentes de motor que se sometan a menores temperaturas, los metales empleados son por lo general titanio, acero y níquel.

El problema que presentan las superaleaciones de níquel, es la dificultad de conformado que aparece en la fabricación, así como las condiciones de operación, las cuales están por alcanzar las temperaturas permisibles de trabajo para estas aleaciones [26].

Nuevas investigaciones están tratando de desarrollar materiales capaces de operar a temperaturas de 1540 °C; para esto se están estudiando aleaciones a base de metales refractarios, intermetálicos y combinaciones entre metales e intermetálicos [41]. Por otra parte, las cerámicas tienen gran potencial en aplicaciones para propulsión aeroespacial, debido a su relativamente baja densidad, alta resistencia, alto punto de fusión y estabilidad química.

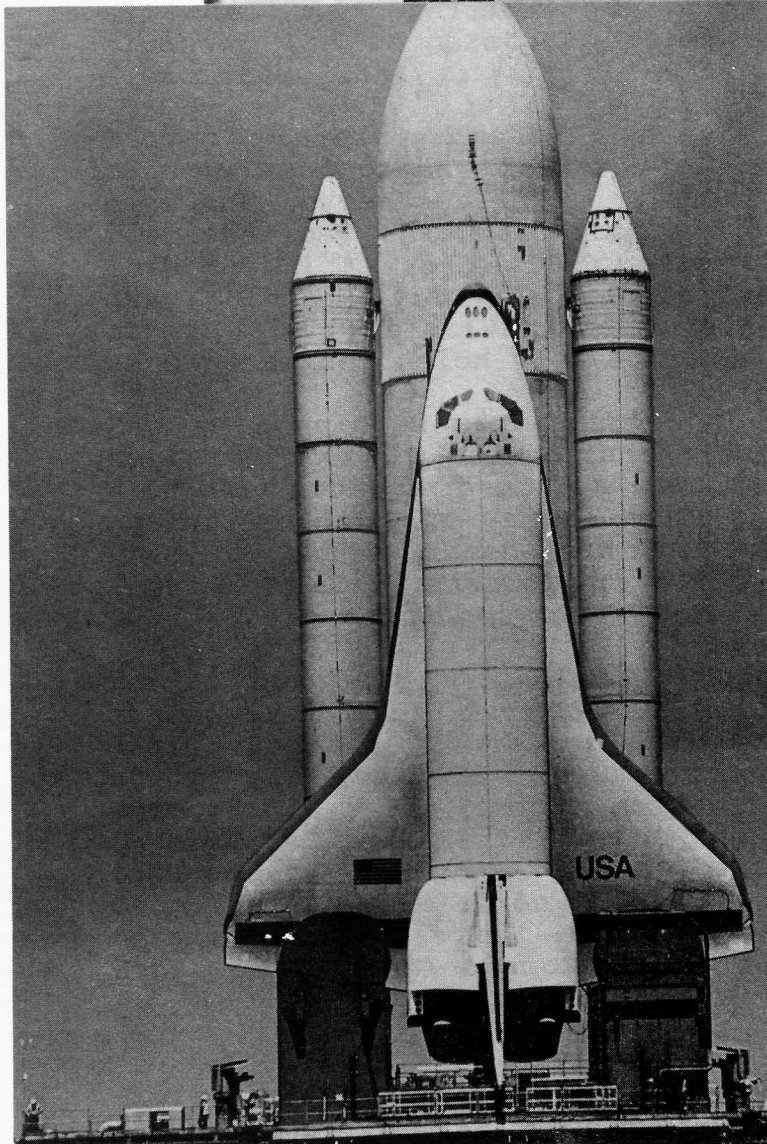
En la tecnología aeroespacial los problemas de distribución de temperatura y transferencia de calor son críticos, debido a limitaciones de peso y a condiciones de seguridad. Por este motivo, el berilio es uno de los prospectos a futuro, ya que presenta una baja densidad (casi igual al magnesio), un alto módulo de elasticidad y un muy alto punto de fusión, además de una buena conductividad térmica.

Por otra parte, cuando se funden ciertas cerámicas, se suministra calor durante el cambio de gases, de sólido a líquido, debido al calor latente. Durante el reingreso a la atmósfera terrestre de vehículos espaciales a altas velocidades, la gran cantidad de calor generado en la superficie por la fricción con el aire se disipa muy rápidamente mediante un proceso de transferencia de calor conocido como ablación [15], en el cual parte del material cerámico expuesto al aire caliente se funde o se evapora. Este efecto ha sido ampliamente utilizado en el transbordador

espacial americano, protegiéndose de esta forma su estructura.

