

63  
2ej



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

Facultad de Estudios Superiores  
CUAUTITLAN

## EFECTO DE LA TEMPERATURA EN UN MATERIAL COMPUESTO

$Cu - Al_2 O_3$

T E S I S

Que para obtener el título de:  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

p r e s e n t a

JOAQUIN DEL PRADO VILLASANA

Asesor: M. I. HECTOR E. CURIEL REYNA

Cuautitlán Izcalli, Edo. de Méx.

1999

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

27 0166



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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.

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN  
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR  
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

U. N. A. M.  
FACULTAD DE ESTUDIOS  
SUPERIORES-CUAUTITLAN  
ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS



DEPARTAMENTO DE  
EXAMENES PROFESIONALES

DR. JUAN ANTONIO MONTARAZ CRESPO  
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLAN  
P R E S E N T E

ATN: Q. Ma. del Carmen García Mijares  
Jefe del Departamento de Exámenes  
Profesionales de la FES Cuautitlán

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la TESIS:

"Efecto de la temperatura en un material compuesto

Cu - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>"

que presenta el pasante: Joaquin Del Prado Villasana  
con número de cuenta: 9041363-4 para obtener el TITULO de:  
Ingeniero Mecánico Electricista

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutida en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO

A T E N T A M E N T E.

"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"

Cuautitlán Izcalli, Edo. de Méx., a 28 de octubre de 1998

PRESIDENTE	<u>M.I. Tomas Rangel Ortiz</u>	
VOCAL	<u>Ing. Jose Juan Contreras Espinosa</u>	
SECRETARIO	<u>M.I. Hector E. Curiel Reyna</u>	
PRIMER SUPLENTE	<u>Ing. Sergio de Moraes Benitez</u>	
SEGUNDO SUPLENTE	<u>Ing. Jesus Garcia Lira</u>	

## *Agradecimientos*

*Este trabajo representa una parte muy importante de mi vida la cual no sería posible gracias a mis padres Gloria Paulina Villasana Ortiz y Joaquín Del Prado Romero, que con dedicación, esfuerzo y cariño siempre conté con ellos para todo; a ellos dedico este trabajo con muchísimo cariño Gracias por siempre.*

*A mis hermanos Paulina, Isaac y Miguel por creer en mí, su apoyo y su cariño.*

*A mi novia Flor Velarde Contreras por todo su apoyo y cariño.*

*A mi abuelita, mi tía Marce, Felipe y sus hijos Guadalupe, Felipe y Leonardo por que cuando necesite de ellos siempre me ofrecieron su apoyo.*

*Al M. en I. Héctor Enrique Curiel Reyna por su tiempo y apoyo no solo para que este trabajo se llevara a cabo sino por toda la ayuda y orientación que siempre esta dispuesto a ofrecer.*

*A mi alma mater, la UNAM la cual con su Facultad de Estudios Superiores Cuautitlan me enseñó el espíritu universitario.*

*A mis compañeros por esa camaradería  
durante mis estudios.*

*A mis profesores.*

*A toda la gente que siempre me ayudó y  
creyó en mí.*

*Gracias a tí Dios.*

# ÍNDICE

	<b>Pág.</b>
<b>CAPÍTULO 1</b>	
<b>RESUMEN</b>	<b>1</b>
<b>INTRODUCCION</b>	<b>3</b>
<b>CAPÍTULO 2</b>	
<b>MATERIALES COMPUESTOS REFORZADOS CON PARTICULAS</b>	<b>8</b>
2.1. Materiales compuestos con partículas grandes	<b>9</b>
2.2. Hormigón	<b>15</b>
2.3 Hormigón armado	<b>17</b>
2.4. Materiales compuestos consolidados por dispersión	<b>20</b>
<b>CAPITULO 3</b>	
<b>MATERIALES COMPUESTOS REFORZADOS CON FIBRAS</b>	<b>22</b>
3.1. Influencia de la longitud de la fibra	<b>23</b>
3.2 Influencia de la orientación y de la concentración de la fibra	<b>27</b>
3.3. Materiales compuestos con fibras discontinuas y alineadas	<b>33</b>

3.4. Materiales compuestos con fibras discontinuas y alineadas al azar	34
3.5. Fase fibrosa	37
3.6 Fase matriz	39

## **CAPITULO 4**

<b>MATERIALES COMPUESTOS ESTRUCTURALES</b>	<b>41</b>
1.1. Materiales compuestos laminares	41
1.2. Paneles sándwich	43

## **CAPITULO 5**

<b>MATERIALES COMPUESTOS REFORZADOS CON PARTICULAS CONSOLIDADOS POR DISPERSION</b>	<b>45</b>
1.1. Endurecimiento por dispersión producido por particulas	46
1.2. Principios de microestructura	48
1.3. Tipos y propiedades	51
1.4. Modos de preparación de materiales compuestos de metal base	53
1.5. Propiedades mecánicas	55
1.6. Endurecimiento por dispersión de partículas en un composito Cu-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .	57

## **CAPITULO 6**

### **PARTE EXPERIMENTAL**

6.1. Introducción	<b>59</b>
6.2 Los materiales compuestos consolidados por dispersión	<b>60</b>
6.3. Objetivo	<b>62</b>
6.4. Análisis de falla por la por la influencia de la temperatura en el composito Cu-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .	<b>63</b>
6.5. Resultados obtenidos	<b>70</b>
6.6. Análisis de resultados	<b>74</b>
6.7. Conclusiones	<b>75</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>78</b>

# CAPITULO 1

## RESUMEN

Los materiales compuestos de Cobre con óxido de Aluminio, han permitido aumentar la vida media de los electrodos o puntas del proceso de soldadura por resistencia. Estos materiales de Cobre con Alúmina, han substituido en gran medida a los materiales de Cobre con Cromo y Circonio.

La presente investigación es el estudio del efecto térmico que se encuentra localizado entre la superficie de contacto entre los electrodos y la superficie de la lámina de las carrocerías de la industria automotriz.

El objetivo de esta investigación es estudiar el efecto térmico asociado a los fenómenos de desgaste del material compuesto de cobre, durante el proceso de soldadura de una lamina revestida con un material anticorrosivo rico en Zinc.

El análisis metalográfico con diferentes aumentos nos permiten observar la presencia de las diferentes morfologías, que el material compuesto tiene antes y después que sufrió los efectos térmicos de la temperatura generada en el proceso de soldadura por resistencia; la dureza también nos permitió obtener datos interesantes de este estudio.

Los resultados obtenidos nos han mostrado que el material compuesto sufre desgaste por diferentes mecanismo, empezando por la presencia de una aleación en el área de contacto del electrodo y posteriormente el material es sensible al fenómeno térmico.

Esto nos permitirá pensar en tomar acciones en diferentes direcciones para proponer modificaciones en cuanto a fabricaciones estructuras y métodos o formas de uso en el proceso de soldadura por resistencia.

## INTRODUCCION

La mayoría de las tecnologías modernas requieren materiales con una combinación inusual de propiedades, imposible de conseguir con los metales, cerámicas y polímeros convencionales. Esta necesidad es evidente en aplicaciones espaciales, subacuáticas y transportes, por ejemplo: los ingenieros aeronáuticos solicitan cada vez más, materiales de baja densidad que sean resistentes al impacto, abrasión, corrosión y altas propiedades mecánicas. Esta combinación de características sería bastante extraordinaria; es más frecuente que los materiales más resistentes sean relativamente densos, además, un incremento en la resistencia y rigidez se traduce generalmente en una disminución en la resistencia al impacto.

Las combinaciones de propiedades de los materiales y la gama de sus valores se han ampliado, y se siguen ampliando, mediante el desarrollo de materiales compuestos (*composites*). En términos generales, se considera que un material compuesto es un material multifase que conserva una proporción

significativa de las propiedades de las fases constituyentes de manera que presente la mejor combinación posible.

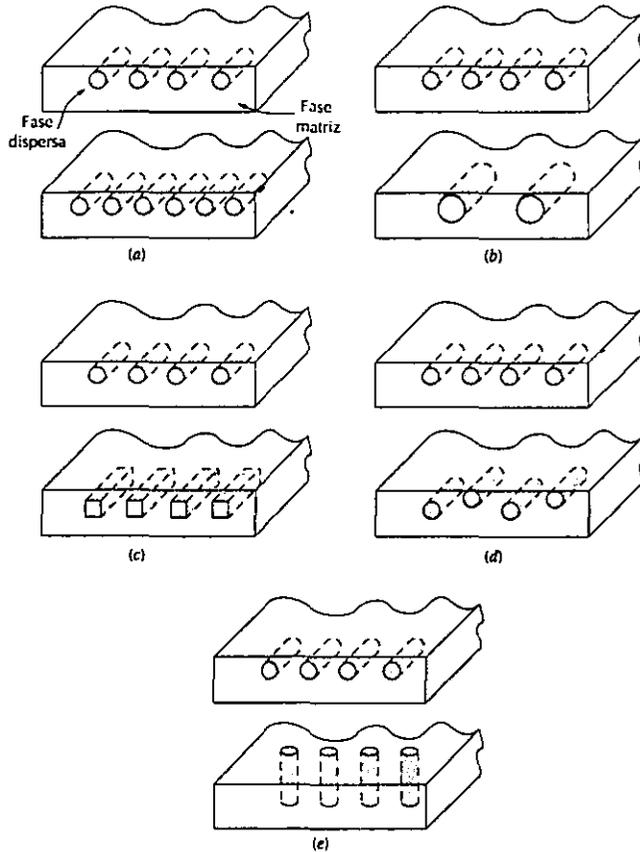
De acuerdo con este **principio de acción combinada**, las mejores propiedades se obtienen por la combinación razonada de dos o mas materiales diferentes. Muchos materiales compuestos tienen propiedades excepcionales.

Existen materiales compuestos naturales, como por ejemplo la madera que consiste en fibras de celulosa flexibles embebidas en un material rígido llamado lignina. El hueso es un material compuesto formado por colágeno, una proteína resistente pero blanda, y por apatito, un mineral frágil.

En el presente contexto, un material compuesto es un material multifase obtenido artificialmente, en oposición a los que se encuentran en la naturaleza. Además, las fases constituyentes deben ser químicamente distintas y separadas por una interfase. Por este motivo, la mayoría de las aleaciones metálicas y muchas cerámicas no encajan con esta definición, ya que sus múltiples fases se forman como consecuencia de fenómenos naturales.

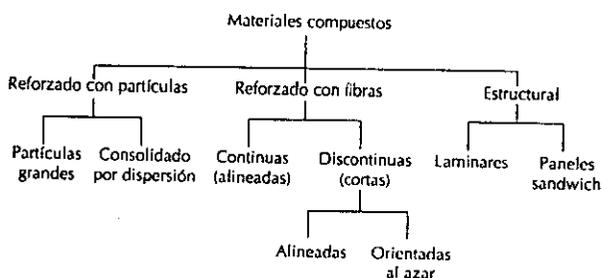
Científicos e ingenieros a la hora de diseñar materiales compuestos han combinado ciertos metales, cerámicas y polímeros para producir una nueva generación de materiales extraordinarios. La mayoría de los materiales compuestos se han creado para mejorar la combinación de propiedades mecánicas tales como rigidez, tenacidad y resistencia a la tracción a temperatura ambiente y a elevadas temperaturas.

