



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN

**“DISEÑO DE COPLES SIN
SOLDADURA EMPLEANDO
MATERIALES CON MEMORIA DE
FORMA”**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO ELÉCTRICISTA

P R E S E N T A

SALVADOR CABRERA GONZÁLEZ

ASESOR: Dr. JACINTO CORTÉS PÉREZ

MÉXICO

2013





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Jurado asignado

Presidente: Ing. Javier Nava Pérez

Vocal: M. en I. Alberto Reyes Solís

Secretario: Dr. Jacinto Cortés Pérez

Suplente: M. en I. María de Lourdes Marín Emilio

Suplente: M. en I. José Antonio Souza Jiménez

There is a driving force more powerful than steam, electricity and nuclear power: the will.

Albert Einstein

Dedico este trabajo a quienes con esfuerzo y cariño me dieron el apoyo incondicional para llegar a ser lo que soy el día de hoy:

Salvador Cabrera y Guadalupe González

Al amor de mi vida y el impulsor de mí ser:

Ana Karen

A quien le da sentido a mi vida, y me recuerda con su sonrisa que debo luchar a diario para ser el mejor:

Leví, mi gran orgullo.

A mis hermanos, que comparten mis sueños y alegrías:

Oscar y Brenda

A mi amigo que me ha acompañado con su apoyo y amistad hasta el día de hoy:

Ángel Hernández Moreno

A la familia ***Cabrera***, que más que mi sangre son el Oxígeno de mi existir.

Agradecimientos

A mi asesor y formador, que con su ejemplo me enseñó que un ingeniero nunca deja de estudiar:

Dr. Jacinto Cortés Pérez.

A mis compañeros y amigos del laboratorio de mecánica aplicada, quienes son parte de mi formación y colaboraron en este trabajo:

Rodrigo Montalvo, Rodrigo Lechuga, Carlos Reséndiz, Iván Leos, Ángel Romero, German Velázquez, Francisco de Matías.

De manera especial a:

M. en I. J. Alejandro Ríos Cortés y M. en I. F. Néstor García, por dedicarle tiempo a la revisión de este trabajo.

Agradezco al Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología (COMECyT) por el apoyo otorgado en el *Programa Becas Tesis de Licenciatura y Posgrado* del COMECYT 2012.

Investigación realizada gracias al Programa de Apoyo a Proyectos de Innovación e Investigación Tecnológica (PAPIIT) de la UNAM, IN111310, *“Estudio y desarrollo de aplicaciones empleando materiales con memoria de forma”*. Agradezco a la DGAPA-UNAM la beca recibida.

Índice

Introducción.....	i
Capítulo 1. Generalidades de los materiales con memoria de forma.....	1
1.1 Materiales con memoria de forma.....	1
1.1.1 Transformación martensítica.....	2
1.1.2 Efectos asociados de los MMF.....	6
1.1.3 Comportamiento mecánico de los MMF.....	9
1.1.4 Anisotropía mecánica.....	11
1.2 Aleaciones con memoria de forma base cobre.....	12
1.2.1 Parámetros del Cu-Al-Be.....	14
1.3 Modelo matemático empleado.....	18
1.4 Aplicaciones de los materiales con memoria de forma.....	21
1.4.1 Coples sin soldadura.....	21
Capítulo 2. Diseño de coples sin soldadura.....	26
2.1 Métodos de unión y ensamble.....	26
2.1.1 Procesos de unión.....	26
2.2 Deformaciones de la tubería.....	32
2.2.1 Deformación del cople.....	34
2.2.2 Deformación del tubo.....	35
2.2.3 Carga de fricción en la junta.....	36
2.3 Diseño de Coples.....	38
2.3.1 Caracterización de materiales.....	38
2.4 Eficiencia de la unión.....	42
Capítulo 3. Resultados y discusión.....	46
3.1 Método de fabricación.....	46
3.1.1 Coples fabricados.....	47
3.2 Proceso de instalación del cople.....	52
3.2.1 Métodos de fabricación en serie.....	57
3.2.2 Recomendaciones para su aplicación.....	58
Conclusiones.....	60
Referencias.....	61

Introducción

Es claro que en la práctica de la ingeniería mecánica, a menudo se deben diseñar redes de tuberías que emplean accesorios para unir tramos que generalmente son de 6m de longitud. Entre los métodos más comunes para unir tramos de tubería se encuentran los procesos como soldadura o sujeción mecánica. Dichos procesos, ocupan más de 2 piezas dentro de la junta, materiales de aporte, herramientas complicadas, además de requerir métodos de prueba de inspección de la unión. Así mismo, estos procesos implican la adición de componentes que elevan el peso bruto del sistema de tubería.

Existen sistemas de tubería en donde se requiere un proceso de unión libre de partículas de corte, calor, fundente o productos de la soldadura que ocasionen la contaminación dentro del sistema. Así mismo, en otros casos se requiere o desacoplar juntas en lugares donde la tubería se encuentra confinada ó donde se podría causar un incendio por emplear la unión por soldadura.

Actualmente existen sistemas de unión que funcionan de manera distinta a las uniones tradicionalmente empleadas. Este tipo de juntas utilizan un tipo de materiales no convencionales denominados Aleaciones con Memoria de Forma (AMF). Estos materiales se caracterizan porque son capaces de recuperar su forma original después de haber sido deformados de una manera aparentemente plástica al ser calentados por encima de una temperatura crítica.

Existen justas sin soldadura que emplean aleaciones de Ni-Ti con memoria de forma que están siendo comercializadas por empresas como Aerofit INC., Smart Tap. INC., entre otras. Este sistema ofrece conexiones de tubería libres de fugas, en espacios reducidos, sin utilizar herramientas caros y complicados. Este tipo de coples se ha implementado en sistemas de tubería de la industria aeronáutica, naval, militar, aeroespacial y en algunas aplicaciones de ductos comerciales de la industria química, combustibles y gases medicinales.

No obstante su funcionalidad, los coples fabricados con Ni-Ti son costosos debido a que el titanio es un material caro, sin embargo, existen aleaciones de cobre que presentan memoria de forma y que pueden ser empleadas en determinadas aplicaciones.

En este trabajo se presenta el diseño de un prototipo de cople sin soldadura empleando una aleación de memoria de forma Cu-Al-Be, con el propósito de mostrar una alternativa de junta diferente a las conexiones usualmente aplicadas en la industria.

Es importante mencionar que el comportamiento mecánico de los materiales con memoria de forma es considerablemente más complejo que el de los materiales convencionales ya que es: no lineal, histerético, dependiente de la temperatura y altamente anisotrópico. Considerando lo anterior para diseñar el cople sin soldadura es necesario contar con un modelo matemático capaz de simular el comportamiento mecánico de las AMF en función de los parámetros de diseño. Aunque existen muchos modelos que simulan el comportamiento de las AMF, la mayoría resultan complejos y por lo tanto difíciles de aplicar. No obstante, se ubicó un modelo ingenieril muy simple desarrollado en México que fue empleado para dicho fin.

Este trabajo se divide en 3 capítulos. El primer capítulo denominado “Generalidades de los materiales con memoria de forma”, presenta una reseña de las aleaciones con memoria de forma, características, comportamiento mecánico, efectos asociados, una breve descripción de las aleaciones base cobre, aplicaciones de las aleaciones con memoria de forma, y se presenta el modelo matemático empleado en el presente trabajo para simular el comportamiento de un material con memoria de forma.

El capítulo 2 “Diseño de coples sin soldadura” presenta métodos de unión y ensamble de los cuales se incluye las juntas soldadas y uniones mecánicas. Después se analiza el comportamiento de la junta para definir los parámetros de diseño y finalmente, se muestra una simulación de operación del cople con memoria de forma empleando el modelo propuesto en el capítulo 1.

El capítulo 3 “Resultados y discusión” describe la obtención del material, manufactura y caracterización del prototipo fabricado así como una serie de pruebas realizadas a los prototipos de coples fabricados. Al final se analiza la factibilidad de escalamiento industrial: aplicaciones y proceso de manufactura propuesto para el prototipo.

Capítulo 1. Generalidades de los materiales con memoria de forma.

Los llamados Materiales con Memoria de Forma (MMF) son aquellos que poseen la capacidad de recuperar su forma original después de haber sido deformados de manera aparentemente plásticas con un simple calentamiento [1]. De hecho, dicho comportamiento es denominado “efecto memoria de forma” en alusión a los materiales que lo presentan.

Actualmente, se sabe que algunos materiales cerámicos, polímeros y aleaciones metálicas presentan el efecto de memoria de forma. Estos materiales son también llamados inteligentes ya que pueden ser utilizados como sensores y actuadores a la vez. Esta capacidad simplifica de manera considerable diversos diseños que de otra manera serían mucho más complejos.

Los MMF que se mencionan en este capítulo son aleaciones metálicas como Ni-Ti y Cu-Al-Be, entre otras.

Por sus características especiales, estos materiales han sido utilizados en diversas aplicaciones tales como: actuadores, antenas de teléfonos celulares, alineación de dientes, válvulas, manos de robot, etc. y más recientemente en sistemas de recuperación de energía [2]. En el presente trabajo se detalla una aplicación ingenieril utilizando un MMF en la unión de coples sin soldadura por lo que en este primer capítulo se presenten de manera breve, los fundamentos teóricos básicos de dichos materiales.

1.1 Materiales con memoria de forma.

El desarrollo de las aleaciones con memoria de forma tiene su origen en el año de 1932, cuando A. Olander descubrió el efecto súper-elástico en una aleación de Au-Cd y posteriormente en 1938 Greninger y Mooradian observaron la aparición y desaparición de la fase martensítica a medida que crecía y decrecía la temperatura en una aleación de Cu-Zn.

Los fundamentos del efecto de memoria gobernado por el comportamiento termoelástico de la martensita, fue extensamente explicado una década más tarde por Kurdjumov Y Khandros y también por Chang y Read en 1951. Pese a estos descubrimientos, el más importante se realizó en 1962, cuando Behuer y sus colaboradores, en el Naval Ordnance Laboratory, desarrollaron una aleación de Ni-Ti con un efecto de memoria de forma aún más acentuado que el observado en la aleación de Au-Cd y denominaron a la nueva aleación con el nombre de Nitinol (derivado de Nickel Titanium Naval Ordnance Laboratory) [1].

La primera aplicación a gran escala de los MMF se da en 1971, cuando se diseñó un conector para una conexión hidráulica hecha de titanio en el helicóptero Grumman F-14. Éste es un ejemplo clásico de cómo los MMF pueden ser aplicadas a las necesidades de un mercado real a gran escala. Actualmente se cuenta con un número considerablemente grande de aplicaciones y a pesar de que muchas de ellas no fueron o han sido aplicadas a gran escala otras se han desarrollado totalmente, tal es el caso de los "stents", que son geometrías, similares a la de un tubo, compuestas con una maya de alambre de Ni-Ti. Los *stents* se emplean como prótesis destinadas en restablecer el flujo en conductos corporales afectados por estenosis.

Otro ejemplo de aplicación fue la decisión de hacer las tuberías hidráulicas de titanio por su alta resistencia y el aligeramiento de peso que se obtiene usándolo, pero se presentaron problemas al momento de diseñar un conector fiable para la carga de combustible, para el efecto la compañía Thermofit® desarrolló un conector a base de polímeros, pero era poco confiable, por lo que la compañía Cryofit® desarrolló sus conectores de Ni-Ti, los cuales se acoplaban al tubo a temperatura ambiente y se desacoplaban cuando se les enfriaba con nitrógeno líquido, con lo cual Cryofit® logró colocar a los MMF como una alternativa de solución confiable y económicamente factible (aunque aún muy costosa para el uso general) para resolver el problema de carga de combustible en aeronaves de uso militar [1].

Los MMF presentan una serie de efectos, que será explicados posteriormente, asociados a una transformación de fase denominada: transformación martensítica de tipo termoelástica que ocurre en el material. Como se verá más adelante, dicha transformación se puede inducir en el MMF por esfuerzo, temperatura, o la combinación de ambos. La fase martensita que aparece en los MMF parte de una fase madre llamada fase austenita. Dicha transformación es reversible y ocurre de en un intervalo de temperatura acotado por ciertos valores críticos que dependen de la composición del material [1] y del tamaño de grano en materiales policristalinos [3].

1.1.1 Transformación martensítica.

Actualmente la definición más aceptada para la transformación martensítica es la publicada por Olson, Cohen y Clapp: "Es una transformación por desplazamientos, de primer orden, con una deformación homogénea de red constituida principalmente por una deformación cortante" [4].

El término desplazamiento se debe a que los átomos, que dan lugar a la estructura cristalina, se mueven cooperativamente distancias menores al parámetro de red.

Lo anterior origina la aparición de la nueva fase, en estado sólido, sin cambio en la composición química. La transformación martensítica por desplazamiento se caracteriza por ser de primer orden ya que se acompaña de una discontinuidad en propiedades como el volumen, la presión, etc. También se considera de primer orden por la existencia de una histéresis y porque las dos fases involucradas coexisten y se diferencian claramente una de la otra.

El cambio de la estructura cristalina del material durante la transformación martensítica se manifiesta mediante una deformación homogénea de la red cristalina. Dicha deformación causa un cambio de forma, perceptible a nivel macroscópico en la superficie de la muestra. La transformación martensítica se puede inducir a partir de una fase madre llamada austenita, por temperatura, esfuerzo o una combinación de ambos así como por la aplicación de campos magnéticos [5].

En la Figura 1.1 se ilustra cómo a cada fase le corresponde un acomodo propio de la red cristalina, partiendo de la fase austenita hacia la fase martensita. Aunque existen varias estructuras de las fases austenita y martensita, en términos generales la primera presenta estructuras de simetría cúbica mientras que las martensitas presentan estructuras de las denominadas de largo período como la ortorrómbica, monoclínica, triclínica, etc.

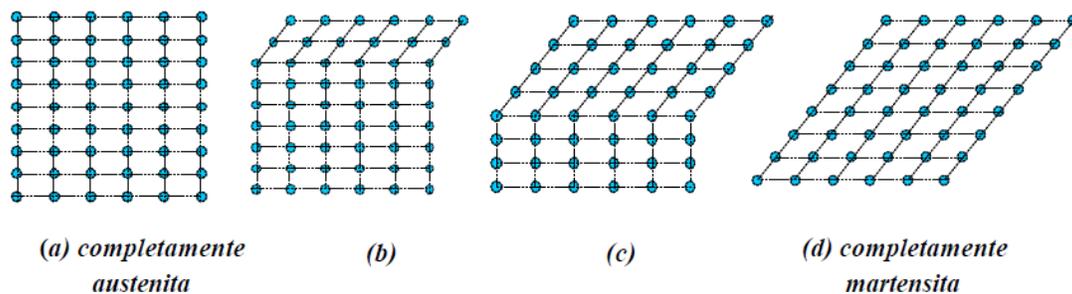


Figura 1.1. Muestra bidimensionalmente del desplazamiento atómico de los átomos durante la transformación martensítica [6].