Por último, en lo que respecta al empleo de materiales compuestos a base de polímeros [19], estos se han usado principalmente en recubrimientos de ciertas partes del fuselaje, en puertas y cubiertas. En lo que respecta a avionetas ligeras, ya existen en el mercado muchas de éstas fabricadas a base de resina epóxicas reforzadas con fibras de vidrio y fibras de carbón. Recientemente, la compañía Beech Aircraft Corporation ha empezado a producir pequeños jets, hechos enteramente a base de resinas epóxicas y fibras de carbón [43]. Dichos aviones son más lentos que los normales, pero presentan la ventaja de ser más amplios y de consumir menos combustible que sus competidores.



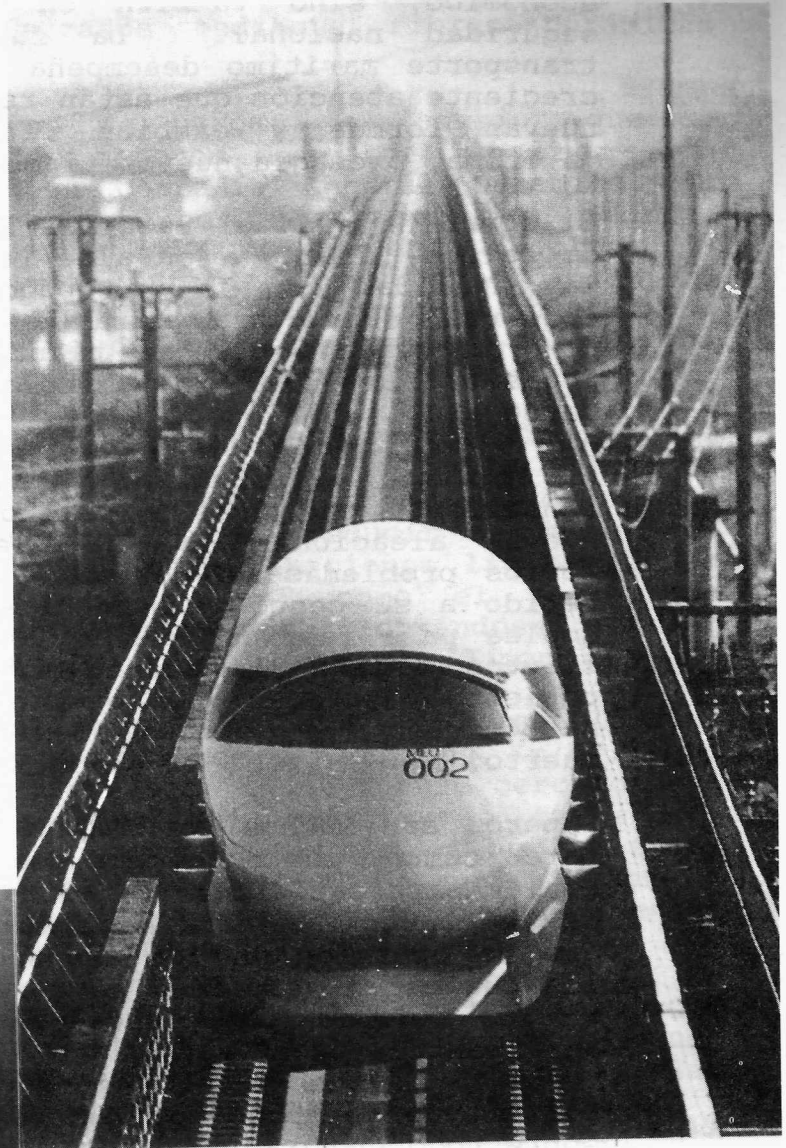


JETS PEQUEÑOS FABRICADOS A BASE DE RESINAS EPOXICAS REFORZADAS -- CON FIBRA DE CARBON.

TRANSBORDADOR ESPACIAL, EJEMPLO DEL EMPLEO DE TODO TIPO DE MATERIALES.

### V.3 BARCOS Y TRENES

TREN LEVITADO MAGNETI-  
CAMENTE, EL CUAL ALCAN-  
ZA VELOCIDADES DE  
500 Km/h Y ESTA FABRI-  
CADO CON RESINAS DE --  
POLIMEROS.