La mayor parte de los materiales compuestos están formados por dos fases; una, llamada **matriz**, es continua y rodea a otra fase denominada **fase dispersa**. Las propiedades de los compuestos son función de propiedades de la fase de constituyentes de sus proporciones relativas y de la geometría de las fases dispersas. “Geometría de la fase dispersa” significa, en este contexto, la forma, el tamaño, la distribución y la orientación de las partículas; estas características están representadas en la figura 1.1.



**Figura 1.1.** Representaciones esquemáticas de varias características geométricas y espaciales de partículas de fase dispersa que repercuten en las propiedades de los materiales compuestos: (a) concentración, (b) tamaño, (c) forma, (d) distribución, (e) orientación.

La figura 1.2 muestra un esquema simple para clasificar los materiales compuestos que, en esencia, consta de tres divisiones: compuestos reforzados con partículas, compuestos reforzados con fibras y compuestos estructurales; además, existen dos subdivisiones para cada una. Las partículas de la fase dispersa de los materiales compuestos reforzados con partículas son equiaxiales (es decir, las dimensiones de las partículas son aproximadamente iguales en todas las direcciones); la fase dispersa de los materiales compuestos reforzados con fibras tiene la geometría de una fibra (es decir, una relación longitud-diámetro muy alta). Los materiales compuestos estructurales son materiales compuestos combinados con materiales homogéneos. El resto de los temas de este capítulo se tratarán según el esquema de clasificación.



**Figura 1.2.** Clasificación de los materiales compuestos

## CAPITULO 2

### MATERIALES COMPUESTOS REFORZADOS CON PARTÍCULAS

Los materiales compuestos reforzados con partículas se subdividen en **reforzados con partículas grandes y consolidados por dispersión.**

Esta distinción se fundamenta en el mecanismo de consolidación o de reforzamiento. El término “grande” se utiliza para indicar que las interacciones matriz-partícula no se pueden describir a nivel atómico o molecular, sino mediante la mecánica continua. En la mayoría de los materiales compuestos la fase dispersa es más dura y resistente que la matriz y las partículas de refuerzo tienden a restringir el movimiento de la matriz en las proximidades de cada partícula. En esencia, la matriz transfiere parte del esfuerzo aplicado a las partículas, las cuales soportan una parte de la carga. El grado de reforzamiento o de mejora del comportamiento mecánico depende de la fuerza de cohesión en la intercara matriz-partícula.

Las partículas de los materiales compuestos consolidados por dispersión normalmente son mucho más pequeñas: los diámetros tienen de 10 a 100 nm. Las interacciones matriz-partícula que conducen a las consolidaciones ocurren a nivel atómico o molecular. El mecanismo de la consolidación es similar al del endurecimiento por precipitación.

Mientras en la matriz soporta la mayor parte de la carga aplicada, las pequeñas partículas dispersas dificultan o impiden el desplazamiento de dislocaciones. De este modo se restringe la deformación plástica de tal manera que aumenta el límite elástico, la resistencia a la tracción y la dureza.

## **2.1 MATERIALES COMPUESTOS CON PARTICULAS GRANDES**

Algunos materiales poliméricos a los que se ha añadido un relleno son realmente materiales compuestos con partículas grandes. En este caso, el material de relleno modifica o mejora las propiedades del material base y/o sustituye una parte del volumen del material polimérico por un material, más barato, el relleno.

Un material compuesto con partículas grandes es el hormigón, formado con cemento (matriz) y arena o grava (partículas). El hormigón es el tema de la siguiente discusión.

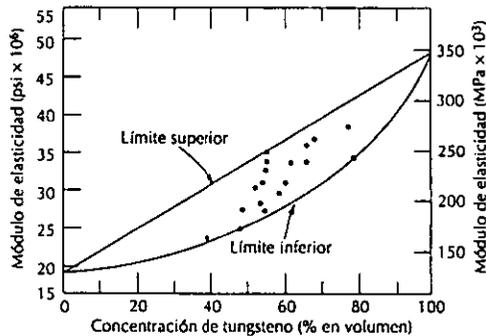
Las partículas pueden tener una gran variedad de geometrías pero suelen presentar aproximadamente la misma dimensión en todas las direcciones (equiaxiales). El reforzamiento es tanto mas efectivo cuanto más pequeñas sean las partículas y cuanto mejor distribuidas estén en la matriz. Además, la fracción de volumen de las dos fases influye en el comportamiento; las propiedades mecánicas aumentan al incrementarse el contenido de partículas. Se formulan dos expresiones matemáticas para relacionar el modulo elástico con la fracción de volumen de las fases constituyentes de un material compuesto de dos fases. Las ecuaciones de la regla de las mezclas predice que el valor del módulo estará comprendido entre un máximo.

$$E_c = E_m V_m + E_p V_p \quad (1)$$

Y un mínimo

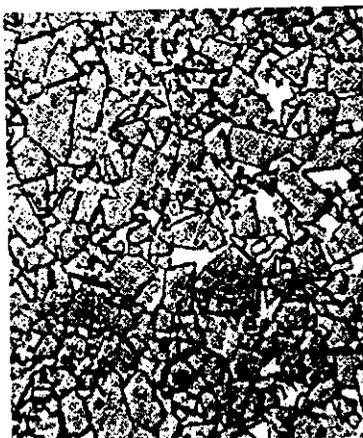
$$E_c = \frac{E_m E_p}{V_m E_p + V_p E_m} \quad (2)$$

En estas expresiones  $E$  y  $V$  representan el módulo elástico y la fracción de volumen, respectivamente, mientras los subíndices  $c$ ,  $m$  y  $p$  significan material compuesto, matriz y fase-partícula, en la figura 3 se representan los valores superior e inferior de  $E_c$  frente a  $V_p$  para un material compuesto formado por partículas de tungsteno dispersas en una matriz de cobre; los valores experimentales están comprendidos entre las dos curvas. Mas adelante se deducen ecuaciones parecidas a las anteriores para compuestos reforzados con fibra.



**Figura 2.1.** Módulo de elasticidad en función del porcentaje de volumen de tungsteno en un material compuesto constituido por partículas dispersas de tungsteno en una matriz de cobre. Límite superior e inferior según las ecuaciones (1) y (2).

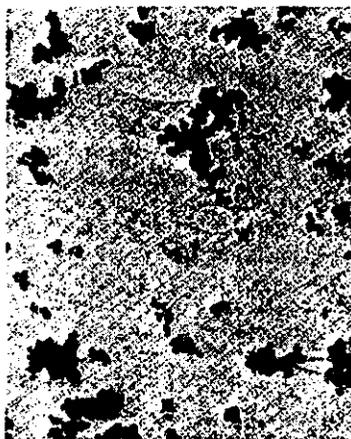
Todos los materiales (metales, polímeros y cerámicas) se utilizan para fabricar materiales compuestos con partículas grandes. Un ejemplo lo constituyen los compuestos metal-cerámica: los cermets. El cermet más común es el carburo cementado, que está constituido por partículas extremadamente duras de carburos refractarios cerámicos, como el carburo de tungsteno (WC) o de titanio (TiC), embebidos en una matriz metálica de cobalto o níquel. Estos compuestos encuentran una gran aplicación como herramientas de corte para aceros endurecidos. Las duras partículas de carburo aportan el efecto cortante a la superficie, pero al ser extremadamente frágiles, ellas solas no soportarían los extraordinarios esfuerzos de corte. La tenacidad se mejora incluyendo estas partículas en una matriz metálica dúctil, que las aísla y previene la propagación de grietas entre partículas. La matriz y las partículas tienen carácter refractario para resistir las altas temperaturas generadas en la acción del corte de materiales extremadamente duros. Ningún material simple es capaz de reunir la combinación de propiedades de los cermets. La fracción de la fase formada por las partículas puede representar más del 90% en volumen de este modo se maximiza la acción abrasiva del compuesto. En la figura 4 se reproduce una fotomicrografía de un carburo cementado WC-Co.



**Figura 2.2.** Fotomicrografía de un carburo cementado WC-Co. Las áreas blancas corresponden a la matriz de cobalto; las regiones oscuras son las partículas de carburo de tungsteno.

Los elastómeros y los plásticos se refuerzan frecuentemente con materiales en forma de partículas. Los usos de los cauchos modernos se verían seriamente restringidos si no estuvieran reforzados con partículas de materiales tales como el negro de humo. El negro de humo consiste en partículas muy pequeñas y esencialmente esféricas de carbono producidas por la combustión incompleta (defecto de aire) de gas natural u otros derivados del petróleo. La adición de este material extremadamente barato al caucho vulcanizado aumenta la tenacidad y las resistencias a la tracción, a la torsión y al desgaste. Los neumáticos para coches contienen del 15 al 30% en volumen

de negro de humo. El efecto reforzante del negro de humo se alcanza utilizando partículas de tamaño relativamente pequeño, con diámetros comprendidos entre 20 y 50 nm, y deben estar uniformemente distribuidas en el caucho y formar una unión fuerte con la matriz. Como partículas de refuerzo se utilizan otros materiales por ejemplo sílice que es menos efectivo por que no se genera la especial interacción partícula-matriz comentada antes. En la figura 5 se muestra una micrografía electrónica de un caucho reforzado con negro de humo.



**Figura 2.3.** Micrografía electrónica mostrando partículas de negro de humo esféricas que actúan reforzando el caucho sintético de un neumático. Las áreas que parecen manchas de agua corresponden a pequeñas burbujas de aire dentro del caucho.

## **2.2. HORMIGON**

El hormigón es un material compuesto con partículas grandes; las fases matriz y dispersa son cerámicas. Debido a que los términos hormigón y cemento se suelen utilizar indistintamente conviene comentar la diferencia existente entre ambos. En sentido amplio, el término hormigón se refiere a un material compuesto formado por un agregado de partículas unidas entre sí mediante cemento. Los dos tipos de hormigón más utilizados son los constituidos por partículas de grava y arena unidas mediante cementos portland o asfáltico. El hormigón asfáltico se suele utilizar para pavimentos, mientras que el hormigón portland se emplea extensamente como material para la construcción de edificios. A continuación se trata este último.

## **2.3. HORMIGON DE CEMENTO PORTLAND**

El cemento portland, un agregado fino (arena), un agregado grueso (grava) y agua son los ingredientes del hormigón de cemento portland. Las partículas agregadas actúan como material de relleno para disminuir el precio total del hormigón ya que son baratas mientras el cemento es relativamente

caro. Los ingredientes se deben añadir en las proporciones correctas para conseguir la óptima resistencia y facilidad de trabajo de un hormigón. El empaquetamiento denso del agregado y el buen contacto de las intercaras se logra con partículas de dos diferentes tamaños; las partículas finas de arena deben ocupar los espacios vacíos entre partículas de grava. Estos agregados de partículas suelen ocupar entre el 60 y el 80% del volumen total. La pasta cemento-agua debe cubrir todas las partículas de arena y de grava después de la mezcla. La unión completa entre el cemento y las partículas de agregado depende de la adición de la cantidad correcta de agua. La deficiencia de agua se traduce en una unión incompleta y el exceso favorece la porosidad; en ambos casos la resistencia final es menor que la óptima.