En la transformación por desplazamiento, como es el caso de la transformación martensítica, no se requieren grandes desplazamientos y en este caso los átomos se reacomodan para llegar a una nueva estructura cristalina más estable pero sin cambiar la naturaleza química de la matriz. Dado que no se necesita una migración atómica, estas transformaciones por desplazamiento generalmente son independientes del tiempo y el movimiento de la inter-fase entre las dos fases es tremendamente rápido.

En los MMF, a diferencia de lo que ocurre en otros tipos de transformaciones martensíticas, se presenta un mecanismo de auto acomodado llamado: “formación de variantes auto acomodantes”. Dicho mecanismo consiste esencialmente en que las variantes de martensita que aparecen en el material se orientan de tal manera que se compensa la deformación de una con la de otra que se orientó en dirección opuesta. En los MMF la transformación martensítica es de tipo termoelástica, a diferencia de otras transformaciones martensíticas observadas principalmente en aceros, por lo que progresa sólo si disminuye la temperatura en el material y se recupera en cuanto la temperatura incrementa. Así mismo, es importante mencionar que cualquiera de las variantes de martensita que se forme en el material recuperará la estructura de la fase austenita que la originó. En la Figura 1.2 se ilustra la formación de estas variantes debido a la Transformación Martensítica inducida por Enfriamiento.

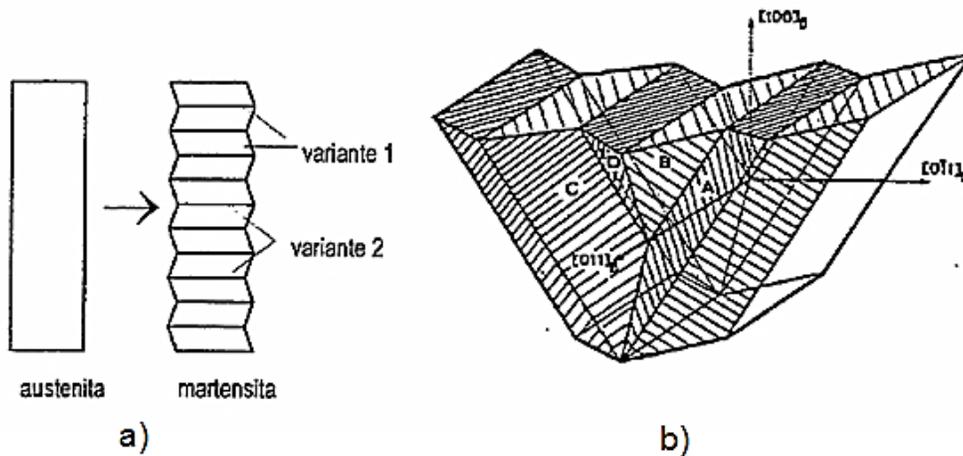


Figura 1.2. Diagramas que muestran el mecanismo de auto acomodado que se presenta en los MMF durante la transformación martensítica inducida por enfriamiento: (a) Diagrama bidimensional y (b) diagrama tridimensional [7].

Asociadas a la transformación martensítica, existen cuatro temperaturas críticas que marcan el inicio y el final de la transformación martensítica, así como de la transformación inversa. En la Figura 1.3 se muestra un gráfico donde se aprecian estas temperaturas y la fracción volumétrica de material transformado. En general, se considera que la transformación ha iniciado, ya sea austenita-martensita o martensita-austenita, cuando el 10% del material ha transformado y se considera finalizada cuando se completa el 90%.

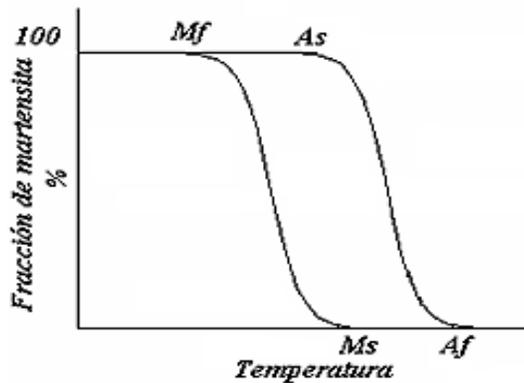


Figura 1.3 Temperaturas de transformación M_s, M_f, A_s, A_f .

Como se mencionó anteriormente, la transformación martensítica puede inducirse por enfriamiento, esfuerzo o combinación de ambos. En la Figura 1.4 se muestra un diagrama esfuerzo-temperatura-transformación en el que se muestran los casos anteriores, es decir: a) Sin esfuerzo aplicado en el material la transformación se induce sólo por enfriamiento, b) Estando a una temperatura mayor que A_f , la transformación se induce por esfuerzo y c) aplicando un esfuerzo constante, o variable, al enfriar la muestra la transformación martensítica inicia en M_s^σ y termina en M_f^σ .

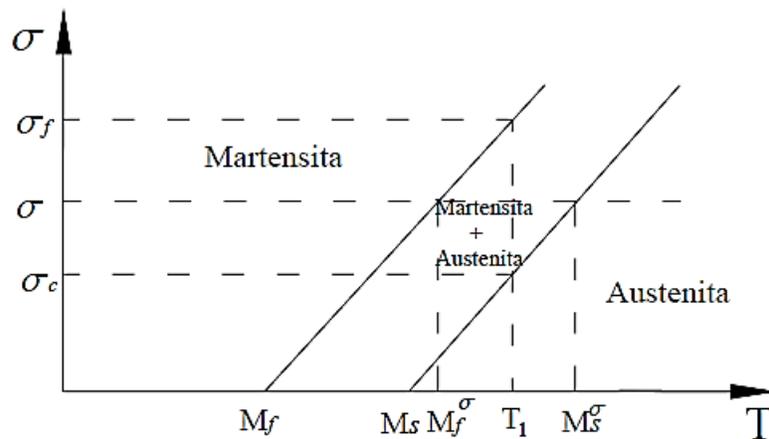


Figura 1.4. Diagrama: esfuerzo-temperatura-transformación que muestra las tres formas de inducir la transformación martensítica.

En realidad los diagramas esfuerzo-temperatura-transformación son propios de cada aleación con memoria de forma y muestran los tipos de transformaciones que presenta el material correspondiente. Considerando lo anterior, es claro que el diagrama de la Figura 1.4 es genérico.

1.1.2 Efectos asociados de los MMF.

Como se mencionó anteriormente, existen varios efectos asociados a los MMF entre los cuales se encuentran: a) El efecto de memoria de forma simple, b) el doble efecto memoria de forma y c) la súper-elasticidad, entre otros.

Efecto memoria de forma simple

En la Figura 1.5 se representa, de manera macroscópica, el llamado efecto memoria de forma simple.

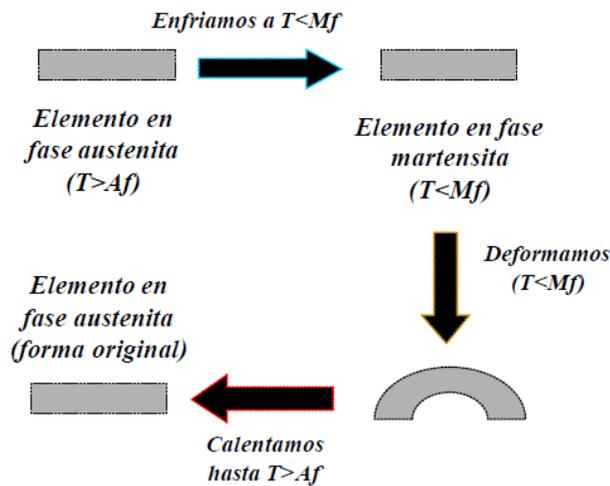


Figura 1.5. Ilustración del efecto memoria de forma simple [6].

Como se mencionó anteriormente, y se aprecia en la Figura 1.5, el efecto memoria de forma simple es la capacidad que tiene un MMF para deformarse de manera aparentemente plástica al aplicarle un esfuerzo a una temperatura baja, menor a M_f , y recuperar su forma original mediante un simple calentamiento por encima de la temperatura A_f .

En la Figura 1.6 se muestra, el efecto memoria de forma simple donde se ve claramente que cuando la transformación martensítica es inducida sólo por enfriamiento, hasta una temperatura menor a M_f , el material conserva su forma macroscópica (1, 2) debido a que se presenta un mecanismo denominado: “formación de variantes auto-acomodantes”. Si a esta temperatura se aplica una carga que induce cierta deformación, sólo parte de ella se recupera al retirar la carga cambiando la forma macroscópica del material (2, 3, 4) debido a que se presenta un fenómeno llamado “condensación de variantes favorecidas por el esfuerzo”. Si se incrementa la temperatura por encima de A_f el material recuperará su forma original (4, 1) debido a que fuera cual fuere la variante de martensita que se indujo a baja temperatura, todas ellas regresan a la fase austenita.

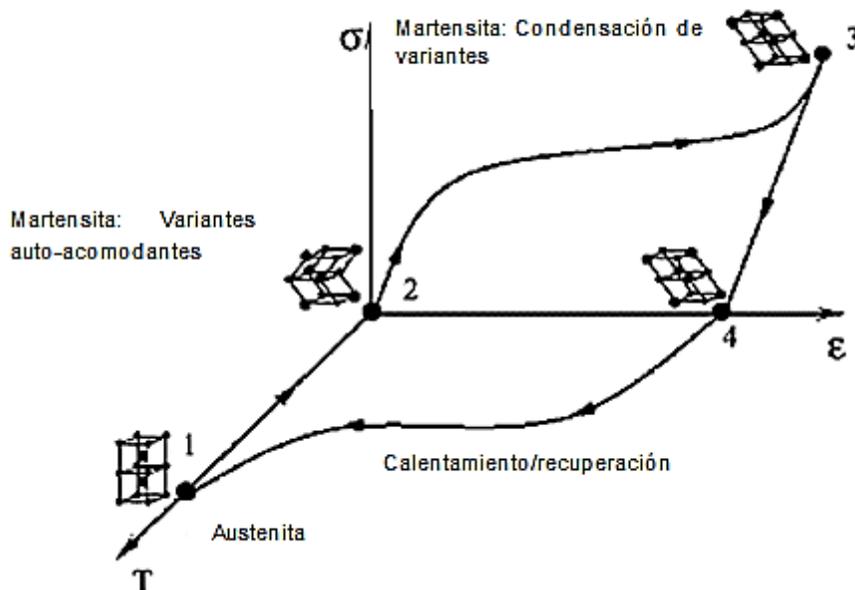


Figura 1.6. Esquema esfuerzo-deformación-temperatura, cambios cristalográficos durante el efecto memoria de forma [8].

El efecto súper-elástico consiste en que si el material se encuentra a una temperatura mayor que la temperatura crítica A_f , es capaz de experimentar deformación elástica hasta 100 veces mayor que la que pueden experimentar los materiales convencionales al aplicarle un esfuerzo. En este caso, la transformación martensítica es inducida por esfuerzo y en el caso de monocristales, las variantes de martensita que aparecerán serán aquellas más favorecidas por el esfuerzo aplicado [2]. En este caso, la transformación se puede apreciar como una meseta en la curva esfuerzo-deformación como la que se muestra en la Figura 1.7 cuya magnitud es llamada deformación transformacional y depende de la orientación cristalina del material. El esfuerzo al cual aparece la meseta es llamado esfuerzo crítico y depende de la temperatura de prueba, la orientación cristalina del material y el MMF [2].

En el caso de policristales, se presentan una serie de efectos asociados a la micro-estructura que hacen más complejo aún el comportamiento del material [9, 10, 11]. En lugar de observar una meseta en la curva esfuerzo-deformación, se observa un cambio de pendiente y el valor de esfuerzo crítico es fuertemente influenciado por el tamaño del grano [12, 13]. La deformación transformacional prácticamente no se aprecia en la curva esfuerzo deformación de los MMF policristalinos y en general el comportamiento es prácticamente impredecible.

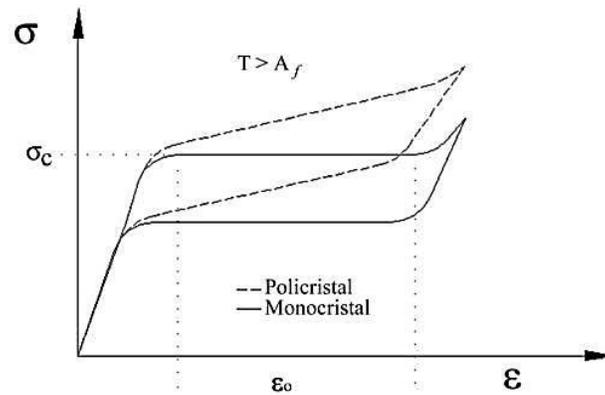


Figura 1.7. Efecto súper-elástico: -- material policristalino y — material monocristalino [5].

Doble efecto memoria de forma

El doble efecto de memoria de forma consiste en que el material toma dos formas predeterminadas al pasar por ciertas temperaturas críticas A_f y M_f respectivamente. Dicho efecto puede conseguirse de dos formas diferentes:

- a) Calentando y enfriando el material estando sujeto a una carga que puede ser constante o variable
- b) Después de someter al material a un proceso llamado “educación” el material toma las dos formas sin necesidad de aplicar carga alguna. Este proceso puede consistir en ciclos de memoria de forma simple, súper-elásticos o del calentamiento y enfriamiento como se describió en el inciso a). Estos tratamientos de “educación” inducen micro-tensiones en el material que tienden a alterar la nucleación y el crecimiento de grano de la fase martensita causando que algunas variantes se formen preferencialmente [6].

En la Figura 1.8 muestra esquemáticamente el doble efecto de memoria de forma y la comparación con el efecto de memoria de forma simple.

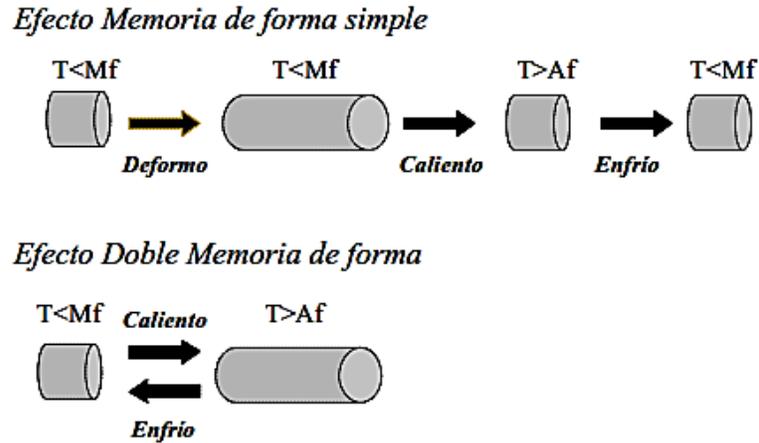


Figura 1.8. Comparación de la memoria de forma simple y doble [6].