BARCO TRANSOCEANICO, CAPAZ DE VIAJAR  
A MAYORES VELOCIDADES, GRACIAS A LA  
REDUCCION DE PESO Y AL EMPLEO DE  
PLANCHAS MAS DELGADAS CON NUEVOS  
ACEROS

## BARCOS Y TRENES

Al hablar de los diversos modos de transporte, sobran ejemplos de que olvidarse de los barcos y de la transportación marítima, resulta muy caro no sólo en lo económico, sino también en el aspecto de relaciones y seguridad nacional. La función que los barcos y el transporte marítimo desempeña en nuestra sociedad revela la creciente atención que están recibiendo. La investigación de nuevas formas y cambios radicales en la transportación marítima, presagia nuevos tipos de barcos.

El acero ha sido el material de mayor uso en la fabricación de barcos, debido a su alta resistencia mecánica así como a la facilidad con la que pueden soldarse piezas a fin de construir estructuras para barcos de enorme calado, dado que el gran tamaño de las planchas reduce el tiempo que se necesita para unir y soldar cada una de las secciones del casco [20].

El aluminio ha adquirido popularidad como material de alto rendimiento en yates y veleros, gracias al surgimiento de nuevas aleaciones que han reducido considerablemente los serios problemas de corrosión del aluminio en agua salada. Debido a su costo y a lo laborioso que es soldarlo, no se emplea para fabricar cascos de barcos grandes, sin embargo, ciertos buques de guerra emplean aleaciones de aluminio en cubierta y paredes que no estén sujetas a grandes esfuerzos, haciéndolos más veloces, maniobrables y con mayor tonelaje muerto.

Empero, son muchos los ingenieros que consideran que ningún barco común, por mucho que sea su potencial será lo bastante rápido para satisfacer las demandas del futuro. La velocidad de los barcos en alta mar, no ha aumentado en la proporción que ha ocurrido en los transportes terrestres y aéreos, en los cuales la velocidad ha aumentado por lo menos diez veces en los modelos comerciales, mientras que en los barcos sólo ha aumentado tres veces.

Dos nuevas versiones de barcos ofrecen soluciones parciales, sobre todo en lo que respecta a transportación trans-oceánica de pasajeros: la hidroala (hidrofoil) y la sustentación por colchón de aire (SCA) [21].

Uno de los problemas que frenan el desarrollo de las hidroalas es el fenómeno llamado cavitación, y que se presenta cuando un ala u hoja se mueve en el agua entre los 50 y 60 nudos, (de 90 a 100 Km/h) la presión en la capa superior se reduce tanto que el agua hierve, lo cual corroe y desgasta muy rápidamente el metal. Se están haciendo pruebas con resinas de poliéster reforzadas con fibras de vidrio y resinas epóxicas reforzadas con fibras de carbón para

reemplazar al metal del ala cavitadora, esperándose con esto poder alcanzar velocidades de 100 nudos (185 Km/h) o más [17].

En cuanto a la SCA, la solución está en reducir el peso lo más que sea posible, para lo cual se fabrica el armazón de la nave a base de aluminio y el casco con resinas epóxicas y polímeros fenólicos reforzados mediante fibras cerámicas [17].

En lo referente a barcos de carga, los cambios que se presentarán estarán en los motores de estos, ya que según estudios realizados por la compañía General Dynamics, la sustitución de piezas metálicas por piezas cerámicas podría, por el descenso del costo y el aumento en la eficiencia producida, hacer que el motor Stirling se convierta en la fuente de locomoción de estos buques, abriendo la posibilidad al empleo de nuevas fuentes de energía como son el carbón, metanol y compuestos alternos a los hidrocarburos.

Finalmente, lo que respecta a transportes ferroviarios, el campo en donde los nuevos materiales están abriendo expectativas nuevas, es el referente a trenes ligeros para pasajeros. En estos, se ha buscado reducir al máximo el peso, para lo cual se han empleado aleaciones ligeras en la estructura y en la carrocería, así como el empleo de polímeros en paneles y separaciones, lográndose obtener velocidades de 300 Km/hr. Por otra parte, en Japón [43] se están probando trenes levitados magnéticamente, los cuales están hechos a base de polímeros compuestos [18], con lo cual se obtendrán velocidades superiores a los 500 Km/hr. De lograrse todo esto, la urbanización en un futuro cercano será radicalmente distinta, ya que los centros de trabajo y producción podrán estar a cientos de kilómetros de los focos urbanos, sin que esto represente pérdida de horas hombre y sobre todo, evitando peligros por contaminación o accidentes industriales en las zonas habitadas.

No sería raro que la maquinaria y los transportes del Siglo XXI, empleen tal cantidad de materiales nuevos, como superaleaciones, cerámicas plásticas y materiales extraligeros, que probablemente se podrán usar motores y procesos distintos con fuentes alternas de energía. Con esto se logrará aumentar la eficiencia y disminuir la contaminación a tal grado, que las condiciones de vida de las generaciones futuras se verán mejoradas considerablemente.