El carácter de las partículas agregadas de las partículas agregadas es de capital importancia. Por un lado, la distribución de tamaños del agregado influye en la cantidad necesaria de pasta cemento-agua; y, agua por otro, las superficies del agregado deben estar limpias de arcilla y limo, que dificultan la formación de una buena unión en la superficie de las partículas.

El hormigón de cemento portland es el material mas utilizado en la construcción, principalmente porque se puede introducir en encofrado y

endurecer a temperatura ambiente, e incluso sumergido en agua. Sin embargo, como material estructural presenta algunos inconvenientes y limitaciones. Como la mayoría de los materiales cerámicos, el hormigón de cemento portland es relativamente poco resistente y extremadamente frágil; su resistencia a la tracción es 10 a 15 veces menor que su resistencia a la compresión. Por otro lado, las grandes estructuras de hormigón pueden experimentar considerables dilataciones y contracciones térmicas con las fluctuaciones de temperatura. Además, el agua penetra a través de los poros externos y puede provocar grietas durante el tiempo frío como consecuencia de los ciclos congelación-descongelación. La mayoría de estos inconvenientes se eliminan mediante reforzamiento (armadura) o mediante la incorporación de aditivos.

#### **2.4. HORMIGON ARMADO**

La resistencia del hormigón de cemento portland aumenta mediante el reforzado: introducción de tubos, barras, alambres o malla de acero en el cemento antes de fraguar. La armadura capacita a las estructuras consolidadas para soportar mayores esfuerzos a la tracción, a la compresión y a la

cizalladura. Aun cuando se desarrollan grietas en el hormigón, la armadura mantiene un considerable reforzamiento.

El material de refuerzo mas utilizado es el acero, ya que su coeficiente de dilatación térmica es parecido al del hormigón. Además, dentro del cemento, el acero es resistente a la corrosión y adquiere una unión cohesiva relativamente fuerte con el hormigón fraguado. La adherencia mejora considerablemente utilizando acero con superficies arrugadas, lo que permite un mayor grado de acoplamiento mecánico.

El hormigón de cemento portland también se puede reforzar mezclando el hormigón fresco con fibras de materiales de alto módulo elástico tales como vidrio, acero, nilón y polietileno. Al utilizar este tipo de refuerzos se debe prestar especial atención a lo que se mezcla, ya que algunos materiales fibrosos se deterioran rápidamente en un ambiente de cemento.

Incluso se aplica reforzamiento mediante técnicas que introducen esfuerzos de compresión residual para aumentar la resistencia del hormigón: así se genera el hormigón pretensado. Este procedimiento utiliza una característica de las cerámicas frágiles: normalmente son más resistentes a la compresión que a la tracción. De este modo para romper un miembro de hormigón pretensado se

debe aplicar una fuerza a la tracción superior a la magnitud de la fuerza compresiva residual.

En la fabricación de hormigón pretensado se utiliza alambres de acero colocados dentro del molde y sometidos a un elevado esfuerzo de tracción, que permanece constante. Después del fraguado y del endurecimiento del hormigón, se elimina el esfuerzo aplicado. Así, los alambres se contraen y someten a la estructura a un estado de compresión porque el esfuerzo se transmite al hormigón mediante las uniones alambre-hormigón recién formadas.

Otro procedimiento de reforzamiento aplica esfuerzos después de fraguar y endurecer el hormigón es llamado postensado. En el interior y a través de la cavidad donde más tarde se colocará el hormigón se instalan láminas metálicas o tubos de caucho. Después de que el hormigón ha endurecido, se colocan varillas de acero a través de los tubos y se aplican esfuerzos mediante gatos hidráulicos colocados en la pared de la estructura.

De nuevo, un esfuerzo de compresión se impone a la pieza de hormigón, esta vez mediante gatos hidráulicos. Finalmente, los espacios

vacíos de los tubos de caucho se llenan con hidróxido cálcico para proteger las varillas de la corrosión.

El hormigón pretensado de alta calidad tiene baja velocidad de agrietamiento y de fluencia. El hormigón pretensado generalmente se utiliza para construir carreteras y puentes.

## **2.5. MATEIALES COMPUESTOS CONSOLIDADOS POR DISPERSION**

La resistencia y la dureza de los metales y de las aleaciones metálicas pueden aumentarse mediante la dispersión uniforme de finas partículas de material muy duro e inerte en cantidades correspondientes a varios porcentajes en volumen. La fase dispersa puede ser metálica o no metálica generalmente se utilizan óxidos. Otra vez, el mecanismo del aumento de resistencia transcurre mediante las interacciones entre las partículas y las dislocaciones que circulan por la matriz, mecanismo análogo al del endurecimiento por precipitación. El aumento de resistencia por dispersión no es tan pronunciado

como el endurecimiento por precipitación; sin embargo, el incremento de resistencia se mantiene a elevada temperatura durante prolongados períodos de tiempo, porque las partículas dispersas se han escogido por su falta de reactividad con la fase matriz. En las aleaciones endurecidas por precipitación, el incremento de resistencia desaparece por tratamiento térmico como consecuencia del crecimiento del precipitado o de la disolución de la fase precipitada.

La resistencia a elevadas temperaturas de las aleaciones de níquel aumenta significativamente por adición de un 3% en volumen de toria ( $\text{ThO}_2$ ) como partículas finamente dispersadas, este material se conoce como níquel con toria dispersa o (TD). Análogo efecto se produce en el sistema aluminio-óxido de aluminio. En la matriz metálica de aluminio se dispersan escamas extremadamente pequeñas (0.1 a 0.2  $\mu\text{m}$  de espesor) de aluminio recubiertas de una muy delgada y adherente película de alúmina; este material se denomina polvo de aluminio sinterizado (SAP).

## **CAPITULO 3**

### **MATERIALES COMPUESTOS REFORZADOS CON FIBRAS**

Tecnológicamente, los materiales compuestos con fases dispersas en formas de fibras son los más importantes. A menudo se diseñan materiales compuestos reforzados con fibras con la finalidad de conseguir elevada resistencia y rigidez a baja densidad. Estas características se expresan mediante los parámetros resistencia específica y módulo específico, que corresponden, respectivamente, a las relaciones entre la resistencia a la tracción y el peso específico y entre el módulo de elasticidad y el peso específico. Utilizando materiales de baja densidad, tanto por la matriz como por las fibras, se fabrican compuestos reforzados con fibras que tienen resistencias y módulos específicos excepcionalmente elevados.

Los materiales compuestos reforzados con fibras se subclasifican por la longitud de fibra (Figura 1.2). En el caso fibras cortas, éstas suelen ser demasiado cortas para conseguir un apreciable aumento de resistencia.

### 3.1. INFLUENCIA DE LA LONGITUD DE FIBRA

Las características mecánicas de los compuestos reforzados con fibras dependen no sólo de las propiedades de la fibra, sino también del grado en que una carga aplicada se transmite a la fibra por medio de la fase matriz. En este proceso de transmisión de carga es muy importante la magnitud de la unión en la intercara de las fases matriz y fibra. Al aplicar un esfuerzo de tracción, la unión fibra-matriz cesa en los extremos de la fibra y en la matriz se genera un patrón de deformación como el que se muestra en la figura 3.1; en otras palabras, en los extremos de la fibra no hay transmisión de carga desde la matriz.

Existe una longitud de fibra crítica para aumentar la resistencia y la rigidez del material compuesto. Esta longitud crítica  $l_c$  depende del diámetro  $d$  de la fibra, de la resistencia a la tracción  $\sigma_f$  y de la resistencia de la unión matriz-fibra (o resistencia a la cizalladura de la matriz)  $\tau_c$ , de acuerdo con

$$l_c = \sigma_f d / \tau_c \quad (3)$$

La longitud crítica de algunas combinaciones de matriz-fibra de vidrio y de carbono es del orden de 1 mm, equivalente a unas de 20 a 150 veces el diámetro de la fibra.

Cuando se aplica un esfuerzo  $\sigma_f$  a una fibra que tiene una longitud igual a la de la crítica, los resultados del perfil del esfuerzo-posición se muestran en la figura 3.2.a esto es, la carga máxima sólo se consigue en el centro del eje de la fibra. Si la longitud  $l$  de la fibra se incrementa, el reforzamiento de la fibra se hace más efectivo, como indica la figura 3.2.b, donde la posición esfuerzo-posición axial para  $l > l_c$  cuando el esfuerzo aplicado es igual a la resistencia de la fibra. La figura 3.2.c muestra el perfil esfuerzo-posición para  $l < l_c$ .

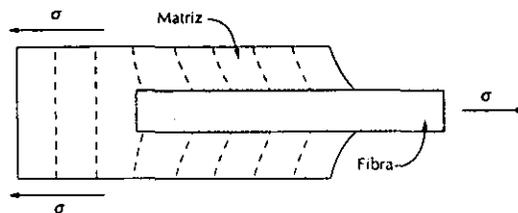
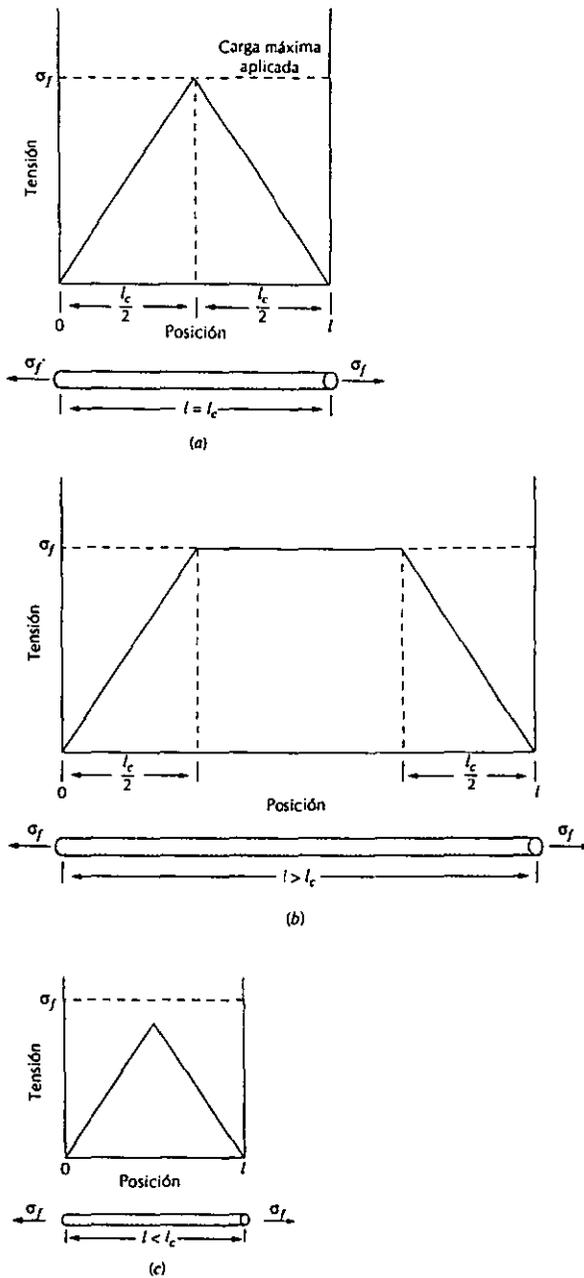


Figura 3.1. Patrón de deformación en una matriz que rodea a una fibra sometida a un esfuerzo de tracción.