1.1.3 Comportamiento mecánico de los MMF.

Como se describe más adelante, el comportamiento mecánico de los MMF es considerablemente más complejo que el de los materiales convencionales como los aceros, las aleaciones de aluminio y cobre. En términos generales, el comportamiento de los MMF es no lineal, dependiente de la temperatura, histerético y altamente anisotrópico. Si el material es policristalino, además de los rasgos anteriores, se sabe que influyen en su comportamiento parámetros microestructurales como el tamaño y forma del grano así como la posible textura cristalina. Es claro que para diseñar dispositivos que aprovechen las propiedades de los MMF es necesario contar con modelos matemáticos que consideren todos los rasgos anteriores y que nos permitan simular su comportamiento en función de la carga aplicada y la temperatura de prueba.

En forma muy resumida en la Figura 1.9 se muestra un diagrama esfuerzo-deformación-temperatura donde se aprecian los diferentes comportamientos observados en una aleación de Ni-Ti con memoria de forma [2].

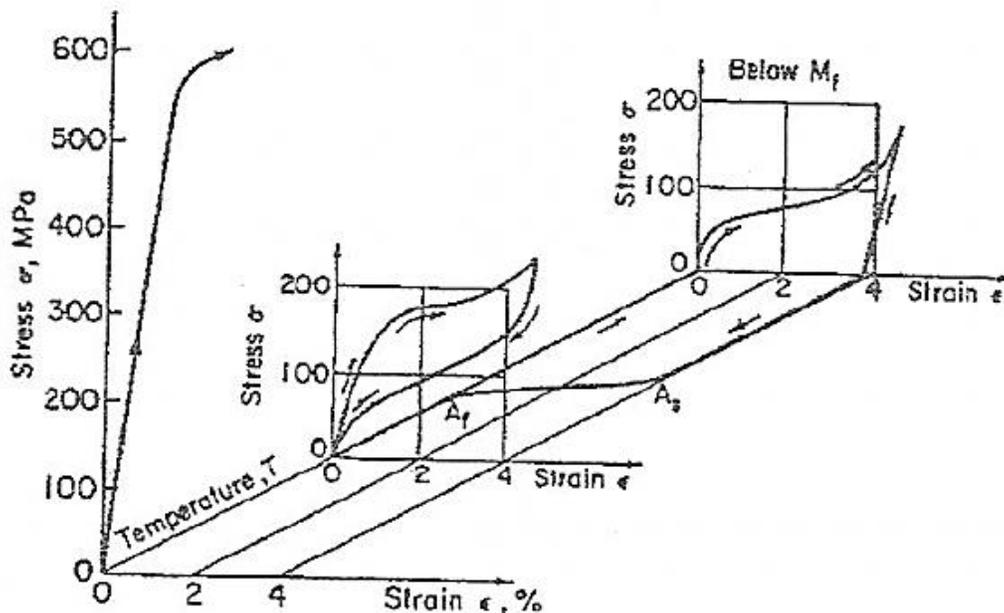


Figura 1.9. Comportamiento mecánico a diferentes temperaturas que presentó una aleación de Ni-Ti con memoria de forma [2].

Se puede observar que a una temperatura menor que M_f , si el material es cargado y descargado, persiste una deformación aparentemente plástica que es recuperada al calentar el material por encima de la temperatura A_f . Como se describió en la sección 1.1.2 este comportamiento corresponde con el llamado: “efecto memoria de forma simple”.

Por otro lado, también en la Figura 1.9 se aprecia que si el material se encuentra a una temperatura mayor que A_f el material presenta el comportamiento denominado súper-elástico que fue descrito en la sección 1.1.2. Como se describió anteriormente, el comportamiento súper-elástico corresponde con la transformación martensítica inducida por esfuerzo, la cual se puede inducir a diferentes valores de esfuerzo crítico (σ_c) los cuales se rigen por la razón de Clasiuss-Clapeyron la cual depende de la AMF que se trate. En la Figura 1.10 se muestran una serie de curvas esfuerzo-deformación correspondientes a una aleación monocristalina de Cu-Zn-Al [15] sometida a cargas de tensión uniaxial a distintas temperaturas $T > A_f$. Se observa que el valor del esfuerzo crítico (σ_c), cambia con la temperatura lo que es congruente con el diagrama esfuerzo-temperatura- transformación mostrado en a Figura 1.9.

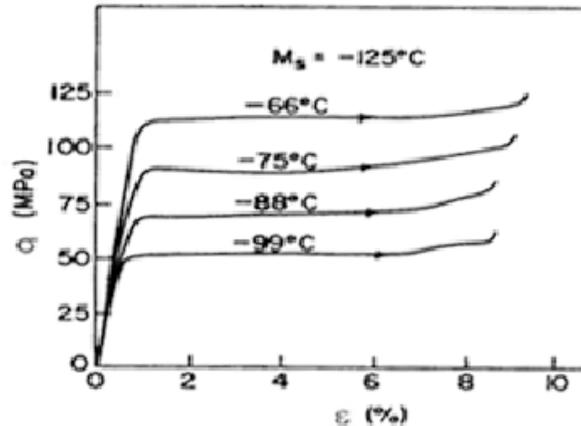


Figura 1.10. Comportamiento esfuerzo-deformación correspondiente a una muestra de Cu-Zn-Al con memoria de forma sometida a pruebas de tensión uniaxial a diferentes temperaturas $T > M_f$ [15].

Finalmente, en diagrama de la Figura 1.10 se aprecia que si la temperatura de prueba es mayor a cierto valor M_s el comportamiento es igual que cualquier material convencional.

1.1.4 Anisotropía mecánica.

Además de la no linealidad y la dependencia de la temperatura del comportamiento de los MMF otro rasgo particular que lo hace especialmente complejo es la alta anisotropía mecánica que presentan. Dicha anisotropía se presenta en tres formas diferentes:

- a) En las propiedades elásticas de la fase austenita,
- b) En el esfuerzo de transformación y
- c) En la deformación transformacional.

La anisotropía que se relaciona con la fase austenita está asociada a la simetría que presenta dicha fase, la cual, es del tipo cúbica centrada en el cuerpo (CCC). Como se sabe, un cristal de este tipo contiene tres ejes de simetría diferentes lo que trae como consecuencia que el número mínimo de constantes elásticas necesarias para describir su comportamiento, es tres y no dos como ocurre con los materiales isótropos [2]. Según se ha reportado en la literatura, la fase austenita de diversos MMF presenta coeficientes anisotrópicos que varían entre 11 y 15. Como consecuencia, el módulo elástico de la fase austenita presenta variaciones que van de 23 a 230 GPa cuando la orientación de la muestra cambia de la dirección $[001]$ a la $[11\bar{1}]$ [2].

La anisotropía asociada al esfuerzo transformacional se refiere a una fuerte dependencia de la magnitud del esfuerzo crítico con la orientación del material.

Dichas variaciones se deben a que la transformación martensítica inducida por esfuerzo inicia cuando el esfuerzo de corte aplicado sobre un elemento del Sistema de Transformación alcanza el valor crítico para la temperatura de prueba. Considerando que existen 24 elementos de transformación, que corresponden con las 24 posibles variantes de martensita que se pueden formar en un MMF, es necesario calcular el esfuerzo de corte inducido por la carga de tensión aplicada en cada uno de los elementos de transformación. Generalmente se usa el Factor de Schmid (FS), o bien el Factor de Taylor (FT) que es su recíproco, para determinar la componente de corte (sobre un plano predeterminado) que es generado por una carga de tensión aplicada [2]. Para calcular el FS es necesario conocer la orientación del eje de aplicación de la carga, así como los índices de Miller de cada elemento del Sistema de Transformación. En estados de esfuerzos biaxiales, se emplea el FT para construir diagramas de transformación análogos a los que se emplean en teoría de cedencia de materiales convencionales.

Finalmente, la anisotropía asociada a la deformación transformacional se refiere a una variación severa de esta magnitud con la orientación que se ha observado en las curvas esfuerzo-deformación en muestras monocristalinas de diversos MMF sujetos a tensión uniaxial [2]. Diversos autores han reportado dicho efecto y han encontrado una fuerte correlación con el FS [2] lo cual es razonable ya que se trata de una proyección de la deformación de corte en el sistema de observación [16].

Es importante mencionar que, recientemente se ha encontrado que en el caso de MMF policristalinos el comportamiento de los granos independientes difiere considerablemente del que presentan los granos en conjunto debido a que se presentan las llamadas interacciones inter-granulares. En términos generales, dichas interacciones tienden a ser disminuidas o eliminadas por un mecanismo de “acomodo” que altera considerablemente el comportamiento de los granos aislados [11].

1.2 Aleaciones con memoria de forma base cobre.

Según se ha reportado en la literatura, los MMF de Ni-Ti presentan mejores propiedades de memoria de forma que otros MMF como las de base cobre. No obstante, las aleaciones de Ni-Ti resultan costosas en comparación con las de cobre, por lo que en los últimos años se han realizados esfuerzos importantes para desarrollar MMF de cobre con buenas propiedades. De hecho, como se describe posteriormente, en el presente trabajo se emplea una aleación de Cu-Al-Be para fabricar coples sin soldadura.

En un principio los MMF base cobre presentaban algunos problemas relacionados con fallas inter-granulares, debido al crecimiento de grano que generalmente se obtiene durante los tratamientos térmicos que se requieren para adquirir sus propiedades. Los problemas de crecimiento de grano han sido superados gracias

al desarrollo de refinadores, y en la actualidad las aleaciones de base cobre son más competitivas que las aleaciones de Ni-Ti, sobre todo cuando son utilizadas como actuadores termo-mecánicos en los que tradicionalmente se usaban bi-metales (termostatos, etc.)[17]. Los principales sistemas binarios que conforman estas aleaciones son: Cu-Zn, Cu-Al, Cu-Sn las cuales se presentan en la Figura 1.11 con un tercer elemento, que permite el afino de grano.

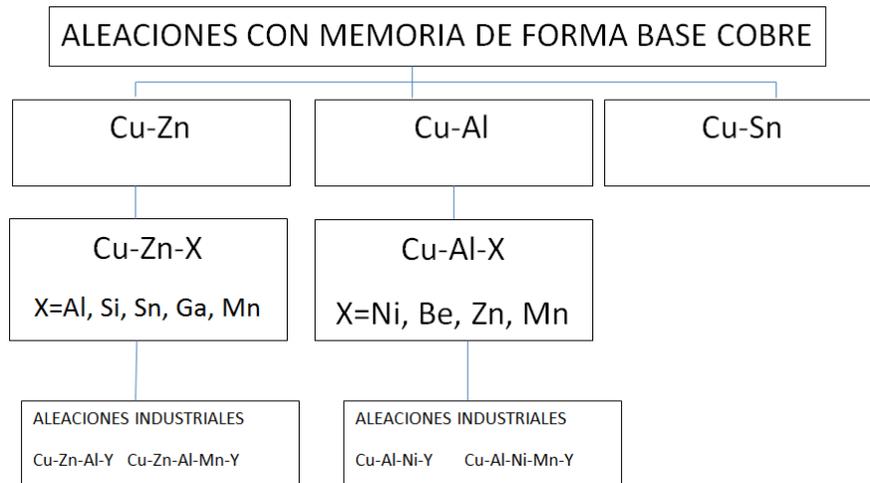


Figura 1.11 Esquema de las aleaciones base cobre conocidas [17].

Cabe destacar que la adición de un tercer elemento al sistema Cu-Al permite controlar las temperaturas críticas de transformación de una manera relativamente fácil, en un rango de temperaturas que van desde -150°C hasta 150°C [5]. Esto también permite que la mezcla de componentes sea homogénea.

En los diagramas de fase de las aleaciones base cobre con memoria de forma, se presenta una fase homogénea estable a alta temperatura que es la fase β . Esta fase tiene una estructura cristalina cubica centrada en el cuerpo (BCC) y es templada a temperaturas cercanas a la ambiente y posteriormente experimenta la transformación martensítica al ser enfriada por de debajo de la temperatura crítica M_f que depende de la composición química de la aleación.

Este tratamiento térmico es llamado *Betatizado*, y tiene como finalidad congelar la fase β , estable a alta temperatura, a temperatura ambiente. En realidad, se temple el material en agua a 100°C y luego se deja enfriar al aire hasta alcanzar la temperatura ambiente. La estructura de la fase β obtenida mediante el templado a 100°C es ordenada lo cual permite que las temperaturas críticas se estabilicen y favorece la transformación en martensita con baja histéresis y alta deformación transformacional. En la Figura 1.12 se muestran diferentes tipos de estructuras cúbicas centradas en el cuerpo tanto ordenadas como desordenadas.

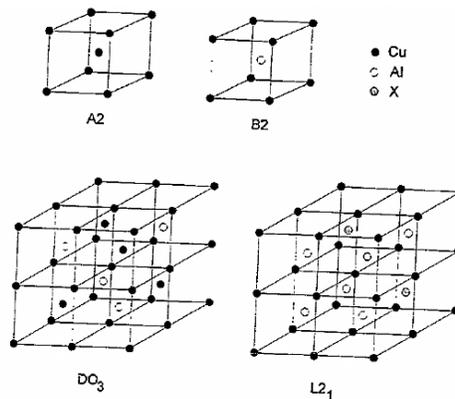


Figura 1.12 Ordenamiento de los elementos en la aleación. [18]

En aleaciones binarias este orden corresponde a estructuras del tipo *B2* o *DO3*, mientras que en aleaciones ternarias se presenta adicionalmente orden del tipo *L2*. Por su parte la fase beta desordenada es conocida como *A2* [17]. La fase *DO3* se compone de 8 celdas donde los átomos de aluminio se alternan en la red de átomos de cobre.

Como se mencionó anteriormente, estas aleaciones en la fase austenita presentan un grado alto de anisotropía mecánica, como es el caso particular del módulo elástico. Según se ha reportado en la literatura el Módulo de Young puede variar de 20 a 200GPa dependiendo de la orientación cristalina en que se considere. Esto también afecta a la deformación transformacional, ya que dependiendo de la orientación cristalina hay una variación del porcentaje de deformación transformacional que van de más del 8% hasta menos de 1 % [19].

1.2.1 Parámetros del Cu-Al-Be.

Como se describe detalladamente en el siguiente capítulo, el material que se empleó para diseñar el cople sin soldadura del presente trabajo es una aleación de Cu-12%Al-0.6%Be la cual presenta propiedades de memoria de forma [20] ya que es considerada hoy en día la AMF de cobre con mejores propiedades de memoria de forma.

En la Figura 1.13, se muestra el diagrama esfuerzo-temperatura-transformación correspondiente al Cu-Al-Be donde se ve claramente que la transformación que se induce por esfuerzo es del tipo $\beta \rightarrow \beta'$ por lo que la razón de Clausius-Clapeyron es de $1.9 \frac{MPa}{^{\circ}C}$. Así mismo, en la Figura 1.14 se pueden ver tres diagramas estereográficos que muestran la variación del módulo de Young, del Factor de Schmid y de la Deformación Transformacional de las aleaciones de Cu-Al-Be. Finalmente, en la Figura 1.15, se muestran los diagramas de transformación martensítica para estados de esfuerzos planos.

Por otro lado, Belkhala [21] propuso una ecuación para determinar la temperatura crítica M_s en función de la composición para aleaciones de Cu-Al-Be:

$$M_s (\text{°C}) = 1245 - 71\%Al - 893\%Be$$

Cabe destacar que recientemente, se ha encontrado que en materiales policristalinos, el tamaño de grano influye de manera importante en las temperaturas críticas del material [3].