## REFERENCIAS

- 1) R. W. Hertzberg: Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials; John Wiley, 1989.
- 2) C.R. Barret, W.D. Nix y A.S. Tetelman: The Principles of Engineering Materials; Prentice Hall, 1973.
- 3) L.H. Van Vlack: Materials Science for Engineers; Addison Wesley, 1970.
- 4) H.W. Pollack: Materials Science and Metallurgy; Reston Publishing, 1980.
- 5) A.J. Dekker: Solid State Physics; MacMillan, 1981.
- 6) P. Haasen: Physical Metallurgy; Cambridge University Press, 1986.
- 7) P.W. Atkins: Molecular Quantum Mechanics; Claredon Press, 1970.
- 8) D. Polk: "Acta Metalúrgica"., Vol. 20 (1972).
- 9) F. Seitz: Modern Teory of Solids; McGraw-Hill, 1966.
- 10) W.D. Kingery: Introduction to Ceramics; John Wiley, 1960.
- 11) C.C. Winding G.D. Hyatt; Polymmeric Materials; McGraw-Hill, 1961.
- 12) P. Meares: Polymers, Structure and Bulk Properties; Van Nostrand, 1965.
- 13) J.D. Roberts and M.C. Caserio: Basic Principles of Organic Chemistry; W.A. Benjamin, 1977.
- 14) W.J. Moore: Physical Chemistry; Prentice Hall, 1972.
- 15) W.H. McAdams: Heat Transmission; McGraw-Hill, 1974.
- 16) R.W. Grimshaw: The Chemistry and Physics of Clays; Ernest Benn Ltd. 1971.
- 17) "Technology Review", Edited at the MIT, Vol. 85 No. 2; Febrero/marzo, 1982.
- 18) Simón Coner and Terry P. Oriando; "Technology Review", febrero/marzo 1988, Vol. 91 No. 2.
- 19) S.J. Shaw; "Materials, Science and Technology"., Agosto Vol. 3, 1987.

- 20) E. Baker: Introduction to Steel Shipbuilding; McGraw-Hill, 1963.
- 21) J.H. Ladege: Modern Ships; Cornell Maritime Press, 1975.
- 22) M.F. Ronald; "Advance Materials and Processes", No. 5, 1989.
- 23) P.J. Mascher and J.E. O'Neal; "Met. Trans., A", Vol. 15 enero, 1984.
- 24) H. Jones and F. Hehmann; "J., Materials Science", No. 19 184.
- 25) R.S. Kaneko et al.; "Journal of Materials", mayo 1990.
- 26) J.J. De Luccia et al.; "Advance Materials and Processes", No. 5, 1989.
- 27) M.O'Malley; "Journal of Materials", enero 1990.
- 28) R.R. Wills y R.E. Southam; "Journal of Ceramics Society" .72 (7), 1989.
- 29) A.G. Evans; "Journal American Ceramics Society", 73 [2], 1990
- 30) J. Kretschmer; "Materials Science and Technology", septiembre 1988.
- 31) W.E. Frazier et al.; "Journal of Materials", Mayo 1989.
- 32) C.M. friend; "Materials Science and Technology" Enero, Vol. 5, 1989.
- 33) R.P. Campion; "Materials Science and Technology", Marzo, Vol. 5, 1989.
- 34) J. Wadsworth y F.H. Froes; "Journal of Materials", Mayo 1989.
- 35) N.P. Chermisinoff; "Journal of Materials", Enero 1990.
- 36) N. Saunders y A.P. Miodownik; "Materials Science and Technology", Septiembre 1980.
- 37) M.G. Ascott; "Met. Tech.", Abril 1980.
- 38) T.W. Chou y J.R. Winson: Composite Materials and their Use in Structures; John Wiley, 1975.
- 39) D.R. Askeland: La Ciencia e Ingeniería de los Materiales Grupo Editorial Iberoamérica, 1985.

- 40) J. Dieter: Mechanical Metallurgy; McGraw-Hill, 1983.
- 41) F.H. Froes: "Journal of Materials", Septiembre 1989.
- 42) H. Jones: Rapid Solidification of Metals and Alloys;  
Inst. of Metallurgist, London 1982.
- 43) Tomas y Canby; "National Geographic", Vol. 176, No. 6  
Dic. 1989.
- 44) "Machine Design", Penton Publishing Inc. Febrero 9, 1989.