Las fibras con  $l \gg l_c$  (normalmente  $l > 15 l_c$ ) se denominan continuas; y las fibras de menor longitud se denominan discontinuas o fibras cortas. En las fibras discontinuas de longitud significativamente menor que  $l_c$ , la matriz se deforma alrededor de la fibra de modo que apenas existe transferencia del esfuerzo y el efecto de reforzamiento de la fibra es insignificante. Esencialmente, estos materiales compuestos son similares a los reforzados con partículas vistos anteriormente. Para que el efecto reforzante de las fibras sobre los materiales compuestos sea significativo, las fibras deben ser continuas.



**Figura 3.2.** Perfiles esfuerzo-posición cuando la longitud de la fibra  $l$  es (a) igual a la longitud crítica  $l_c$  (b) mayor que la longitud crítica y (c) menor que la longitud crítica en un compuesto reforzado con fibra y sometido a un esfuerzo de tracción igual a la resistencia a la tracción  $\sigma_f$  de la fibra.

### 3.2. INFLUENCIA DE LA ORIENTACION DE LA CONCENTRACION DE LA FIBRA

La disposición u orientación relativa de las fibras y su concentración y distribución influyen radicalmente en la resistencia y en otras propiedades de los materiales compuestos reforzados con fibras. Con respecto a la orientación existen dos situaciones extremas (1) alineación paralela de los ejes longitudinales de las fibras y (2) alineación al azar. Las fibras continuas normalmente se alinean figura 3.3a, mientras que las fibras discontinuas se pueden alinear figura 3.3b o bien se pueden orientar al azar figura 3.3c o alinearse parcialmente. Las mejores propiedades de los materiales compuestos se consiguen con la distribución uniforme de la fibra.

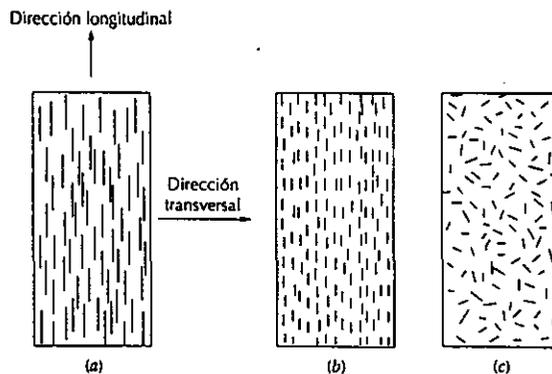


Figura 3.3. Representaciones esquemáticas de compuestos reforzados con fibras (a) continuas y alineadas, (b) discontinuas y alineadas y (c) discontinuas y orientadas al azar.

### 3.3. MATERIALES COMPUESTOS CON FIBRAS CONTINUAS Y ALINEADAS

Carga longitudinal. Las propiedades de un compuesto con fibras alineadas tienen carácter altamente anisotrópico, esto es, depende de la dirección en que se miden. Conviene considerar la deformación de este tipo de compuestos originada por un esfuerzo aplicado a lo largo de la dirección de alineamiento, la dirección longitudinal (figura 8), y suponer que la unión matriz-fibra es muy fuerte, de modo que la deformación de la matriz y de la fibra es la misma (situación de isodeformación). En estas condiciones, la carga total soportada por el compuesto  $F_c$  es igual a las cargas soportadas por la fase matriz  $F_m$  y por la fase fibra  $F_f$ .

$$F_c = F_m + F_f \quad (4)$$

Teniendo en cuenta la definición de esfuerzo  $F = \sigma A$ , es posible obtener las expresiones de  $F_c$ ,  $F_m$  y  $F_f$  en función de sus respectivos esfuerzos ( $\sigma_c$ ,  $\sigma_m$  y  $\sigma_f$ ) y de sus respectivas áreas ( $A_c$ ,  $A_m$ , y  $A_f$ ). Aplicando estas expresiones en la ecuación 4 resulta:

$$\sigma_c A_c = \sigma_m A_m + \sigma_f A_f \quad (5)$$

Dividiendo todos los términos por el área de la sección del compuesto  $A_c$ :

$$\sigma_c = \sigma_m A_m/A_c + \sigma_f A_f/A_c \quad (6)$$

Donde  $A_m/A_c$  y  $A_f/A_c$  son las fracciones de área de la matriz y de la fibra, respectivamente. Si las longitudes del compuesto, de la matriz y de las fibras son iguales,  $A_m/A_c$  es equivalente a la fracción de volumen de las fibras,  $V_f$ . La ecuación 6 se convierte en:

$$\sigma_c = \sigma_m V_m + \sigma_f V_f \quad (7)$$

En un estado de isodeformación se cumple

$$\epsilon_c = \epsilon_m = \epsilon_f \quad (8)$$

Y si cada término de la ecuación 7 se divide por su respectiva deformación:

$$\sigma_c/\epsilon_c = (\sigma_m/\epsilon_m)V_m + (\sigma_f/\epsilon_f)V_f \quad (9)$$

Además, si las deformaciones del compuesto, de la matriz y de fibra son todas elásticas, se cumple  $\sigma_c/\epsilon_c = E_c$ ,  $\sigma_m/\epsilon_m = E_m$ , y  $\sigma_f/\epsilon_f$ , siendo las E los módulos de elasticidad de las respectivas fases. Sustituyendo en la ecuación 9 resulta

$$E_c = E_m V_m + E_f V_f \quad (10 a)$$

$$E_c = E_m (1 - V_f) + E_f V_f \quad (10 b)$$

Ya que el compuesto solo consta de matriz y de fibras; esto es  $V_m + V_f = 1$ . Así el módulo de elasticidad de un material compuesto reforzado con fibras continuas y alineadas en la dirección de alineamiento es igual a las fracciones de volumen multiplicadas por los módulos de elasticidad de ambas fases. Algunas otras propiedades, como la resistencia a la tracción, también dependen de las fracciones de volumen. La ecuación 10 a para los compuestos reforzados con fibras es análoga a la ecuación 1, el límite superior para compuestos reforzados con partículas.

También se puede demostrar, para cargas longitudinales, que la relación de la carga es soportada por las fibras y la soportada por la matriz es

$$F_f/F_m = E_f V_f / E_m V_m \quad (11)$$

Carga transversal. Un material compuesto con fibras continuas orientadas se puede cargar en la dirección transversal; esto es, la carga se aplica perpendicularmente a la dirección de la fibra alineada, como indica la figura 8a. Esta condición el compuesto y ambas fases están expuestos al mismo al mismo esfuerzo  $\sigma$ .

$$\sigma_c = \sigma_m = \sigma_f = \sigma \quad (13)$$

Se denomina estado isotensionado. La deformación del material compuesto  $\epsilon_c$  es

$$\epsilon_c = \epsilon_m V_m + \epsilon_f V_f \quad (14)$$

Pero ya que  $\epsilon = \sigma/E$

$$\sigma/E_c = (\sigma/E_m)V_m + (\sigma/E_f)V_f \quad (15)$$

Dividiendo ambos miembros por el esfuerzo  $\sigma$

$$1/E_c = V_m/E_m + V_f/E_f \quad (16)$$

que se reduce a

$$E_c = E_m E_f / (V_m E_f + V_f E_m) = E_m E_f / (1 - V_f) E_f + V_f E_m \quad (17)$$

La ecuación 17 es análoga a la del límite inferior de compuestos con partículas ecuación 2.

### 3.4. MATERIALES COMPUESTOS CON FIBRAS DISCONTINUAS Y ALINEADAS

Aunque la eficacia del reforzamiento con fibras discontinuas es inferior a la originada por fibras continuas, los materiales compuestos reforzados con fibras discontinuas y alineadas (figura 3.3b) tienen una importancia cada vez mayor. Las fibras de vidrio cortadas se utilizan mucho; al igual que las fibras discontinuas de carbono y de aramida. Estos compuestos con fibras cortas alcanzan módulos de elasticidad y resistencia a la tracción aproximadamente el 90% y el 50%, respectivamente, de los materiales compuestos con fibras continuas.

En los compuestos con fibras discontinuas, alineadas uniformemente distribuidas y con  $l > l_c$  la resistencia a la tracción  $(TS)_c$  longitudinal cumple la siguiente relación :

$$(TS)_c = (TS)_f V_f(1-l_c/2l) + (TS)_m(1-V_f) \quad (18)$$

donde  $(TS)_f$  y  $(TS)_m$  representan, respectivamente, la resistencia a la fractura de la fibra y la tensión en la matriz cuando el material compuesto se rompe.

Si la longitud de la fibra es menor que la crítica ( $l < l_c$ ) el valor de la resistencia longitudinal es:

$$(TS)_c = l\tau_c/d V_f + (TS)_m(1-V_f) \quad (19)$$

donde  $d$  es el diámetro de la fibra.

### **3.5. MATERIALES COMPUESTOS CON FIBRAS DISCONTINUAS Y ORIENTADAS AL AZAR**

Normalmente cuando los materiales compuestos tienen fibras orientadas al azar, éstas suelen ser discontinuas y cortas; un reforzamiento de este tipo está representado por la figura 8c. En estas circunstancias el módulo elástico suele expresarse mediante una “regla de mezclas” parecida a la ecuación 10a

$$E_c = K_e f V_f + E_m V_m \quad (20)$$

En esta expresión  $K$  es el parámetro de eficiencia de la fibra, que depende de  $V_f$  y la relación  $E_f/E_m$ . Desde luego esta magnitud es inferior a la unidad y ordinariamente del orden de 0.1 a 0.6. El módulo elástico de los materiales reforzados, tanto si las fibras están alineadas como si están orientadas al azar, aumenta al incrementarse la fracción de volumen de la fibra.

Resumiendo: los compuestos con fibras alineadas son anisotrópicos y la máxima resistencia (reforzamiento) se consigue a lo largo de la dirección de alineación (longitudinal). En la dirección transversal, el reforzamiento mediante fibras prácticamente no existe: la rotura suele ocurrir a esfuerzos de tracción relativamente bajos los esfuerzos aplicados en otras direcciones encuentran resistencias comprendidas entre estos extremos.

Si una lámina debe de estar sometida a esfuerzos multidireccionales normalmente se utilizan varias capas yuxtapuestas con fibras alineadas en diferentes direcciones. Son los denominados materiales compuestos laminares.

En las aplicaciones en las que las fibras están sometidas a esfuerzos totalmente multidireccionales normalmente se utilizan fibras discontinuas orientadas al azar en la matriz. La eficiencia del reforzamiento de estos compuestos es sólo la quinta parte de la eficiencia correspondiente a los compuestos cuyas fibras están alineadas en la dirección longitudinal, sin embargo, las propiedades mecánicas son isotrópicas.

Las consideraciones sobre la orientación y la longitud de las fibras de un compuesto particular dependen del nivel y de la naturaleza del esfuerzo aplicado y del coste de fabricación. Las velocidades de producción de compuestos con fibras cortas (alineadas y orientadas al azar) son rápidas y se pueden conformar piezas de formas intrincadas que no son posibles con refuerzos de fibras continuas. Además, los costes de fabricación son mucho más bajos que en el caso de compuestos reforzados con fibras continuas y alineadas; las técnicas de conformación para materiales compuestos de fibras cortas son el molde por compresión, por inyección y por extrusión.