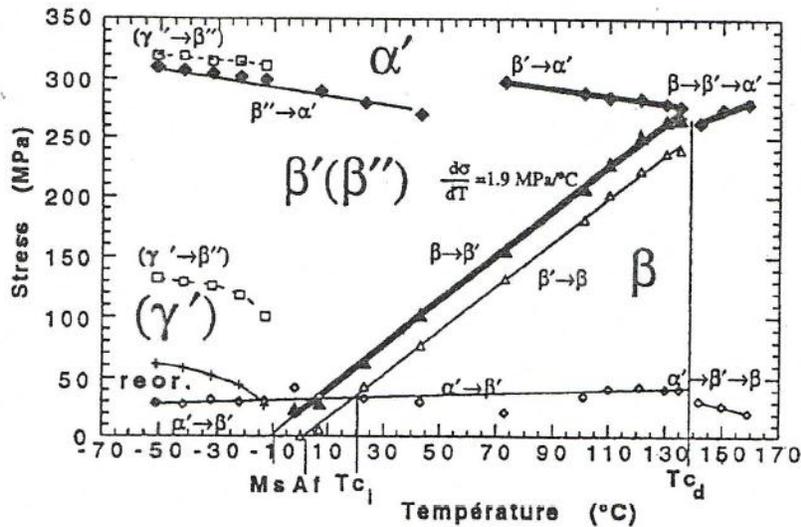
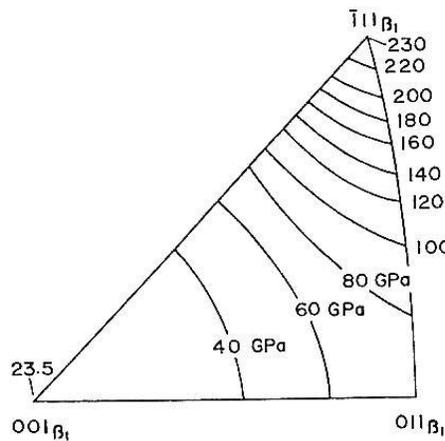


Figura 1.13. Diagrama esfuerzo-temperatura transformación para el Cu-Al-Be. [17]



(a)

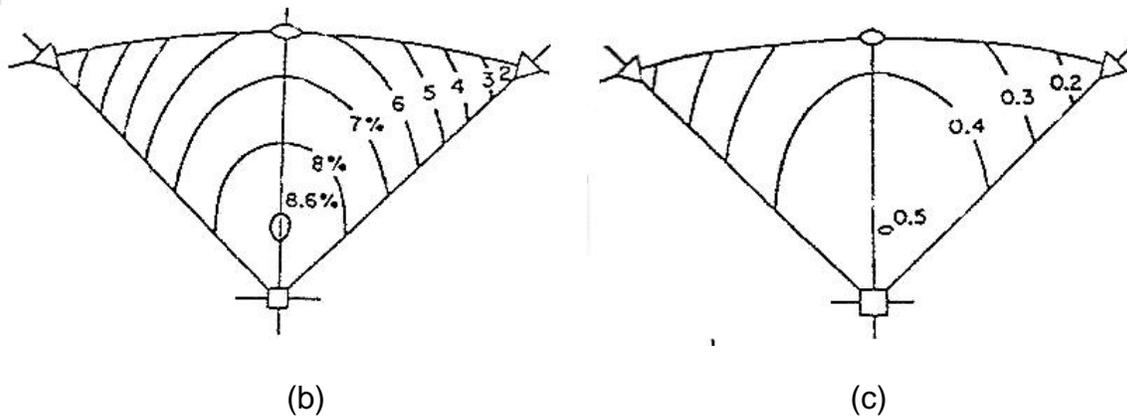


Figura 1.14. Variación con la orientación de: a) Módulo de Young, b) Deformación transformacional y c) Factor de Schimid para una transformación tipo $\beta \rightarrow \beta'$ presente en el Cu-Al-Be.

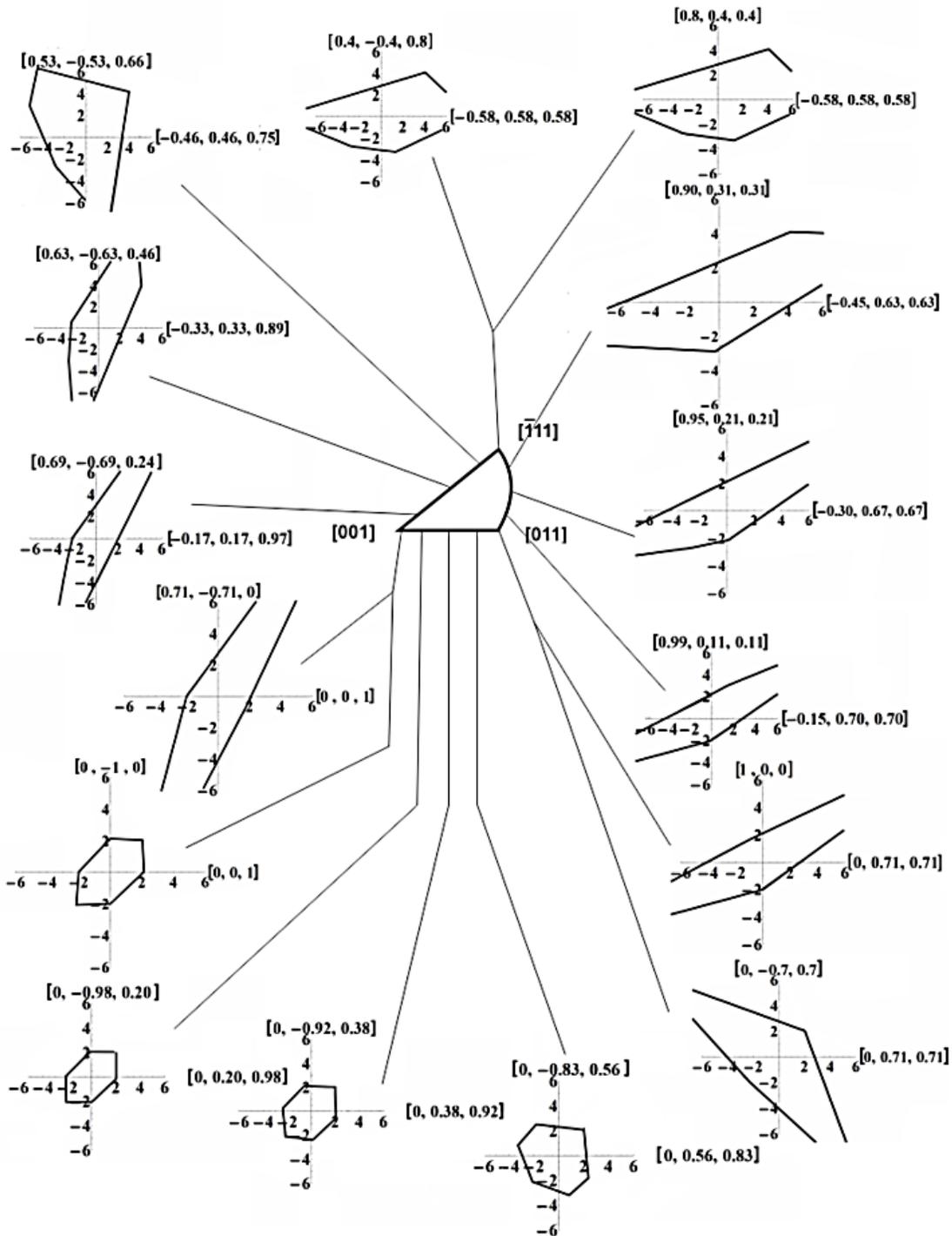


Figura 1.15. Diagramas de transformación martensítica bajo estados de esfuerzos planos [22]

1.3 Modelo matemático empleado

Como se mencionó anteriormente, para aprovechar las propiedades de los MMF es necesario contar con modelos matemáticos que simulen el comportamiento mecánico de éstos materiales considerando el mayor número de variables que lo influyen. En realidad, en los últimos años se han reportado en la literatura un buen número de modelos que permite simular el comportamiento pseudoelástico de MMF mono y poli-cristalinos bajo ciertos parámetros. Algunos de estos modelos emplean teorías conocidas como: la plasticidad, la elastoplasticidad y la viscoelasticidad [23].

En general, existen modelos fenomenológicos y/o físicos que tienen como fin principal determinar relaciones constitutivas para MMF considerando todos los aspectos físicos que intervienen en el fenómeno. Por otro lado existen modelos ingenieriles que permiten simular el comportamiento de los MMF para caso particulares como tensión, flexión, etc.

Los modelos ingenieriles son menos precisos que los fenomenológicos y generalmente no contemplan todos los aspectos del fenómeno o bien los valores promedio solamente. No obstante, estos modelos permiten diseñar dispositivos que aprovechen las propiedades de los MMF aun cuando no sean con gran precisión.

Recientemente, en México fueron propuestos por Cortés [23] un par de modelos ingenieriles que simulan el comportamiento de los MMF para casos de tensión simple y flexión. Uno de estos modelos sólo puede emplearse para casos de flexión y se basa en el cambio de propiedades elásticas del elemento conforme ocurre la transformación martensítica [23]. El otro modelo simula el comportamiento en tensión a diferentes temperaturas mediante parábolas de la forma $\sigma = k(T)\varepsilon^n$. Donde k es una función de la temperatura y n es un parámetro que se relacionan con el comportamiento obtenido en pruebas realizadas a muestras del material que será utilizado [23]. Dicho modelo se muestra a continuación:

$$\varepsilon = \left[\frac{\sigma_A}{f(k_2 - k_1) + k_1} \right]^{\frac{1}{n}} \quad (1.1)$$

Donde:

ε es la deformación que se genera en el MMF, σ_A es el esfuerzo aplicado, f es una función de Boltzmann, la cual se define como función de esfuerzo y la temperatura, k_i y k_f son valores de extremos que toma k correspondientes a una temperatura baja y alta respectivamente.

$$f = \frac{e^{\frac{T-M_s-T_c}{T_a}}}{1+e^{\frac{T-M_f-T_c}{T_a}}} \quad (1.2)$$

Donde T es la temperatura, M_s y M_f son las temperaturas críticas del material, $\frac{\partial \sigma_c}{M_s \varepsilon}$ es la relación de Clasiuss-Claperyron. T_c y T_a se definen como:

$$T_c = \frac{\sigma_A}{2 \frac{\partial \sigma_c}{M_s \varepsilon}} \quad (1.3a)$$

$$T_a = \frac{\sigma_A}{2 \frac{\partial \sigma_c}{M_s \varepsilon} \ln(99)} \quad (1.3b)$$

k_1 y k_2 se definen así:

$$k_1 = \frac{0.01k_f - 0.99k_i}{0.01^2 - 0.99^2} \quad (1.4a)$$

$$k_2 = \frac{0.99k_f - 0.01k_i}{0.99^2 - 0.01^2} \quad (1.4b)$$

Finalmente k_i y k_f :

$$k_i = \left(\frac{M}{\alpha}\right)^n \sigma_A^{1-n} \quad (1.5a)$$

$$k_f = \left(\frac{M}{\alpha}\right)^n \frac{\sigma_A^{1-n}}{2} \quad (1.5b)$$

Siendo M, α, n valores obtenidos experimentalmente de una gráfica esfuerzo-deformación del material con memoria de forma a una temperatura mayor que A_f .

En las Figura 1.16, se muestran las curvas: esfuerzo-deformación, a distintas temperaturas, y deformación-temperatura, a distintos valores de esfuerzo, obtenidas empleando el modelo de la ecuación 1.1.

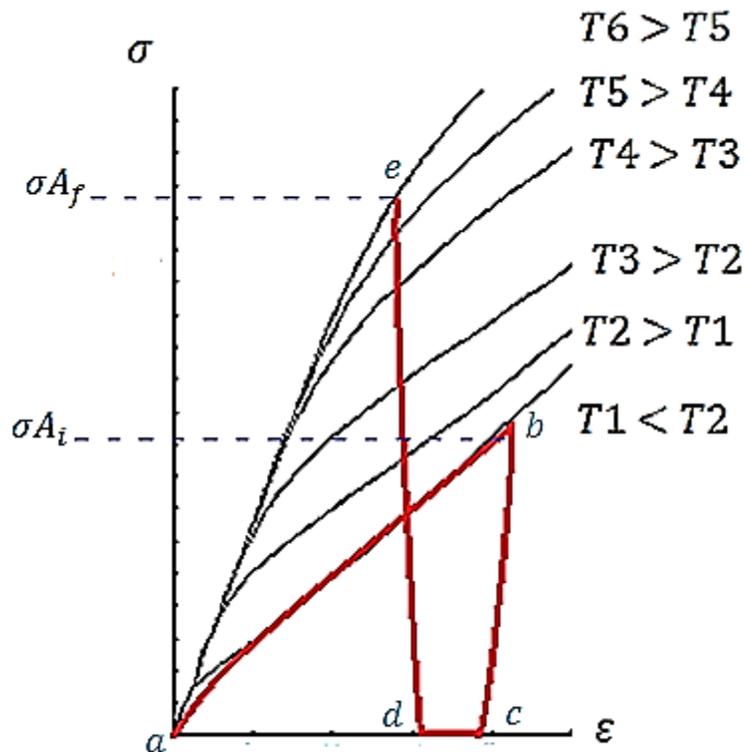


Figura 1.17. Diagrama del efecto asociado a la operación del cople de MMF con las curvas obtenidas del modelo propuesto por Cortés a distintas temperaturas, y.

1.4 Aplicaciones de los materiales con memoria de forma

Según se reporta en la literatura, actualmente existen muchas aplicaciones industriales de los MMF entre las que destacan las de automatización, las médicas y las aeroespaciales [1]. Entre dichas aplicaciones destaca aquella que desarrollamos en el presente trabajo la cual se denomina: cople sin soldadura. Como se describe en la siguiente sección, los primer coples sin soldadura fueron desarrollados empleando aleaciones de Ni-Ti, sin embargo, en el presente estudio se propone el empleo de una aleación de Cu-Al-Be con memoria de forma.

1.4.1 Coples sin soldadura

Actualmente existen compañías que diseñan y manufacturan conexiones para tuberías de alto rendimiento, las cuales funcionan de manera distinta al tipo de uniones tradicionalmente utilizadas, como unión por soldadura, juntas con bridas o uniones roscadas. Una de estas empresas es Aerofit INC., la cual tiene una línea de productos para unión de tubería llamada *The SMA (Shape Memory Alloys)*

Fitting System. Esta línea de productos está basada en el uso de materiales con memoria de forma, específicamente una aleación denominada Tinel, el cual es una aleación Ni-Ti. Como es sabido este material presenta el comportamiento memoria de forma simple en el cual pueden inducirse deformaciones de hasta 8% y recuperarse al cambiar de fase. La unión consiste en un usar un cople de Tinel, el cual es fabricado con un diámetro interno ligeramente más pequeño que el diámetro de la tubería que se desea unir. Dicho cople se lleva a una temperatura donde es posible deformarlo para poder insertar en sus extremos la tubería y finalizar el proceso al exponer la junta a un incremento de temperatura, lo cual producirá que el cople regrese a su forma original. El funcionamiento de dicho sistema se describe a continuación:

1. Una vez que se elige el cople de acuerdo a las dimensiones de la tubería especificada, se marcan las extremidades de ésta, como se muestra en la Figura 1.18 para determinar la posición final de la inserción del cople.