### 3.6. FASE FIBROSA

Una importante característica de muchos materiales, especialmente los frágiles, es que las fibras con diámetros pequeños son mucho más resistentes que el material macizo. La probabilidad de la presencia de una imperfección superficial crítica que conduzca a la rotura disminuye cuando aumenta el volumen específico. Este fenómeno se utiliza con ventaja en los compuestos reforzados con fibras. El material utilizado como fibra de refuerzo debe tener alta resistencia a la tracción.

En función de sus diámetros y características, las fibras se agrupan en tres categorías diferentes: whiskers, fibras y alambres. Los whiskers son monocristales muy delgados que tienen una relación longitud-diámetro muy grande. Como consecuencia de su pequeño diámetro, tienen alto grado de perfección cristalina y están prácticamente libres de defectos, y por ello tienen resistencias excepcionalmente elevadas; son los materiales de mayor resistencia. A pesar de sus elevados valores de resistencia, se utiliza poco como reforzantes porque son muy caros. Además, la incorporación de

whiskers a la matriz resulta difícil y a menudo impracticable. Los whiskers pueden ser de grafito, carburo de silicio, nitruro de silicio y óxido de aluminio.

Los materiales clasificados como fibras son policristalinos o amorfos y tienen diámetros pequeños; los materiales fibrosos son generalmente polímeros o cerámicos (p.ej., aramida, vidrio, carbono, boro, óxido de aluminio y carburo de silicio). La tabla 3 también indica algunos datos de varios materiales utilizados como fibras.

Los alambres tienen diámetros relativamente grandes; los materiales típicos son el acero molibdeno y el tungsteno. Los alambres se utilizan como refuerzos radicales de acero en los neumáticos de automóvil, filamentos internos de recubrimientos de cohetes espaciales y paredes de mangueras de alta presión.

### 3.7. FASE MATRIZ

La fase matriz de un material compuesto con fibras ejerce varias funciones. En primer lugar, une las fibras y actúa como un medio que distribuye y transmite a las fibras los esfuerzos externos aplicados; solo una pequeña fracción del esfuerzo aplicado es resistido por la matriz. Además, la matriz debe ser dúctil y, por otra parte, el módulo elástico de la fibra debe de ser mucho mayor que el de la matriz. En segundo lugar, la matriz protege las fibras del deterioro superficial que puede resultar de la abrasión mecánica o de reacciones químicas con el medio ambiente. Estas interacciones introducen defectos superficiales capaces de originar grietas, que podrían producir fallos con esfuerzos de tracción relativamente bajos. Finalmente, la matriz separa las fibras y, en virtud de su relativa blandura y plasticidad, impide la propagación de grietas de una fibra a otra, que originaría fallos catastróficos; en otras palabras, la matriz actúa como una barrera que evita la propagación de grietas. Aunque algunas fibras individuales se rompan, la rotura total del material compuesto no ocurrirá hasta que se hayan roto gran número de fibras adyacentes, que forman un agregado de tamaño crítico.

Es esencial que la adherencia de la unión entre fibra y matriz sea elevada para minimizar el arrancado de fibras. En efecto, la resistencia de la unión tiene gran importancia en el momento de seleccionar la combinación matriz- fibra. La resistencia a la tracción final del compuesto depende, en gran parte, de la magnitud de esta unión; una unión adecuada es esencial para optimizar la transmisión de esfuerzos desde la plástica matriz a las fuertes fibras.

Generalmente sólo se utilizan polímeros y metales como matriz, porque son materiales dúctiles. El aluminio y el cobre son los metales mas usados para ser reforzados con fibras. Sin embargo, los polímeros se utilizan como material matriz en la mayoría de las aplicaciones de los materiales compuestos debido a sus propiedades y a la facilidad de fabricación. Casi todos los polímeros termoplásticos y termoestables se utilizan como matriz.

# **CAPITULO 4**

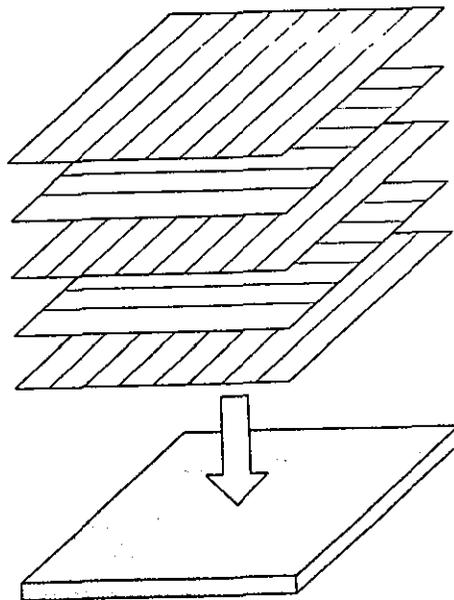
## **MATERIALES COMPUESTOS ESTRUCTURALES**

Un material compuesto estructural está formado tanto por materiales compuestos por materiales homogéneos y sus propiedades no sólo dependen de los materiales constituyentes sino de la geometría del diseño de los elementos estructurales. Los compuestos laminares y los paneles sándwich son dos de los compuestos estructurales más comunes.

### **4.1. MATERIALES COMPUESTOS LAMINARES**

Un material compuesto laminar consta de laminas o paneles que tienen una dirección preferente con elevada resistencia, tal como ocurre en la madera y en los plásticos reforzados con fibras continuas y alineadas. Las capas se alinean y luego se pegan entre sí, de modo que la orientación de la dirección de elevada resistencia varia en cada una de las sucesivas capas (figura 4.1.). Por ejemplo, en la madera contrachapada, las direcciones de elevada resistencia de las sucesivas capas forman ángulos rectos entre sí. Las laminas

también se pueden construir utilizando materiales plásticos para la matriz y algodón, papel o fibra de vidrio tejida como material de refuerzo. Así un material compuesto laminar es relativamente resistente en varias direcciones del plano bidimensional; pero sin embargo, la resistencia en una dirección determinada es, desde luego, menor que la que resultaría del alineamiento de todas las fibras en esa dirección. Un ejemplo de una estructura laminar relativamente compleja es la de los esquis modernos.



**Figura 4.1.** Apilamiento de capas reforzadas en sucesivas orientaciones para construir un material compuesto laminar.

## 4.2. PANELES SANDWICH

Los paneles sándwich se consideran un tipo de materiales compuestos estructurales y consisten en dos laminas externas fuertes, o caras, separadas por una capa de material menos denso, o núcleo, que tiene baja rigidez y baja resistencia. Las caras resisten a mayor parte de las cargas en el plano, y también en cualquier esfuerzo de flexión transversal. Los materiales de las caras suelen ser aleaciones de aluminio, plásticos reforzados con fibras, titanio, acero y madera contrachapada.

Estructuralmente, el núcleo tiene dos funciones. En primer lugar separa las caras y resiste la deformación perpendicular al plano de la cara. En segundo lugar, aporta cierto grado de resistencia a la cizalladura a lo largo de los planos perpendiculares a las caras. Como núcleo se utiliza varios tipos de materiales y estructuras, como por ejemplo polímeros espumosos, cauchos sintéticos, cementos inorgánicos y madera balsa.

Otro popular núcleo consiste en una estructura “en panal”: delgadas laminas dispuestas en forma de celdillas hexagonales trabadas con sus ejes perpendiculares a los planos de la cara. El material del panal puede ser similar

al de las caras. La figura 4.2. muestra una sección de un panel sándwich con un núcleo en panal.

Se construyen paneles de sándwich para gran cantidad de aplicaciones: techos, suelos y paredes de edificios, y, en aviación, para revestimientos de alas, fuselajes y planos estabilizadores de cola de aviones.

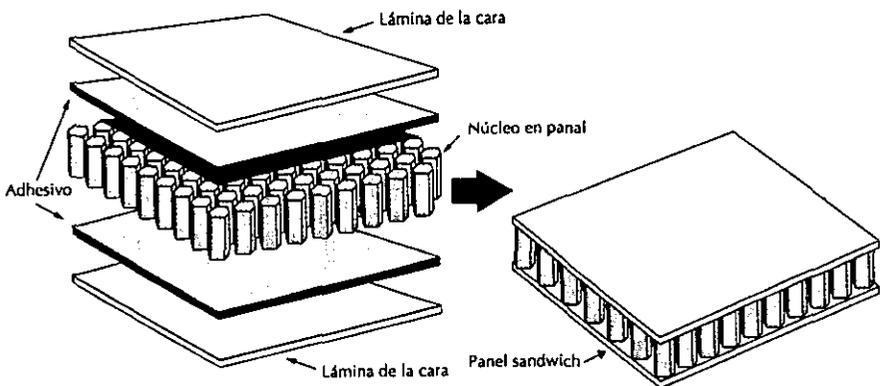


Figura 4.2. Diagrama esquemático de la fabricación de un panel sandwich con un núcleo en panal.

## **CAPITULO 5**

### **MATERIALES COMPUESTOS REFORZADOS CON PARTICULAS CONSOLIDADOS POR DISPERSION**

Los materiales compuestos con partículas tienen un constituyente aditivo el cual es esencial. En algunos compositos sin embargo el constituyente es macroscópico y no dimensional conceptualmente a un punto opuesto o a un área. Solo en la escala del microscopio llega a ser dimensional una partícula. Las partículas de los compositos difieren de fibras y hojuelas en la distribución de los constituyentes, es comúnmente al azar y no controlado, por lo tanto son usualmente isotrópicas. Esta familia de compositos incluye dureza por dispersión, aleaciones y cermets.

## **5.1. ENDURECIMIENTO POR DISPERSION PRODUCIDO POR PARTICULAS**

Solo un número relativamente pequeño de sistemas de aleación permite una amplia solubilidad sólida entre dos o más elementos. Asimismo en la mayoría de los sistemas de aleación solo se puede producir un efecto de endurecimiento relativamente pequeño mediante adiciones en solución sólida. Por consiguiente, la mayor parte de las aleaciones comerciales contiene una microestructura heterogénea compuesta de dos o más fases. Las dos fases pueden ser dúctiles y hallarse presentes en la microestructura en forma relativamente masiva como en el latón alfa-beta. Por otro lado, la estructura puede estar formada por una fase dura y una frágil en una matriz dúctil, como los glóbulos de cementita en el acero globulizado o las partículas de carburo de wolframio en la matriz de cobalto de las herramientas de corte de carburos cementados.

El endurecimiento producido por partículas de segunda fase se suma normalmente al endurecimiento por solución sólida producido en la matriz. En las aleaciones de dos fases, producidas por métodos de equilibrio, la existencia

de una segunda fase asegura un endurecimiento por solución sólida máximo por que su presencia es resultado de la sobresaturación de la fase continua produce tensiones internas localizadas que modifican las propiedades plásticas de la fase continua. Para la completa comprensión del endurecimiento producido por partículas se han de considerar muchos factores. Entre estos se incluyen el tamaño, forma, número y distribución de las partículas de segunda fase, resistencia, ductilidad y comportamiento del endurecimiento por deformación de la matriz y segunda fase, encaje metalográfico, energía y enlace interfaciales.

En aleaciones polifásicas, cada fase aporta algo a las propiedades del conjunto. Si la contribución de cada fase es independiente, las propiedades de la aleación de múltiples fases será un promedio ponderado de las propiedades de las fases individuales. Así por ejemplo la densidad de una aleación de dos fases es igual a la suma de los productos de las fracciones de volumen de cada fase por sus densidades. Sin embargo en las propiedades mecánicas sensibles a la estructura, las propiedades del agregado están generalmente influidas por la interacción entre las dos fases.