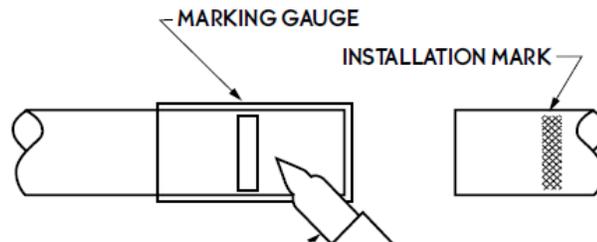


Figura 1.17. Plantilla para marcar posición del cople de Tinel (Product Handbook Aerofit, INC).

2. Se introduce el cople en un medio que hace que el Tinel cambie a su fase martensita, en este caso nitrógeno líquido, en este punto el material no opone gran resistencia a mantener su forma original. En ocasiones se recomienda enfriar los extremos de la tubería que se va a unir, con énfasis en tubería de aluminio.
3. Enseguida se hace pasar un mandril dentro del cople haciendo un ensanchamiento cuyo diámetro supera al diámetro del tubo que se va a unir como se muestra en la Figura 1.19b.

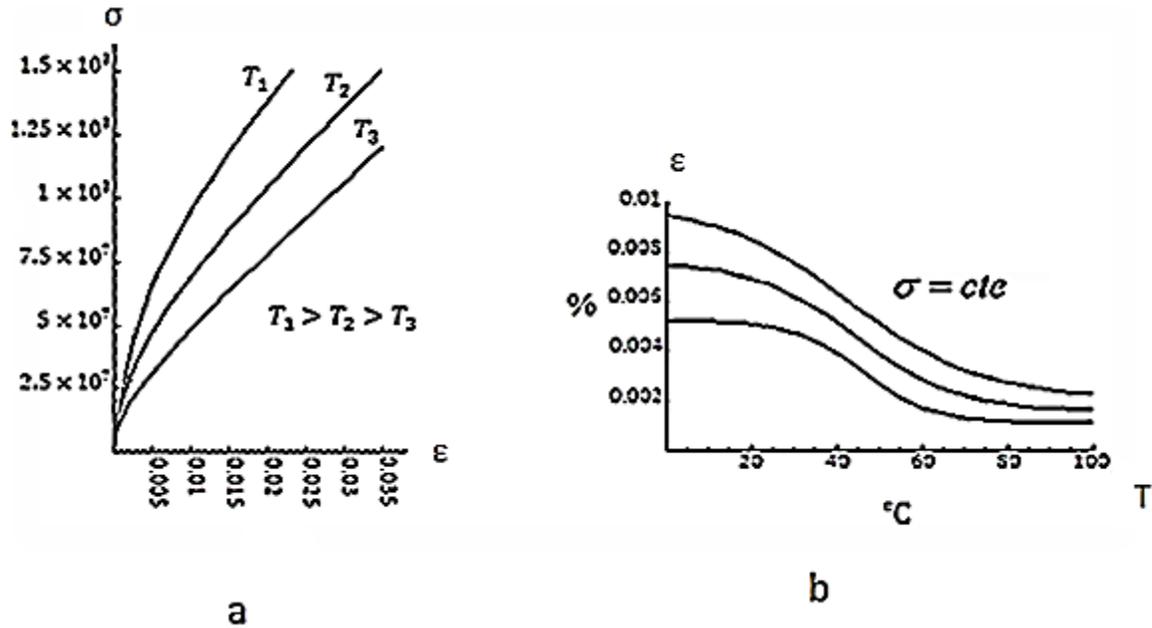


Figura 1.16. Comportamiento mecánico de un material con memoria de forma según el modelo propuesto por Cortés [23]: curvas: a) Esfuerzo deformación a distintas temperaturas y b) deformación-temperatura a distintos valores de esfuerzo.

Es claro que el modelo propuesto por Cortés [23] ofrece una aproximación razonable del comportamiento mecánico de los MMF por lo que se decidió emplearlo para el diseño del cople sin soldadura del presente trabajo.

En la Figura 1.17 se muestran gráficas $\sigma - \epsilon$ a distintas temperaturas. En este diagrama se puede ver la trayectoria del efecto empleado en el diseño de cople sin soldadura. Iniciando en a el material sigue la curva cuya temperatura es $T_1 \leq M_f$ cuando se aplica una carga generando una deformación que corresponde a un σA_i llegando hasta b , enseguida se retira la carga como se muestra en c . Al incrementar la temperatura el material tratará de recuperar la deformación inducida llegando hasta d , pero debido a la interferencia, el material solo recuperará un porcentaje de la deformación inducida inicialmente. Se puede ver que este efecto concluye en e donde la temperatura corresponde a $T_6 \geq A_f$. En este punto el material se encuentra sometido a σA_f .

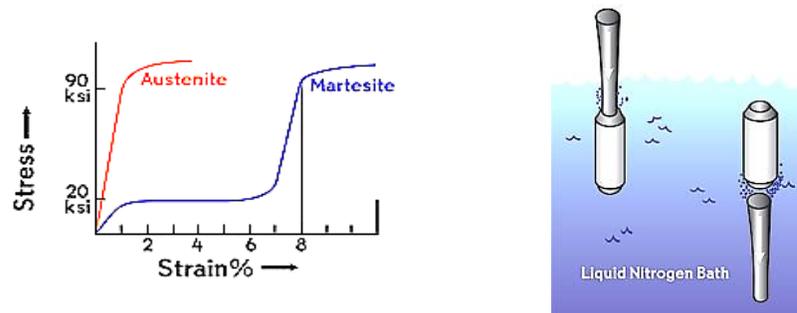


Figura 1.19a) Diagrama esquemático esfuerzo-deformación característico de SMA b) Operación de un cople de Tinel desarrollado por Aerofit [24]

4. Finalmente, se inserta la tubería en los extremos del cople y se deja que la unión gane calor del ambiente hasta llegar a una temperatura donde el material se encuentra en fase austenita y el cople tiende a recuperar su forma original debido al efecto memoria de forma, logrando una interferencia sobre el cople y tubo lo cual genera hermeticidad en la unión. En la Figura 1.20 muestra este tipo de junta.

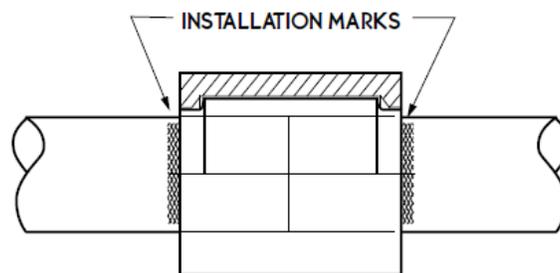


Figura 1.20. Instalación de un cople de Tinel (Product Handbook Aerofit, INC).

Estos sistemas de unión tienen aplicaciones en el mercado espacial, aeronáutico, naval y nuclear.

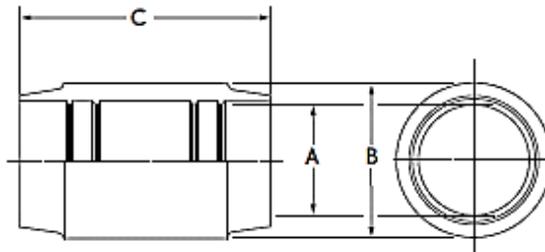
La línea *The SMA Fitting System* está diseñada para presiones de trabajo de 2000, 3000, 4000, y 5000 Psi en sistemas hidráulicos para tuberías de titanio, acero inoxidable y aluminio. El sistema de montaje SMA Fitting System es más fácil y menos costoso que implementar los métodos tradicionales tales como la soldadura y estampado. Así mismo, el sistema cumple o supera el comportamiento deseado ante una explosión, con el impulso, y los requisitos de fatiga de las uniones soldadas. Este sistema provee los siguientes beneficios:

- No requiere herramientas costosas
- Es posible unir en espacios limitados
- No hay fugas

- El peso es ligero
- Instalación rápida y fácil
- No hay trabajo en caliente, por tanto no hay efectos térmicos
- No es necesario rayos X para inspección

La capacidad de memoria de forma del Tinel asegura que los acoplamientos siempre se encogen con la misma fuerza, lo que permite poder hacer conexiones consistentes y repetibles. Estos sistemas de conexión han tenido una destacada trayectoria de más de 39 años en la industria aeroespacial, ya que este sistema crea una junta que a menudo es más resistente que el tubo que se une. La Figura 1.21 muestra un cople de memoria de forma comercial para tubería de Titanio.

2000 PSI CRYOFIT COUPLINGS
2PHS1 11 COUPLING



NUMERO DE PARTE	DIOMETRO DE TUBO	A EXPANSIÓN MINIMA	B RECUPERACION MAXIMA	C +0.010 RECUPERADO
2PHS111-20	1.250	1.259	1.517	2.322
2PHS111-24	1.500	1.510	1.724	2.500

Figura 1.21. Muestra obtenida de Product Handbook, Aerofit, INC. Muestra el cople para tubería, así como su designación. [24]

Por otro lado, en el trabajo “Shape Memory Alloys simplifies medical gas work” [25], muestran una alternativa para la reconexión de un sistema de tubería de gas medicinal en hospitales debido a fallas o mantenimiento, ya que el método de unión por soldadura genera contaminación en la línea, produciendo un paro en la línea de distribución que atrasa el servicio del hospital ocasionando pérdidas económicas por la renta de equipos provisionales de gas y pérdida de tiempo en la planeación del corte en la línea de suministro.

La empresa Smart Tap, INC. ha diseñado conexiones similares a las de Aerofit INC., coples de Ni-Ti, sin embargo, Smart Tap se enfoca en juntas para la conducción de gases medicinales, su línea es llamada SMARTFIT®. Este tipo de

unión ofrece una junta con la ventaja de no contaminar la tubería como se hace mediante otros procesos de unión, como cuando se realiza instalación mediante soldadura. El acoplamiento SMARTFIT® se puede aplicar sin el uso de calor, lo que reduce el riesgo de incendio en un espacio reducido que contiene carbono acumulado en el interior de la tubería.

Este sistema ha permitido en hospitales la reubicación de válvulas en la línea de gas medicinal, unión de nuevas tuberías, reducción en costos de operación en la ampliación de redes de gas, etc.

La línea de productos de accesorios SMARTFIT® están disponibles para uso en tubería de cobre tipo "K" o "L": Acoplando tubos de las siguientes medidas: ½", ¾", 1", 1¼", 1½" y 2" [26].

Capítulo 2. Diseño de coples sin soldadura

Este capítulo se divide en cuatro secciones que llevan al diseño y análisis de un prototipo de cople con memoria de forma. La primera sección es una reseña de tipos de unión y ensamble, así como la normativa existente en juntas de tubería donde se podría utilizar el prototipo de cople de MMF. En las secciones restantes se muestran los parámetros necesarios para modelar el comportamiento de una junta empleando un cople con MMF.

2.1 Métodos de unión y ensamble

Un sistema de tubería es un conjunto de tubos unidos que permiten transportar un fluido desde un punto a otro. El tubo es un elemento cuya sección transversal es un anillo circular de espesor uniforme. Existen elementos dentro de un sistema de tubería que permiten la unión o junta de tubos para manipular la distancia de distribución de la tubería.

Existen diversos métodos y accesorios para unir tubería en ductos para agua, gas o cualquier otro fluido. En la subsección 2.1.1 se describen algunos métodos utilizados actualmente para la unión de elementos mecánicos. Esta descripción se enfoca en presentar la diversidad de procesos de unión así como mostrar las características entre la sujeción mecánica, y la unión por soldadura.

Cuando se selecciona un método de unión para una aplicación específica, deben considerarse muchos factores, incluyendo los siguientes:

- Requisitos funcionales
- Materiales
- Diseño
- Dimensiones
- Condiciones y ritmos de producción
- Métodos disponibles
- Economía

2.1.1 Procesos de unión

Muchos métodos para unión deben tener en cuenta la necesidad de desarmar el producto para darle servicio o remplazar piezas, y a menudo debe permitir el ajuste de la posición de una pieza para compensar el desgaste normal del producto [27].

Si dos o más elementos se requieren unir existen tres formas principales de hacerlo:

1. Los elementos pueden ser unidos permanentemente por coalescencia localizada, basándose en la cohesión o adhesión entre los elementos.
2. Los elementos pueden ser unidos por acoplamiento o ajuste geométrico de los elementos, basándose en la deformación elástica o plástica.
3. Los elementos pueden ser unidos usando elementos especiales de unión o sujetadores [28].

La cohesión genera un enlace atómico fuerte entre los elementos, debido a la combinación de presión y temperatura, esto implica la formación de cristales metálicos comunes entre ellos, por eso ambos elementos deben poseer la misma estructura básica. La adhesión provee una serie de fuerzas superficiales, los elementos no forman estructuras comunes, en este caso aplica la unión de distintos tipos de materiales, en la mayor parte de estos procesos de unión se requiere aplicar un material de aporte.

Los ensambles que se basan en acoplamiento geométrico ofrecen un acople hermético mediante esfuerzos generados sobre una superficie. La adherencia difiere de la cohesión porque utiliza una sustancia totalmente diferente en la composición de las piezas por unir. Esta técnica implica el uso de pegamentos, soldadura fuerte o soldadura blanda.

La sujeción mecánica se divide en dos grupos generales: juntas y sujetadores. Las juntas son la configuración mecánica de las piezas para que queden soportadas o retenidas por interferencia e incluyen costuras y ensamblaje. Los sujetadores mecánicos incluye todos los tipos de tornillos, pasadores, clavos, grapas, remaches, roblones, broches de resorte y similares, para unir dos o más piezas por medio de una pieza separada, que es el sujetador [27].

La sujeción mecánica ofrece las siguientes ventajas sobre otros métodos:

- Facilidad de manufactura
- Facilidad de ensamble y transporte
- Facilidad de desarmado, mantenimiento, remplazo o reparación de partes
- Facilidad de crear diseños que requieren uniones móviles
- Menor costo general de manufactura del producto [29].

Existen aplicaciones donde se requiere un proceso de unión “limpio” y rápido, donde no deben existir partículas de corte, fundente o productos de la soldadura (escoria) que ocasionen la contaminación en un sistema de tubería, así mismo, en algunos casos donde la tubería se encuentra confinada ó donde se podría causar un incendio por emplear la unión por soldadura. La sujeción mecánica puede dar una solución práctica a este problema.

Actualmente existe un método de ajuste por compresión, mejor conocido como “Compression fitting”, el cual se emplea actualmente en plomería, conductos eléctricos, industria química, combustibles (petróleo y gas), etc. donde se requiere unir tubos de pared delgada del mismo o diferente material. Este tipo de sujeción de manera general se compone de una tuerca de compresión exterior y un anillo de compresión interior o casquillo, que está típicamente hecha de latón o cobre. Esta unión opera de la siguiente forma: cuando se aprieta la tuerca, el casquillo es comprimido entre la tuerca y el accesorio de recepción; los extremos del casquillo se sujetan alrededor de la tubería comprimiéndola, logrando un cierre hermético. La Figura 2.1 muestra un conector de tipo compression fitting de bronce.



Figura 2.1. Conector tipo “compression fitting” bronce $\frac{3}{4}$.

2.1.1.1 Unión por soldadura

La soldadura es un proceso de unión permanente que implica la cohesión entre 2 materiales, normalmente se aplica en metales y termoplásticos. Requiere la aplicación de calor, presión, material de aporte, e incluye reacciones físicas y químicas.

Se denomina soldadura por fusión cuando se aplica calor entre las piezas que se desean unir hasta que se derriten y se obtiene una mezcla entre ellas, finalizando la unión al solidificar. Este proceso implica el acompañamiento de reacciones indeseables, como dilatación, contracción y debido al incremento drástico de temperatura el metal aumenta la absorción de oxígeno, produciendo óxidos quebradizos en la soldadura. La solución a esta última reacción es evitada cuando se provee protección atmosférica en la soldadura hasta que la unión solidifica, mediante fundentes o gases inertes. El proceso de solidificación es similar a la fundición, y finaliza con la formación de granos columnares (dendríticos). El metal

de soldadura tiene fundamentalmente una estructura de fundición y como se ha enfriado con lentitud tiene granos bastos. Debido a ello esta estructura tiene valores bajos de resistencia, tenacidad, y ductilidad [29].

Casi siempre es difícil determinar la calidad de una soldadura con sólo la observación. En la mayoría de los casos, la calidad de la soldadura es crítica, se reflejara en el trabajo terminado y en muchos casos puede ser cuestión de vida o muerte [27].

Existen pruebas a las que son sometidas las uniones para determinar su calidad, para poder saber si existen grietas, una mala fusión, etc.. Estas pruebas pueden ser destructivas o no destructivas.

La soldadura sin fusión se lleva a cabo en estado sólido, a temperaturas menores que los procesos de fusión. En este caso la oxidación de los metales no es un problema serio.

Estos procesos de unión se basan principalmente en las fuerzas de adhesión entre el material de aporte y los materiales de trabajo. A su vez se subdividen en soldadura fuerte, soldadura blanda y unión con adhesivos. Se difieren las soldaduras fuerte y blanda dependiendo del punto de fusión del material de aporte. La soldadura blanda se lleva a cabo con un material de aporte cuyo punto de fusión es igual o menor a 450°C, mientras que en la soldadura fuerte este punto de fusión es a mayor temperatura.

En este último tipo de unión, el material de aporte tiene el punto de fusión más bajo que la temperatura de fusión del material base, logrando que el material de aporte en estado líquido se distribuya en las juntas por acción capilar.

Para obtener una junta de calidad deben cumplirse los siguientes requisitos:

- Superficies limpias
- Juntas formadas correctamente
- Temperatura correcta de unión

Debe recordarse que la soldadura fuerte, la soldadura blanda, la soldadura por resistencia y la unión con adhesivos se usan normalmente para unir chapas delgadas, hasta 3mm de espesor [28].

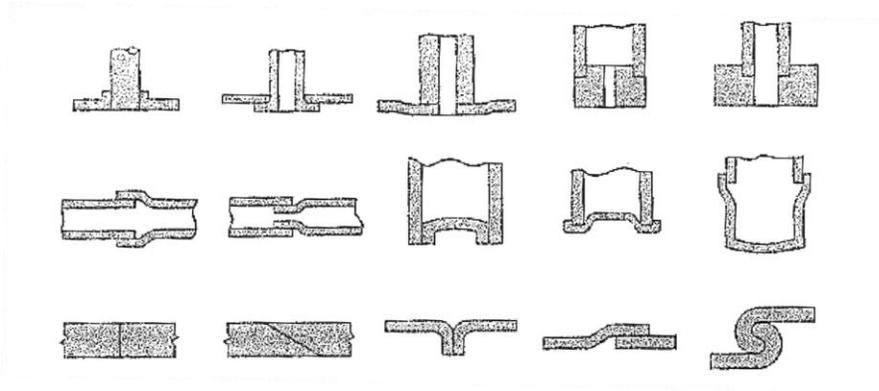


Figura 2.2 Diseño de uniones de uso frecuente en uniones de soldadura fuerte [29].

El espacio característico de unión de la soldadura fuerte va de 0.025 a 0.2mm. Estos espacios libres deben ajustar con un margen de tolerancia dimensional muy pequeño, porque mayores holguras reducen la resistencia de la unión. La soldadura fuerte se utiliza en una variedad de aplicaciones, en la Tabla 2.1 se muestra ejemplos de metales para soldar.

Tabla 2.1 Metales de aportación en Soldadura fuerte [28].

METAL DE APORTE	TEMPERATURA DE SOLDADURA °C	APLICACIÓN
Cobre/aleaciones de cobre (Cu, Ni, Co, Cr)	850-1100	Aceros, carburos, aceros rápidos, etc.
Cobre con fósforo	750-850	Cobre, aleaciones de cobre.
Latón (Cu, Zn, Mn, Ni)	850-1000	Acero, fundición, cobre, níquel.
Aleaciones de plata (Ag, Cu, Zn, Cd)	600-850	Cobre, aleaciones de cobre, acero.
Aleaciones de aluminio (Al, Si)	500-600	Aluminio, aleaciones de aluminio

2.1.1.2 Estandarización industrial

Los sistemas de tuberías para transporte de fluidos a presión como agua, gas y aire en México, están estandarizados por las normas NMX-W-101/1-SCFI-2004, NMX-W-101/2-SCFI-2004 [30] y NOM-002-CNA-1995 [31]. Dichas normas establecen especificaciones y métodos de prueba que deben cumplir las conexiones de cobre y las aleaciones de cobre sin costura soldables.

La norma NMX-W-101/1-SCFI-2004 hace mención de un apartado llamado *resistencia de la unión soldada*, la cual implementa lo siguiente:

La resistencia de la unión soldada está en función del máximo rango de presión - temperatura para uniones soldadas de cobre, usando soldaduras comerciales, esto se establece en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Presión contra temperatura de uniones soldables

Materiales de unión	Temperatura de trabajo máxima		Presión máxima de trabajo MPa			
	°K	(°C)	1/8 a 1	1 ¼ a 2	2 ½ a 4	5 a 8
Designación nominal						
Soldadura 50-50	311	38	1,4	1,2	1,0	0,9
Estaño - plomo	339	66	1,0	0,9	0,7	0,6
	366	93	0,7	0,6	0,5	0,5
	393	120	0,6	0,5	0,3	0,3
Soldadura 95-5	311	38	3,5	2,8	2,0	1,9
Estaño - antimonio	339	66	4,3	4,0	2,8	2,6
	366	93	2,0	1,7	2,3	2,1
	393	120	1,9	1,5	1,2	1,1

NOTA: La unión soldada excede la resistencia del tubo tipo M en temple rígido y en los tipos L y K en temples rígidos y flexibles.

Por otro lado, en las normas NMX-W-123-SCFI y NMX-W-124-SCFI existe un apartado denominado: hermeticidad donde se describen 2 pruebas que deben realizarse a los sistemas de tuberías: hidrostática y neumática. Dichas normas establecen, para el caso de presión hidrostática, que las conexiones de cobre deben soportar como mínimo una presión hidrostática de 1,7MPa durante un tiempo mínimo de 60s, sin presentar fugas ni deformaciones. Así mismo, para la prueba neumática la norma correspondiente establece que las conexiones de cobre deben soportar como mínimo una presión neumática de 0,686MPa durante un tiempo mínimo de 60 segundos sin presentar fugas ni deformaciones.

Adicionalmente, la norma NOM-002-CNA-1995 de la Comisión Nacional del Agua para tomas domiciliarias para abastecimiento de agua potable, estipula que los elementos que integran esta toma deben resistir 15 minutos una presión de 1.5MPa sin presentar falla. También estipula que las uniones y conexiones no deberán desacoplarse al aplicarles una fuerza axial de 400N para elementos de 13 mm de diámetro, 850N para elementos de 19mm de diámetro, bajo una presión hidráulica de 0.75Mpa.

Hermeticidad.

Adicionalmente, la norma NOM-002-CNA-1995 exige que las conexiones deben soportar 3 minutos una presión hidrostática de 0.75MPa \pm 10% sin presentar fugas

o fallas en los elementos.

Es claro que en México no existen normas que apliquen sobre uniones sin soldadura que emplean MMF, sin embargo, las pruebas de rendimiento que se aplican a otros tipos de juntas pueden ser tomadas como requerimientos del diseño de un cople con MMF.

2.2 Deformaciones de la tubería

Hasta ahora se han mostrado los parámetros de MMF que se emplearán, y un modelo que emula el comportamiento del material. Con el modelo propuesto por Cortés es posible simular la operación de una junta empleando un cople con memoria de forma si se considera que el espesor de pared es muy delgado.

Es claro que el cople deberá tener un diámetro interior menor que el diámetro exterior de las tuberías a unir. Lo anterior, se logrará enfriando el cople hasta una temperatura a la cual el material se encuentre en fase martensita y pueda ser deformado hasta que su diámetro interno sea ligeramente mayor al diámetro externo de la tubería donde será insertado. El enfriamiento se logrará sumergiendo el conjunto en hielo seco.

Después de la inserción, el cople gana calor debido a que se saca del hielo seco y el material inducirá una carga incremental sobre los tramos de tubería que se insertaron, conforme aumenta la temperatura, debido a que se transforma de martensita a austenita. Esta presión inducirá un esfuerzo en los tubos que generarán deformaciones en la pared interna de los mismos. Es importante mencionar que las deformaciones inducidas por el cople, al estar en contacto con la tubería no deberán exceder el rango elástico del material de dicho tubo, es decir, que deben ser menores al 0.2%, ya que esto puede ocasionar un colapso.

Considerando lo anterior, es claro que es necesario conocer la respuesta mecánica de la tubería, es decir, los esfuerzos, las deformaciones y los desplazamientos inducidos al someterse a presiones internas y/o externas.

La teoría simplificada de recipientes a presión con pared delgada brinda información de la respuesta de la tubería al ser sometido a una presión interna pero no externa. En la Figura 2.3, se muestra de manera esquemática la respuesta mecánica de un tubo de pared delgada sometido a presión interna. Así mismo las ecuaciones 2.1 muestran los esfuerzos ($\sigma_{\theta\theta}$ y σ_{rr}) y el desplazamiento radial (u_r) inducidos por la presión interna [32]:

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{P_i}{t} r \quad (2.1a)$$

$$\sigma_{zz} = \frac{P_i}{2t} r \quad (2.1b)$$

$$u_r = \frac{P_i}{2Et}(2 - \nu)r^2 \quad (2.1c)$$

donde:

P_i es la presión interna, r es el Radio medio, ν es el Módulo de Poisson, t es el espesor de la pared y E es el Módulo elástico.

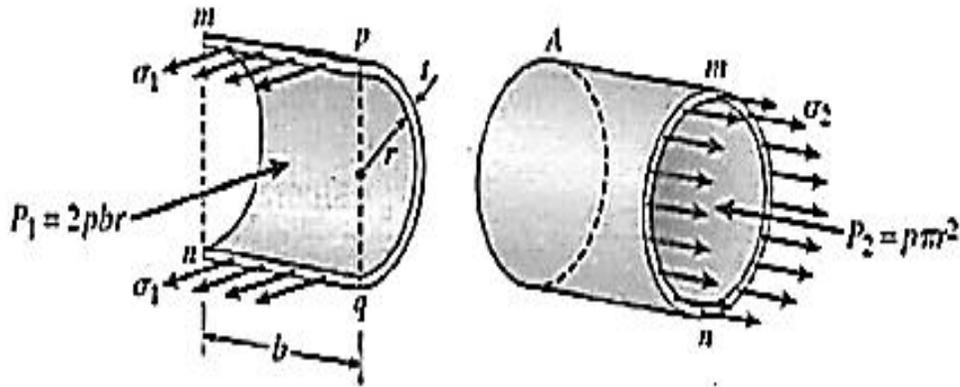


Figura 2.3. Esquema de esfuerzos en un cascarón cilíndrico.

Por otro lado, la teoría de elasticidad plana ofrece una solución para el caso de un anillo circular sujeto a presión interna y externa como se muestra en la Figura 2.4.

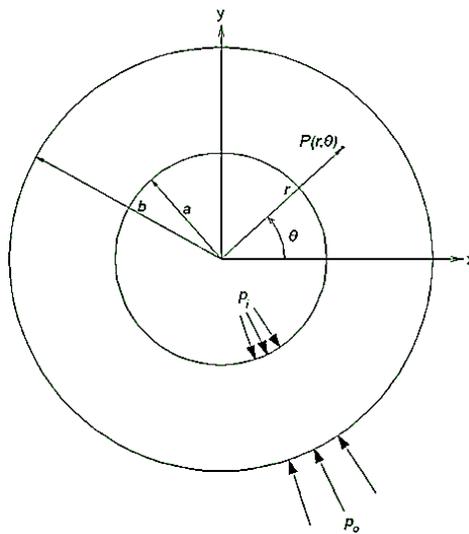


Figura 2.4. Diagrama de un cilindro hueco sujeto a presión interna P_i y presión externa P_0 [33].

La solución del problema se muestra en las ecuaciones 2.2 (a), (b) y (c) consisten en los campos de esfuerzos $\sigma_{\theta\theta}(r)$, $\sigma_{rr}(r)$ y de desplazamientos $u_r(r)$ [33]:

$$\sigma_{\theta\theta}(r) = -\frac{a^2 b^2 (P_0 - P_i)}{(b^2 - a^2) r^2} + \frac{a^2 P_i - b^2 P_0}{(b^2 - a^2)} \quad (2.2a)$$

$$\sigma_{rr}(r) = \frac{a^2 b^2 (P_0 - P_i)}{(b^2 - a^2) r^2} + \frac{a^2 P_i - b^2 P_0}{(b^2 - a^2)} \quad (2.2b)$$

$$u_r(r) = \frac{1}{E} \left[-(1 + \nu) \frac{a^2 b^2 (P_0 - P_i)}{(b^2 - a^2) r} + (1 - \nu) \frac{a^2 P_i - b^2 P_0}{(b^2 - a^2)} r \right] \quad (2.2c)$$

donde:

$\sigma_{\theta\theta}$ es el esfuerzo tangencial, σ_{rr} es el esfuerzo radial, u_r es el desplazamiento radial, P_0 es la presión externa, P_i es la presión interna, E es el módulo elástico, ν es el módulo de Poisson, a es el radio interno y b es el radio externo.

Es claro que el cople de Cu-Al-Be actuará como un tubo de pared delgada sometido a presión interna P_i , mientras que los tubos que se unirán con el cople actuarán como tubos de pared delgada sujetos a presión externa P_0 . Debido a lo anterior, para analizar el cople se emplearán las ecuaciones 2.1 y para analizar la tubería las 2.2.