Las propiedades mecánicas de una aleación compuesta por una fase dúctil y otra frágil y dura dependen de la distribución de esta última en la microestructura. Si la fase frágil se encuentra en los límites de grano, la aleación es frágil. Si la fase frágil se halla en forma de **partículas discontinuas** en los límites de grano, por ejemplo cuando se agrega oxígeno a las aleaciones de cobre o níquel oxidados internamente, la fragilidad se reduce. Cuando la fase frágil se encuentra en forma de fina dispersión uniformemente distribuida por toda la matriz más blanda, se obtiene un material con una resistencia mecánica y ductilidad óptimas. El endurecimiento producido por una segunda fase insoluble, finamente dispersa en una matriz metálica, se conoce como *endurecimiento por dispersión*.

## 5.2. PRINCIPIOS DE MICROESTRUCTURA

Cuando una pieza de metal puro no es enteramente homogénea en los bordes de grano hay desorden; pero estas propiedades difieren del interior del grano. Por ejemplo el borde de grano es apropiado para ser una fuente de resistencia a baja temperatura pero débil a alta temperatura, la responsabilidad de fractura también depende íntimamente de la morfología de grano.

De acuerdo al tamaño y forma de los granos, son variables importantes, además, un metal en el que tenga los cristales orientados al azar tendrá un comportamiento diferente de uno que tenga una orientación preferencial o textura, que se comporte con propiedades anisotrópicas, así un rolado, un recocido o una hoja de acero tienen diferentes propiedades mecánicas.

Los granos individuales pueden ser subdivididos en pequeños subgranos, regiones que difieren ligeramente en orientación. La influencia de este tipo de estructuras no es tan pronunciado pero causa efectos en el material. Cambiando ahora a materiales que contiene dos fases. Nosotros podemos clasificar esencialmente variables microestructurales como sigue:

1. Diferencias entre fase continua y fase de dispersión.
2. Fracciones de volumen de fases dispersas.
3. Forma de partículas de fases dispersas.
4. Tamaño y distribución de partículas de fases dispersas.
5. Principal separación entre las partículas de la fase dispersa y su disposición.
6. Grano y estructura de la matriz.

7. Relación entre el grano de la estructura.
8. Naturaleza de las intercaras entre matriz y partículas de dispersión.
9. Estado de elasticidad inducido en la matriz por inadaptación de partículas de la fase dispersa.

Cada una de estas variables morfológicas juega un papel muy importante, determinando el comportamiento en los materiales compositos con partículas.

En términos generales las propiedades físicas, tales como térmicas o conductividad eléctrica y coeficiente de expansión térmica son gobernados por fracciones de volumen y morfología de fases de dispersión, por lo tanto la escala de dispersión es un factor secundario.

Esto también interviene en las propiedades mecánicas como la dureza y módulo de Young, sin embargo otras propiedades mecánicas como resistencia a la tensión y resistencia a la fluencia o fatiga dependen íntimamente de la escala y naturaleza de la intercara y de la tensión del campo elegido por la fase de dispersión en la matriz

### **5.3. TIPOS Y PROPIEDADES**

El tamaño, naturaleza y función de las partículas varía mucho del comportamiento mecánico y del nivel atómico.

Así las partículas colocan algunos obstáculos para desarrollar una teoría unificada de composites y esto hace que sea un campo muy extenso de aplicación, investigación y experimentación. En términos de aplicación y aplicabilidad industrial y problemas de corriente, hace de los materiales compuestos con partículas algunos de los materiales más usados.

La resistencia de la dureza por dispersión en composites es directamente proporcional a la dureza por partículas dispersadas (particularmente a elevadas temperaturas) desde la partícula más resistente a la tensión causada por la dislocación que ocasionan dichas partículas. Como se muestra en la figura 5.1.

Los esfuerzos coherencia entre las partículas y la matriz también afecta la resistencia. La baja energía en la intercara entre partícula-matriz implica un buen acoplamiento que es necesario si las partículas actúan como barreras de

dislocación; por otra parte alta energía en la intercara es equivalente a un hueco alrededor de la partícula, esto no sería la única esto no sería una buena barrera de dislocación para el movimiento de deslizamiento (con un resultado de disminución de la resistencia) sino también podría actuar como microgrieta en la estructura.

Partículas combinadas en una matriz pueden producir composites con propiedades inusuales, la dispersión en los metales puede aumentar el rango de uso de temperatura, como también la resistencia de la matriz. La aleación de polvo sinterizado de alúmina tiene una resistencia de uso de 1000°F (538°C) el cual es 400°F (204°C) mas alto que el tratamiento térmico de aleaciones de aluminio.

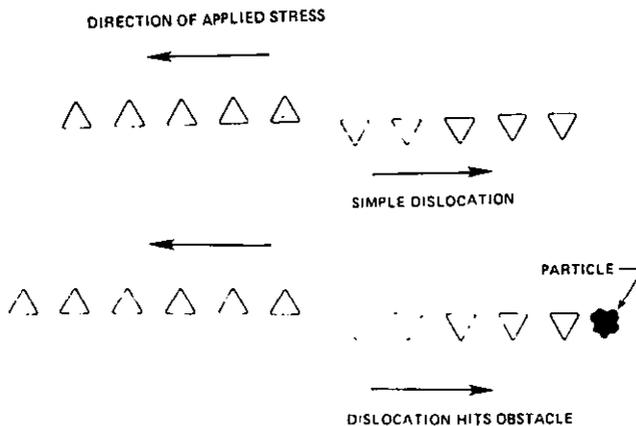


Figura 5.1. Mecanismo de endurecimiento por dispersión en materiales compositos.

## **5.4. MODOS DE PREPARACION DE MATERIALES COMPUESTOS DE METAL BASE**

Varios modos de preparación son utilizados para desarrollar estos materiales, aquí se muestran una lista de los más importantes:

1. Una solución sólida es calentada para disolverla en el soluto y después enfriada a una velocidad controlada para precipitarlo o sobresaturar la aleación, y luego templearlo para complementar la precipitación y controlar la morfología de precipitación. La resistencia es alta si y solo si la precipitación es depositada continuamente (con coherencia en la intercara), así como para generar un campo de esfuerzo elástico en la matriz.
2. Una aleación líquida es enfriada para solidificar dentro de una estructura de dos fases que puede ser laminar o eutéctica o en una estructura agregada, o puede contener una segunda fase segregada en el borde de grano.

3. Una fase dispersa es precipitada por difusión dentro de una solución sólida. Una apropiada impureza generalmente oxígeno esta limitada por una delgada sección. La difusión de elementos como nitrógeno carbón dentro de la superficie de la capa de acero es continuamente usada para producir endurecimiento superficial.
  
4. Polvos de dos fases que no son apreciablemente intersolubles a una temperatura de interés son comprimidos y sinterizados juntos; esto ha sido hecho a gran escala para producir metales duros para herramientas de corte que consisten en carburos dispersos en una matriz metálica dúctil. Esto también es hecho para dispersar un oxido en metales blandos y producir materiales con propiedades excepcionales. Una substancia importante es el polvo de aluminio sinterizado el cual es polvoreado bajo condiciones que cambian dentro de las duras hojuelas oxidadas que después son sinterizadas.
  
5. Una variante directa del proceso de sinterizado es sinterizar en la presencia de una fase liquida. La reacción química puede alterar la morfología y constitución del producto y puede producir muy baja porosidad en la

matriz para ser infiltrados poros imperfectos con una fase líquida que solidifica más tarde y ambas fases son continuas. Un metal poroso puede ser usado como tal sin infiltraciones, el grado requerido de porosidad es alcanzado por un cuidadoso control del tamaño de distorsión del polvo de partículas, grado de compactación y régimen de sinterizado. Algunos compactados son usados como electrodos de plata, filtros para pulir etc.

## **5.5 PROPIEDADES MECANICAS**

Dentro del más importante uso de la fina dispersión de aleaciones es en el logro de alta resistencia. Esta arte ha sido por ahora traído para lograr nuevos materiales con propiedades inusitadas y esto requiere en gran forma de la utilización de nuevos principios.

Los metalúrgicos buscando producir fuertes aleaciones son detenidos por un problema fundamental, los metales puros son más débiles. Existe un número de compuestos intermetálicos pero todos estos materiales son altamente quebradizos.

Por algún material homogéneo en la alta resistencia es asociada con ser quebradiza (baja resistencia de nucleación y propagación de grietas). Esto puede ser en metales puros así, los cristales de berilio en cierta orientación tienen una resistencia a la deformación plástica muy efectiva, cuando estos cristales eventualmente fallan por quebrarse liberan energía elástica almacenada, reducen el cristal a polvo. Tal material es deseado para ser usado como elemento constitucional.

El problema puede ser resuelto en dos diferentes formas. Una es fortaleciendo la matriz blanda por medio de una dispersión de partículas duras (solución sólida de endurecimiento de la matriz), la dispersión limita el movimiento de dislocación a través de la matriz, pero si una partícula es localizada debajo de un punto de concentración de esfuerzos la matriz blanda previene la extensión de la fractura; así luego las partículas dispersas actúan como obstáculos para la dispersión.

La segunda forma es reforzar la matriz blanda con una partícula fuerte que sostiene la carga. Este es el principio de reforzamiento de fibra. La eficiencia de este sistema depende de la transferencia de carga entre la matriz

y las fibras. La esencial combinación de alta resistencia con la habilidad de absorber concentración de esfuerzos sin fracturarse es algo restringido de los materiales compuestos.

## **5.6. ENDURECIMIENTO POR DISPERSION DE PARTICULAS EN UNA ALEACION Cu-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.**

Basta con decir que la fase dispersa se opone al pasaje de dislocaciones por crear un campo de tensión en la matriz o por crear un desorden atómico. Si una dislocación pasa a través de la partícula debido a la gran diferencia que hay en el comportamiento elástico entre la matriz y la partícula que interfiere el campo de tensión como una dislocación en los sistemas de deslizamiento.

En investigaciones acerca de dureza por dispersión en aleaciones de cobre fueron utilizados diferentes tipos de fase dispersa: acero y cromo, partículas que lograron incremento de la resistencia; molibdeno, alumina y grafito no lo consiguieron. Un aspecto interesante de esto fue que el acero y cromo resultaron tener una apreciable solubilidad en el cobre en la temperatura de sinterizado y por lo tanto los otros dispersantes no lo tenían. La insignificante o escasa insolubilidad del dispersante en la matriz da como

resultado en la formación de un firme lazo entre el dispersante y la matriz; en otras palabras la intercara llega a tener coherencia. Así mencionamos anteriormente, que esta característica se presenta esencialmente para alta resistencia en aleaciones endurecidas por precipitación y esto son otros tipos de aleación y endurecimiento.

En la figura 5.2. se muestra la potencia de la influencia de pequeñas fracciones de volumen en una fina dispersión insoluble de alumina; aumentando su resistencia de trabajo altas temperaturas (El cobre puro comienza ablandarse a 200-250° C); por lo tanto este tipo de aleaciones son particularmente utilizadas en trabajos altas temperaturas.