2.2.1 Deformación del cople

Como se mencionó anteriormente, para analizar el cople se emplean las ecuaciones 2.1 relacionandolas con el cambio que sufrirá el perímetro durante el calentamiento y la definición de deformación ingenieril. Considerando lo anterior, es posible asociar este desplazamiento radial con las deformaciones tangenciales (ingenieril) de la siguiente forma:

La deformación ingenieril está dada por:

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L} \quad (2.3a)$$

donde: ε es la deformación ingenieril, δ es el Incremento de longitud y L es la Longitud inicial

Para el caso de un anillo, la deformación ingenieril se puede definir considerando el cambio de longitud del perímetro de mismo como:

$$\varepsilon = \frac{Pe_i - Pe_f}{Pe_i} \quad (2.3b)$$

donde:

Pe_i es el Perímetro inicial y Pe_f es el Perímetro final

También se sabe que el perímetro (Pe) de un anillo circular está dada por: $Pe = \pi * r$, de donde:

$$\varepsilon = \frac{\pi(r - Ur) - (\pi * r)}{\pi * r} \quad (2.3c)$$

$$\varepsilon = \frac{-Ur}{r} \quad (2.3d)$$

2.2.2 Deformación del tubo

Como se mencionó antes, los tubos que son sujetos por el cople serán analizados empleando las ecuaciones 2.2. Para estos elementos, el parámetro de interés es la resistencia mecánica y la rigidez, es decir, se deberá cuidar que los esfuerzos inducidos por la acción del cople no generen deformación plástica ni que las deflexiones generen colapso.

El criterio de cedencia que será empleado es el de Von-Mises o de la energía máxima de distorsión para un caso plano cuya representación geométrica se muestra en la Figura 2.5 [34].

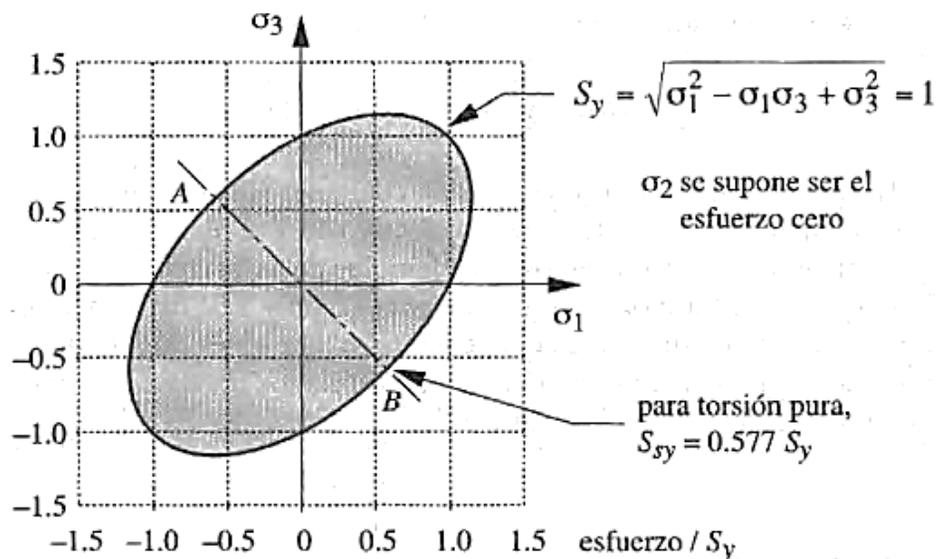


Figura 2.5. Representación gráfica del criterio de cedencia de Von-Mises, o de la energía máxima de distorsión, para estados de esfuerzos planos normalizada según el límite de fluencia elástico del material [34].

Es importante mencionar que, en muchas ocasiones, el punto de cedencia en una prueba de tensión simple no se aprecia claramente en el diagrama esfuerzo-deformación, para lo cual existe un criterio para determinarlo llamado "offset". En

la Figura 2.6 se muestra el criterio del “offset” en una curva típica $\sigma - \epsilon$ de un material dúctil. Este criterio indica que el punto de fluencia (S_y) de un metal se determina por la intersección de una recta paralela a la línea elástica que se traza a una deformación de 0.2% (a).

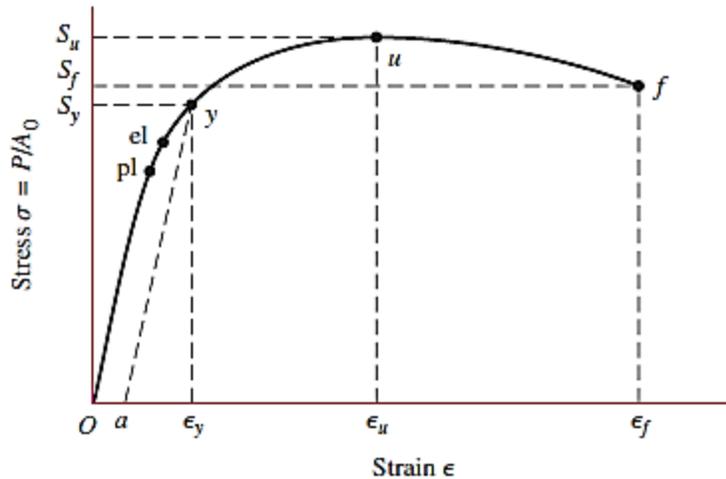


Figura 2.6. Diagrama esfuerzo deformación obtenido de una prueba en tensión a un material dúctil. [32]

Considerando lo anterior, la ecuación de cedencia de Von-Mises puede ser escrita, para el caso de tubo sujeto a presión externa, como:

$$0.002 * E = \sqrt{\sigma_{\theta\theta}^2 - \sigma_{\theta\theta} * \sigma_{rr} + \sigma_{rr}^2} \quad (2.4)$$

Cabe destacar que los tubos que se emplearon en el presente trabajo son de cobre, el cual presenta un comportamiento mecánico anisotrópico. De hecho, se ha encontrado que el módulo elástico del cobre y sus aleaciones puede oscilar entre 100 y 150GPa [29]. Debido a lo anterior, es conveniente realizar pruebas de caracterización de comportamiento mecánico de los tubos empleados como se muestra en la sección 2.3.1.2.

2.2.3 Carga de fricción en la junta

Como se mencionó arriba, la presión que ejerce el cople sobre el tubo tiene como resultado una fuerza perpendicular al área de contacto que inducirá fuerzas de fricción que se opondrán al desacoplamiento de los componentes de la junta.

Como se sabe, la fuerza de fricción se define matemáticamente como:

$$F = \mu_s * N \quad (2.5)$$

Dónde: F es la fuerza de fricción, μ_s es el coeficiente de fricción estático y N la fuerza perpendicular a las superficies en contacto.

Empleando este criterio se puede estimar la fuerza necesaria para desacoplar la junta entre el tubo y el cople de MMF modificando la ecuación 2.5 como:

$$F = \mu_s * Pa * A \quad (2.5a)$$

donde: A es el área de contacto y Pa es la presión aplicada sobre el tubo.

En este caso el área de contacto es la superficie de un cilindro hueco y la ecuación está dada de la siguiente manera:

$$A = \pi * r * l \quad (2.6)$$

donde: l es la longitud del cilindro y r el radio interno.

En la Figura 2.7 se muestra el diagrama de cuerpo libre de los elementos de la junta. El valor de la fuerza de fricción es un parámetro normado [31] que deben alcanzar cierto valor mínimo para asegurar que la junta soportará las cargas generadas durante el servicio.

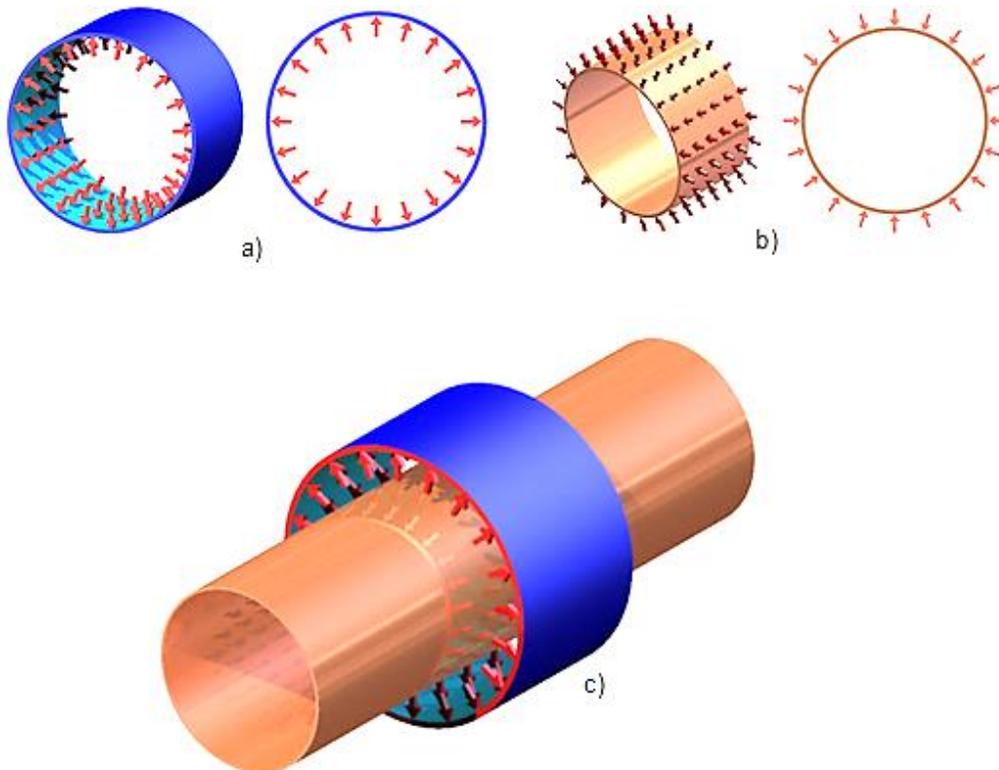


Figura 2.7.a) Diagrama de cuerpo libre: reacción cople, b) Diagrama de cuerpo libre: reacción tubo c) Diagrama de cuerpo libre de la junta.

2.3 Diseño de Coples

En las secciones precedentes se presentaron los criterios generales para el diseño de los coples sin soldadura a partir de los requerimientos generales de los distintos sistemas de unión existentes en el mercado. Por otro lado, en la presente sección se muestran los detalles específicos que fueron empleados en el diseño final de los coples diseñados y fabricados. Para desarrollar el diseño de detalle de los coples sin soldadura se realizó una caracterización del comportamiento mecánico del material que fue empleado: es decir cobre. Para la aleación empleada Cu-Al-Be, se tomaron valores reportados en la literatura, y así emplearlos en el modelo que simula el comportamiento del MMF. Posteriormente, se aplican las ecuaciones de diseño correspondientes para especificar el cople sin soldadura. En el capítulo 3 se presentan los resultados obtenidos en las pruebas realizadas a los coples fabricados y son comparados con los obtenidos en la presente sección.

2.3.1 Caracterización de materiales

2.3.1.1 Datos experimentales de la aleación Cu-Al-Be

La caracterización de un MMF implica la realización de pruebas en tensión, para obtener mediante un monitoreo una serie de datos a distintas temperaturas. Con ello, es posible ajustar en un diagrama $\sigma - \varepsilon$ la curva característica de la aleación empleada.

Un estudio de este tipo fue reportado por Cortés [17], con la finalidad de estudiar el efecto súper-elástico de la aleación Cu-Al-Be. En dicho estudio se generó una prueba en tensión a temperatura ambiente con una aleación de composición aproximada a Cu-12%Al-0.5%Be y una $M_s = -20^{\circ}C$. En la Figura 2.8 se observa el comportamiento en tensión del espécimen citado.

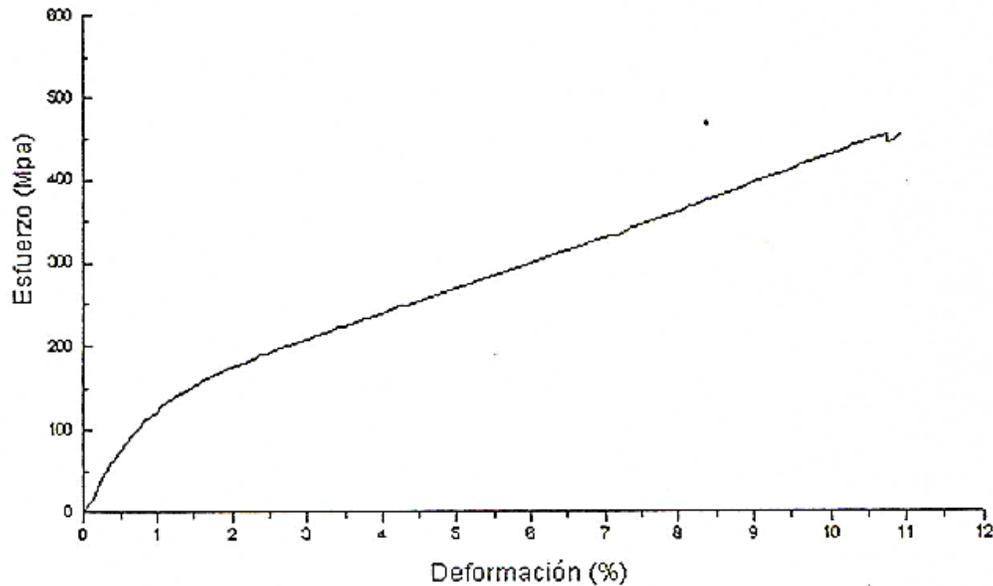


Figura 2.8. Comportamiento en tensión de un espécimen Cu-Al-Be llevado hasta su falla [17].

Esta prueba reportó valores de $M = 13 \times 10^9$, así mismo se aprecia que la deformación total alcanzada fue de aproximadamente 10%. De igual forma, se obtuvo el valor de $n = 0.65$ y $\alpha = 1$.

2.3.1.2 Caracterización de una sección de tubería de cobre rígido tipo M

Para realizar la caracterización del material de los tubos que fueron unidos mediante el cople sin soldadura, se tomó un tramo de tubería de cobre rígido tipo M de 1 pulgada de diámetro nominal y se construyó un arreglo experimental apropiado para realizar las pruebas correspondientes. El arreglo propuesto se aprecia en la Figura 2.9 donde se puede apreciar que a un tramo de tubo fue acoplado a un conector que permite el paso de aire presurizado proveniente de un compresor mientras que el lado opuesto fue cerrado para evitar fugas. En el conector del compresor fue colocado un manómetro de Bourdón para medir la presión aplicada al sistema mientras que el tramo de tubo a probar fue instrumentado con galgas extensométricas tipo EA-06-125AD-120 colocadas tangencialmente en dos puntos del elemento.