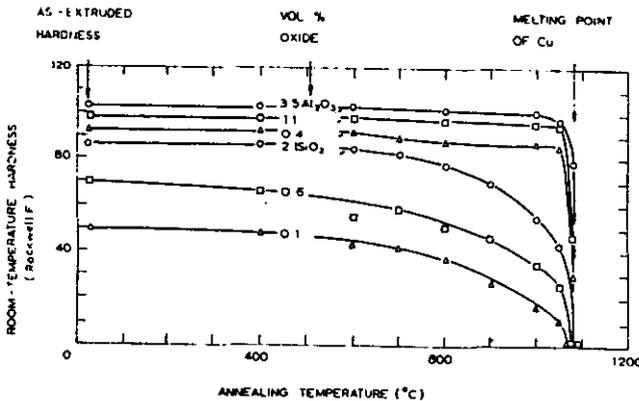


Figura 5.2. Gráfica de dureza con respecto a la temperatura y porcentaje de un cermet de cobre con contenido  $Al_2O_3$ .

# CAPITULO 6

## PARTE EXPERIMENTAL

### INTRODUCCION

Los materiales compuestos (o compositos) se producen cuando dos materiales se unen para dar una combinación de propiedades que de propiedades que no pueden ser obtenidas en los materiales originales. Estos materiales pueden seleccionarse para proporcionar combinaciones poco usuales de rigidez, resistencia, peso, rendimiento alta temperatura, alta resistencia a la corrosión, dureza o conductividad. En los compuestos reforzados con partículas, las partículas de un material duro y frágil dispersa de una manera discreta y uniforme se rodean por una matriz más blanda y dúctil. De hecho la estructura hace recordar la de muchas aleaciones metálicas de dos fases endurecidas por dispersión. Sin embargo en los compuestos no se utiliza una transformación de fase para introducir las partículas dispersa, sino un proceso mecánico.

Se pueden subdividir los materiales compuestos por partículas en dos categorías generales basadas en el tamaño y substancia de las partículas que influyen en las propiedades del compuesto. Estas dos categorías incluyen los compuestos endurecidos por dispersión y los compuestos con partículas propiamente dichos.

## **6.2. LOS MATERIALES COMPUESTOS CONSOLIDADOS POR DISPERSIÓN**

El tamaño de la partícula en los compuestos endurecidos por dispersión es muy pequeño, con diámetro de 100 Å. a 2500 Å. Debido a que las partículas pequeñas obstaculizan el movimiento de las dislocaciones, producen un efecto pronunciado de endurecimiento. Solo se requieren pequeñas cantidades del material disperso.

A temperaturas normales, los compuestos endurecidos por dispersión no resultan más resistentes que las aleaciones metálicas de dos fases. Sin embargo, debido a que los compuestos endurecidos por dispersión no se ablandan catastróficamente debido al sobreenviejamiento, el sobrerrevenido, el crecimiento de grano o el engrosamiento de la fase dispersa, la resistencia

del compuesto decrece gradualmente conforme se incrementa la temperatura. Sin embargo, la resistencia a la termofluencia es superior a la de los metales y aleaciones.

Las propiedades de los compuestos endurecidos por dispersión se pueden optimizar si se consideran los siguientes aspectos.

1. La fase dispersa, por lo común es un óxido duro y estable, debe de ser un obstáculo efectivo para el deslizamiento.
2. El material disperso debe tener un tamaño, forma, distribución y cantidad óptimos.
3. El material disperso debe tener una baja solubilidad en el material de la matriz.
4. Se debe lograr una buena unión entre el material disperso y la matriz. Una pequeña solubilidad del dispersante en la matriz puede servir para producir una unión firme.

Además no debe ocurrir ninguna reacción química entre el dispersante y la matriz. La alumina no se disuelve fácilmente en el cobre o en el mismo aluminio; de aquí que resulte un dispersante efectivo para aleaciones que trabajan altas temperaturas. Sin embargo el óxido de cobre se disuelve en el cobre a temperaturas altas, por lo cual el sistema sería no efectivo.

El polvo de aluminio sinterizado o compuesto PAS es un dispersante muy efectivo pues logra el efecto de endurecimiento por dispersión en la matriz de cobre. Los compuestos con estas características pueden ser formados por metalurgia de polvos se mezclan los polvos, se compactan a elevadas presiones y se sinterizan. En una segunda técnica el polvo de aluminio se trata de obtener una capa continua de óxido en cada partícula. Cuando se compacta el polvo, la capa de óxido se fractura en partículas diminutas que son rodeadas por la matriz durante la sinterización.

### 6.3. OBJETIVO

La presente investigación tiene como objetivo: *“El estudio de la influencia de temperatura generada en el proceso de soldadura por Resistencia, en un material compuesto de Cobre con  $Al_2O_3$ ”*

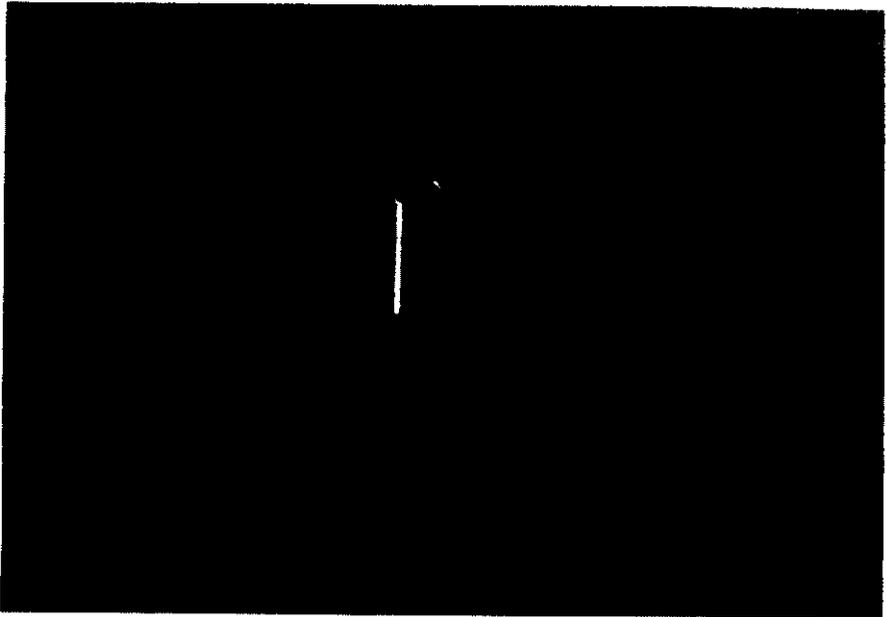
#### **6.4. ANALISIS DE FALLA POR LA INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA EN EL MATERIAL COMPUESTO DE Cu-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.**

La parte experimental consistió, en identificar los mecanismo de falla que provocaron la reducción de la vida media del electrodo o punta, que se usa en el proceso de soldadura por Resistencia para unir los ensambles de las carrocerías de una industria automotriz, como se muestra en la fotografía.



**Fotografía 6.1.** Proceso de soldadura por resistencia utilizada en la línea de producción de FORD.

Se prepararon dos muestras para su estudio metalográfico, del material composite de Cobre con 0.9% de  $Al_2O_3$  de las varias que había, de las que se usa en el proceso de soldadura por resistencia, como se muestran en la fotografía 6.2. (también son llamadas electrodos o puntas).



**Fotografía 6.2.** Forma de los electrodos o puntas utilizados para realizar el proceso de soldadura por resistencia.

La preparación consistió en cuidar en forma específica, el cráter formado en el área de contacto que hace el electrodo sobre la lamina del ensamble al soldar, el cual se muestra en la fotografía 6.3. y 6.4.



**Fotografía 6.3.** Vista superior del cráter formado en la superficie del electrodo.



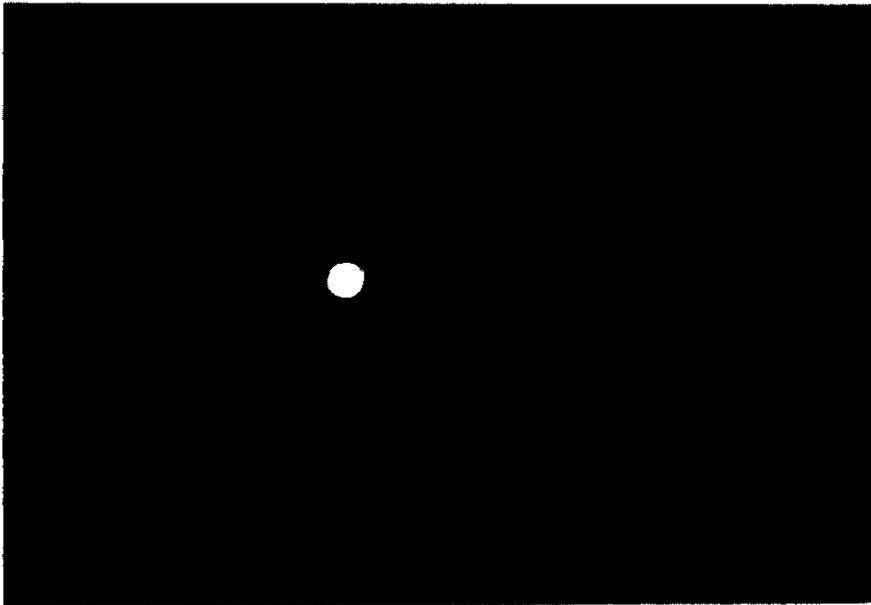
**Fotografía 6.4.** Vista lateral del cráter formado en la superficie del electrodo.

La punta o electrodo fue cortada por la mitad y se montó en resina con el propósito de poder maniobrar mejor la probeta, después se comenzó con un esmerilado fino con lijas grano 180, 220, 300, 500, 600 hasta llegar finalmente al grano 1200, con un sentido perpendicular. Posteriormente pasamos al pulido con un paño y alumina en la pulidora cuidando la superficie y logrando así un acabado espejo. Finalmente atacamos la muestra, aplicando con un algodón cloruro férrico y posteriormente enjuagando bajo el chorro de agua y observándola en el microscopio; continuamos este proceso cuidadosamente, hasta que se revelara la estructura en el microscopio, pues es posible lograr un sobre ataque en la probeta y no conseguiríamos observar la estructura del material y las fallas en el mismo. Una vez que conseguimos observar la estructura la cual se muestra en la fotografía 6.5. y las fallas en el microscopio tomamos las fotografías correspondientes en el mismo.



**Fotografía 6.5.** Estructura metalográfica del composite de cobre y oxido de aluminio  
400X. electrodo.

**Antecedentes.-** Este electrodo trabaja en una punteadora viajera, que hace la soldadura por puntos a dos laminas revestidas con un galvanizado rico en zinc, de un espesor de 0.062" cada una, y utiliza un amperaje de 19,000 A., y una presión de 800 lb. Este electrodo produce por turno aproximadamente 2,500 puntos, con un cambio y dos afiladas, sin embargo, él presentó la formación de un cráter en la superficie de contacto y redujo su vida medio de uso a 700 puntos aproximadamente y se tenía que cambiar, dicha comparación se muestra en la fotografía 6.6.



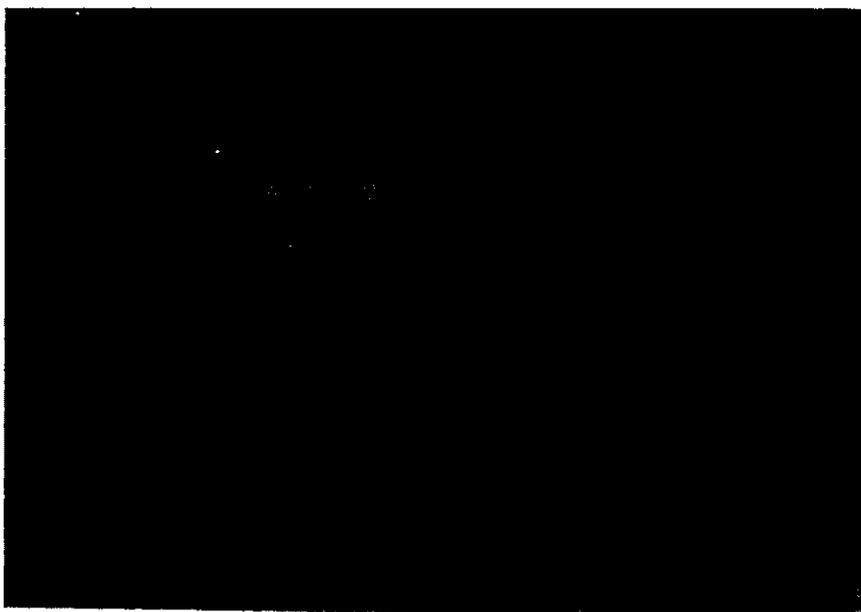
**Fotografía 6.6.** Comparación de la superficie utilizada con una nueva.

## 6.5. RESULTADOS OBTENIDOS

El estudio metalográfico de la investigación muestra una estructura deformada de los cristales del cobre con las partículas de  $Al_2O_3$  en dispersión en toda su masa.

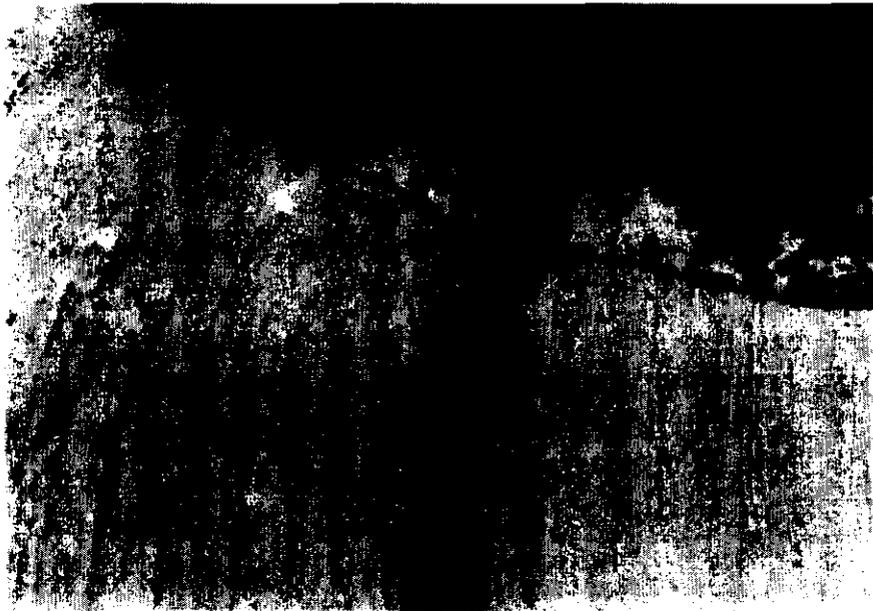
En la zona de la formación del cráter, se presenta una fisura lateral, además una ondulación en toda la superficie del fondo del cráter, en el corte transversal de la falla. Hay que hacer notar que la estructura del cobre se conserva. Se muestra dicha fisura en la fotografía 6.7.

A mayores aumentos se pudo observar la presencia de la aleación de latón (cobre con zinc) unida al cobre del electrodo, haciendo notar también la presencia de esta misma aleación en el interior de la fisura, con pequeñas cantidades del revestimiento de la lamina. También hay que hacer notar que la estructura del cobre, así como la dispersión de la Alumina se conserva. Esta se presenta en la fotografía 6.8.



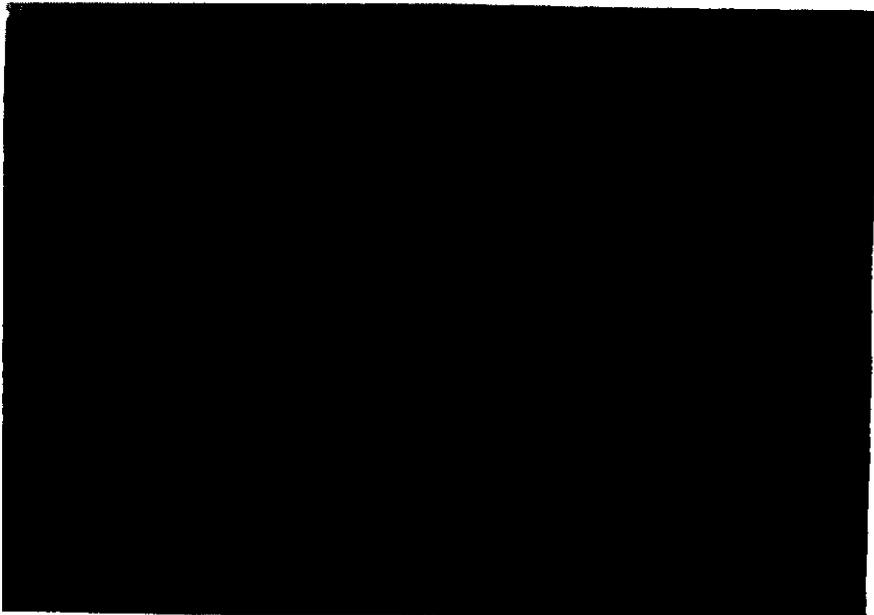
**Fotografía 6.7.** Vista lateral del crater de la superficie del electrodo 100X

La fotografía 6.8. nos presentó con mayor nitidez la presencia en el interior de la fisura de pequeñas partículas del revestimiento en forma esférica o tendiendo ha está, además de la presencia de la aleación en las paredes internas de la fisura así como en la superficie del cráter.



**Fotografía 6.8.** Inicio de la fisura y presencia de la aleación de Cu – Zn. En superficie e interior de ella. Presencia de partículas pequeñas del revestimiento de la lamina en el interior de la fisura 400X.

En la fotografía 6.9. es la parte final de la fisura, donde se observaron las mismas pequeñas partículas del revestimiento de la lamina en forma esférica, las cuales por la resolución de la fotografía son difíciles de observarse.



**Fotografía 6.9.** Fin de la fisura con partículas muy finas en su interior 400X.

## 6.6. ANALISIS DE RESULTADOS

En primer orden de ideas, en todo el estudio metalográfico, se pudo observar que la presencia de la aleación Cu-Zn es permanente y constante, tanto en la superficie del área de contacto como en la formación de la fisura lateral en el cráter formado.

En segundo lugar, se puede apreciar que en todas las fotografías a diferentes aumentos, la estructura deformada en frío del cobre del material composite se conserva, tanto en la superficie del cráter formado así como en la zona lateral de la fisura del fondo del cráter.

En tercer termino, el particulado distribuido de  $Al_2O_3$  en toda la masa del cobre no sufre ninguna alteración en el fondo del cráter así como en las zonas adyacentes a la fisura, en pocas palabras no le pasa nada.

Es importante hacer notar la presencia de las partículas finas, esféricas o casi esféricas del revestimiento de las laminas que son de zinc.

Otro punto importante que resalta, es la presencia en las paredes de la fisura de la aleación de cobre con zinc, la cual se identifica por su color amarillo y que los cristales de cobre cercanos a la aleación siguen sin perder su morfología, cabe hacer notar que la fisura es del tipo intercrystalino.

También existe una deformación de desviación de los cristales de cobre en el fondo del cráter

## **6.7. CONCLUSIONES**

De los resultados obtenidos y el análisis de los mismos concluimos en lo siguiente:

El electrodo sufrió un calentamiento localizado, cuyo calor producido por el paso de la corriente eléctrica en el proceso de soldadura por resistencia, fue lo suficientemente alto para el revestimiento de zinc de la lamina, pero no así para el cobre del electrodo.

Este calentamiento puede tener dos alternativas que son: una generación de calor en la intercara de la lamina y la del electrodo por los fenómenos de la

rugosidad y presión ejercida de los electrodos a la lamina; y dos por el espesor de las laminas a soldar y cuya refrigeración no es suficiente.

Este calor es lo suficientemente alto que funde al galvanizado que permite que se combine con el cobre del electrodo y se produce la aleación de cobre cuyo punto de fusión es menor que el del cobre.

La fisura se puede decir que es provocada por una fractura en caliente por el esfuerzo de compresión, por su forma intercrystalina y zona del particulado de  $Al_2O_3$ , además podemos decir que ha esta causa se sumarían las de, dilatación y contracción de cobre y el ataque por la aleación que se forma de cobre y zinc.

La presencia de la aleación de Cu-Zn en el interior de la fisura, se puede decir que, por la retención del calor hecha por el cobre tiene el tiempo suficiente para que el zinc alcance su punto de fusión y se difunda hacia el interior de la misma para producir la aleación de Cu-Zn.

Por último podemos decir que el calor generado en la intercara del electrodo y la lamina en una zona localizada, así como la presencia del zinc fundido, además con el esfuerzo de compresión y un enfriamiento no adecuado, se genera un desgaste extremadamente fuerte en la superficie del material composite de cobre con  $\text{Al}_2\text{O}_3$  del electrodo.

## **BIBLIOGRAFIA**

ENGINEERED MATERIALS HANDBOOK  
VOLUME 1 COMPOSITES  
ASM INTERNATIONAL

MEL SCHWARTZ  
COMPOSITE MATERIALS HANDBOOK.

INVESTIGACION HOY  
REVISTA MENSUAL DE COMUNICACION CIENTIFICA Y  
TECNOLOGICA  
ENERO FEBRERO 1995  
INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL

REVISTA MANUFACTURA  
GRUPO EDITORIAL EXPANSION  
AÑO 5 NUMERO 39  
MES SEPTIEMBRE 1998

THE SCIENCE AND ENGINEERING OF MATERIALS  
DONALD R. ASKELAND  
ED. PWS. BOSTON

MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING AN INTRODUCTION  
WILLIAM D. CALLISTER JR.  
ED. MC. GRAW HILL BOOK COMPANY INC.

MECHANICAL METALLURGY  
GEORGE E. DIETER  
ED. MC. GRAW HILL BOOK COMPANY INC.

COMPOSITE MATERIALS  
LESLIE HOLLIDAY  
ED. EISEVER PUBLISHING COMPANY

AN INTRODUCTION TO COMPOSITE MATERIALS  
HULL D.  
CAMBRIDGE UNIVERSITY 1986

DICCIONARIO INGLES ESPAÑOL LAROUSE  
ED. LAROUSE

DICCIONARIO ENCICLOPEDICO DE LA SIDERURGIA  
JERONIMO VAZQUEZ LOPEZ  
ED. URMO

MODERN COMPOSITE MATERIALS  
BROUTMAN L.J  
ADDISON - WESLEYPUBLISHING CO.

ESTA TERCERA NO DEBE  
SER DE LA BIBLIOTECA