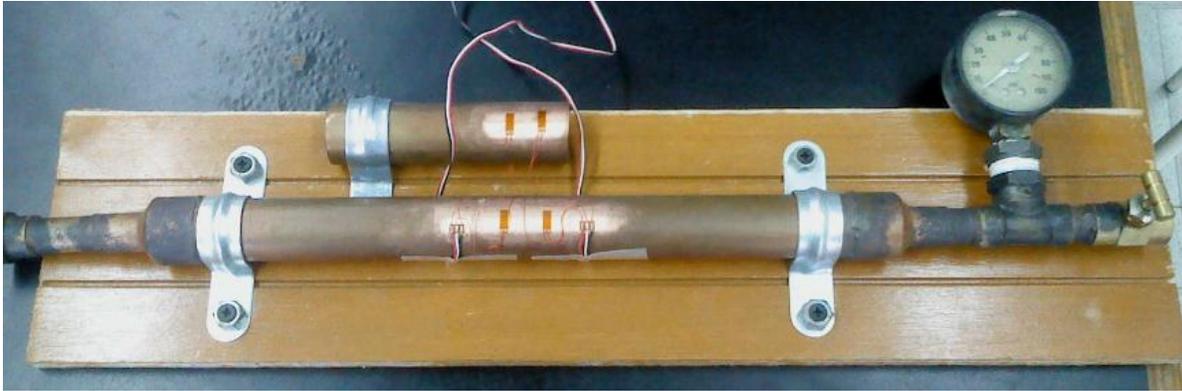


Figura 2.9. Arreglo para caracterización de la tubería de cobre.

La prueba fue realizada introduciendo aire comprimido a presiones desde 0 hasta 100Psi con intervalos de 5Psi (0.0344738MPa). Las deformaciones obtenidas durante la prueba fueron capturadas mediante un sistema de adquisición de datos modelo P3 de la marca Vishay como el que se muestra en la Figura 2.10.



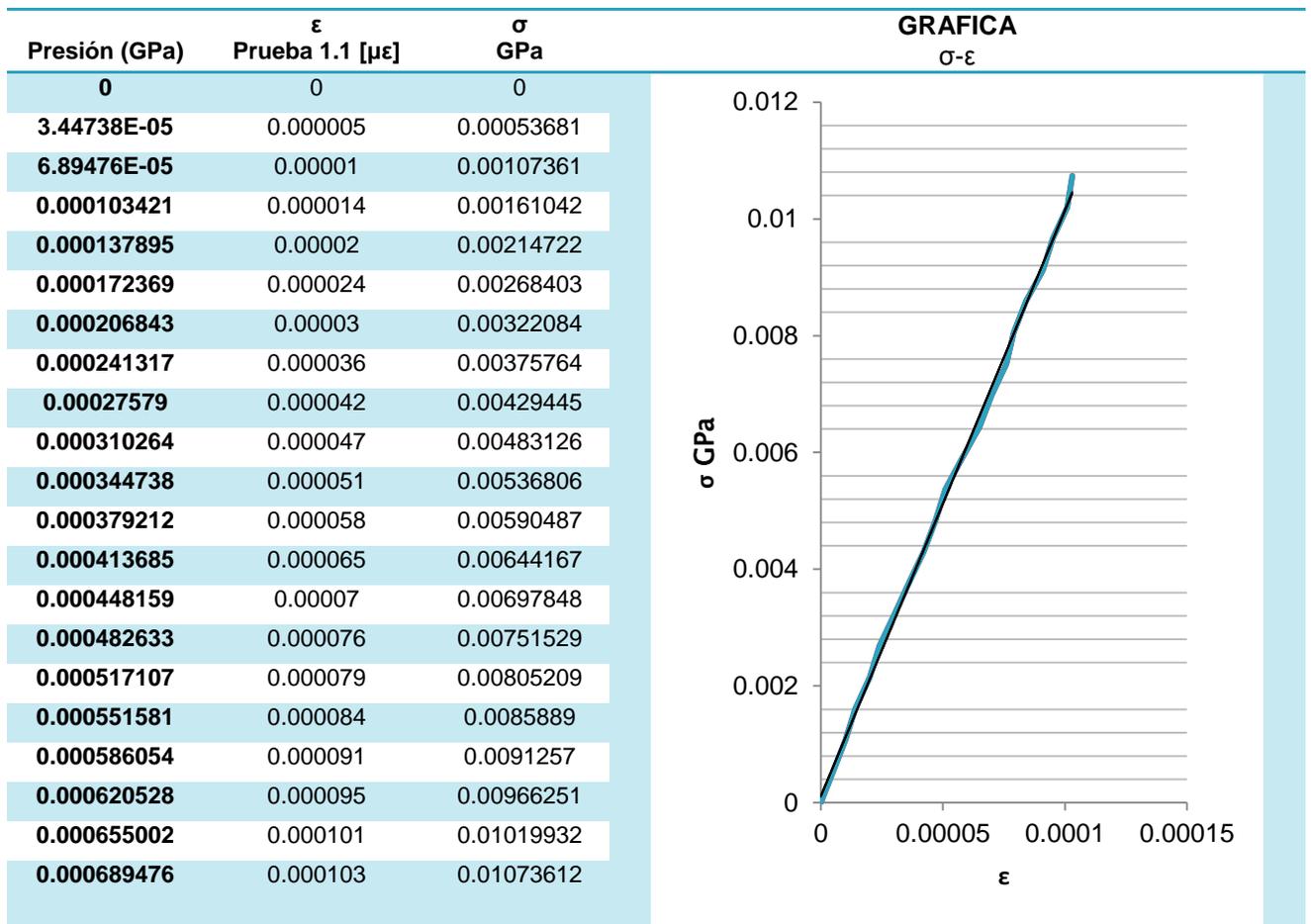
Figura 2.10. Arreglo de extensómetros conectados.

Empleando la ecuación 2.1a para cada valor de presión medido durante la prueba, se calculó el esfuerzo tangencial y junto con la deformación tangencial se generaron curvas esfuerzo-deformación experimentales para tres muestras de material ensayadas dos veces cada una.

Con los datos obtenidos en cada una de las seis pruebas realizadas se obtuvieron gráficas $\sigma - \epsilon$, como la que se muestra en la Figura 2.11, y se ajustaron las rectas obtenidas aplicando el método de los mínimos cuadrados. De este modo, se obtuvo la pendiente y la ordenada al origen de cada curva con lo que se determinó el módulo de Young. En la Tabla 2.3 se presentan los valores del módulo de Young para cada prueba realizada donde se ve que el promedio es de alrededor de 100GPa.

Tabla 2.3 Módulo elástico de cada prueba.

PRUEBA	MÓDULO GPa
1.1	100.31
1.2	98.975
2.1	103.8
2.2	100.48
3.1	101.33
3.2	99.456
	100.72517



(a)

(b)

Figura 2.11. a) Tabla experimental obtenida en una prueba realizada y b) Curva esfuerzo-deformación correspondiente.

2.4 Eficiencia de la unión

Una vez caracterizada la tubería de cobre, es posible simular el comportamiento mecánico empleando las ecuaciones 2.2a, b, c para un tubo de cobre rígido tipo M de 1" de diámetro nominal cuando es sometido a presión externa P_0 empleando los datos de la Tabla 2.4.

Tabla 2.4. Parámetros del tubo de cobre empleado en el estudio

a (m)	b (m)	S_y (Pa)	E_t (Pa)	ν
13.3843×10^{-3}	14.2843×10^{-3}	201.44×10^6	100.72×10^9	0.3

Empleando dicha información se calcularon los esfuerzos y los desplazamientos, en términos de la presión externa para $r = a$ y $r = b$, que se listan en la Tabla 2.5:

Tabla 2.5. Esfuerzos y desplazamientos inducidos por una presión externa P_0

r	$\sigma_{\theta\theta}$	σ_{rr}	u_r
a	$-16.56P_0$	0	$-2.20 \times 10^{-12} P_0$
b	$-15.561P_0$	$-P_0$	$-2.16 \times 10^{-12} P_0$

Luego considerando los valores de cedencia para el material empleado se calculó la presión máxima que soporta el tubo la cual resulto de: $-13.35 \times 10^6 Pa$.

Luego empleando dicho valor, en la Tabla 2.6 se presentan los esfuerzos y desplazamientos máximos que puede soportar el tubo.

Tabla 2.6. Esfuerzos y desplazamientos máximos que puede soportar el tubo empleado

$\sigma_{\theta\theta}$ (MPa)	σ_{rr} (MPa)	u_r (m)
207	-1.23	-2.88×10^{-5}

Por otro lado, considerando las dimensiones del tubo de cobre descrito anteriormente así como las propiedades del material con memoria de forma que se empleará, a continuación se presenta la simulación del comportamiento mecánico del elemento considerando el modelo de Cortés [23] descrito en el

capítulo anterior. Los datos de entrada del modelo se listan en la Tabla 2.7, donde se consideró que el diámetro interior del cople se incrementará 4%.

Tabla 2.7. Datos de entrada del modelo matemático para simular el comportamiento mecánico del cople sin soldadura.

M_s (°C)	M	n	R $\left(\frac{MPa}{°C}\right)$	α	a (m)
-20	8×10^9	0.65	2	1	13.8×10^{-3}

Por otro lado, en la Figura 2.12 se observa la gráfica del comportamiento esfuerzo-temperatura del cople de MMF al ser deformado un 4% de su diámetro inicial a una temperatura por debajo de M_s , y llevado hasta temperaturas superiores a la ambiente, donde solo recuperará el 0.8% debido a la interferencia producida por el tubo.

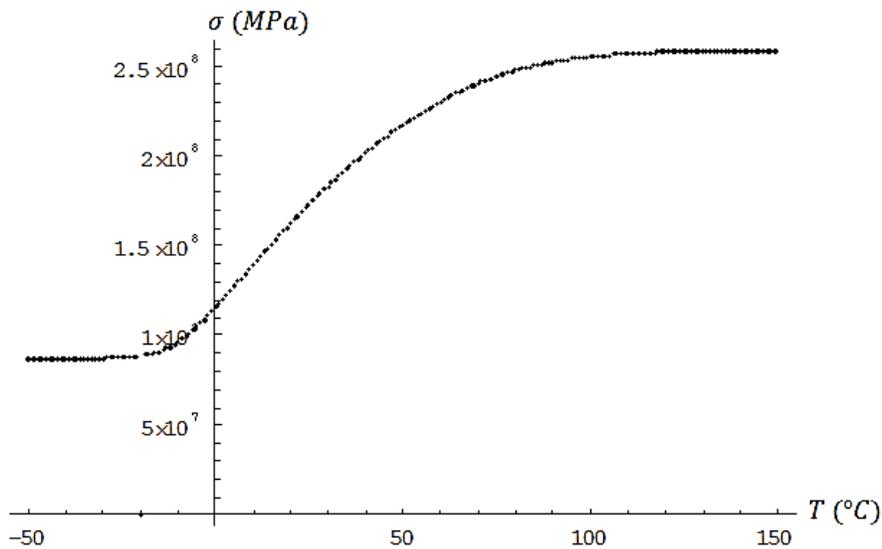


Figura 2.12. Curva $\sigma - T$ de un MMF por el modelo propuesto por Cortés.

En la Figura 2.13 se muestran gráficas $\sigma - \varepsilon$ donde se observa el comportamiento del cople de MMF a distintas temperaturas con los parámetros citados anteriormente. Donde $T1 \leq M_f$ y $T4 = T_{ambiente}$. Se puede apreciar el σA_f generado a dicha temperatura.

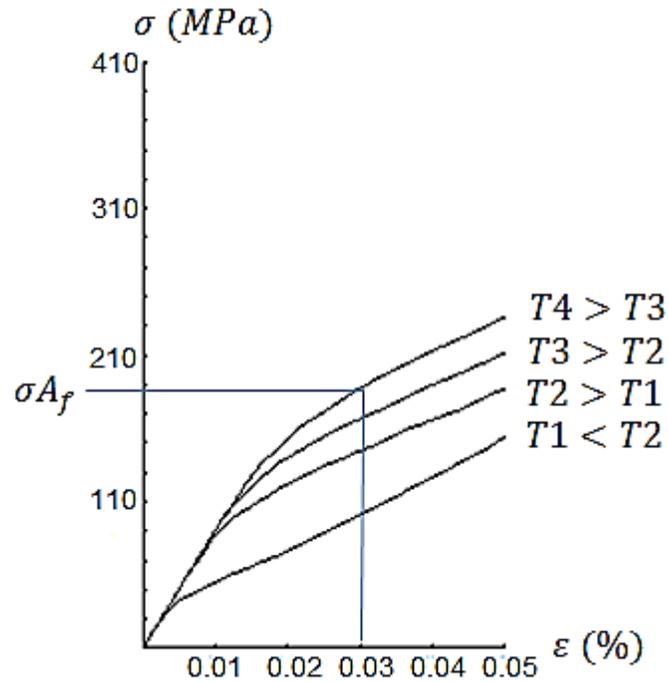


Figura 2.13. Diagramas $\sigma - \varepsilon$ del modelo propuesto por Cortés a distintas temperaturas para Cu-Al-Be.

Empleando el esfuerzo tangencial inducido al incrementar la temperatura puede ser introducido en la ecuación 2.1a y se obtendrá una función que revela la magnitud de la presión interna con la temperatura. Es importante destacar que con los parámetros de la Tabla 2.7 la presión máxima que aplicará el cople sobre el tubo será aproximadamente de 8.3 a 15.7MPa en un rango de temperaturas de 0 a 50°C. Es importante mencionar que la magnitud de la presión aplicada por el cople sobre el tubo puede ser disminuida si se selecciona una temperatura de transformación mayor que M_s , como se muestra en la Figura 2.14, donde se ve claramente que si $M_s = 20^\circ C$ el esfuerzo y por lo tanto la presión disminuye.

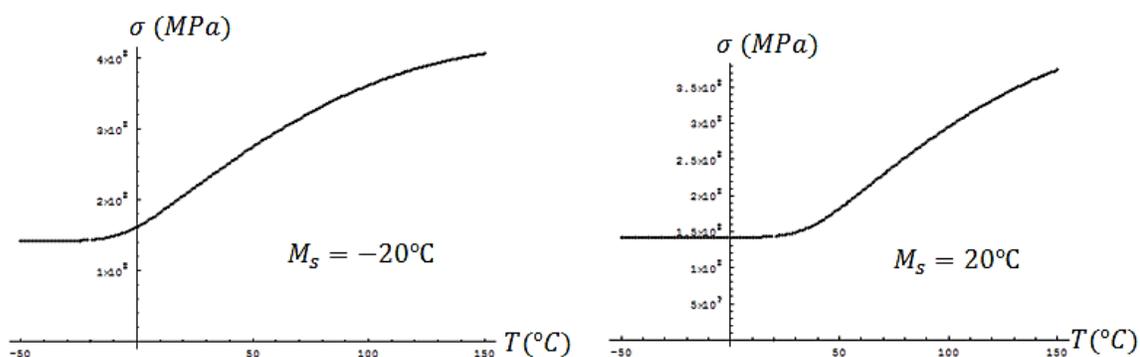


Figura 2.14. Efecto de la variación de M_s en un MMF.

Finalmente, si se considera una presión aplicada de 12MPa , un área de contacto de $8.6978 \times 10^{-4} \text{m}^2$ para un cople con un radio interno de $13.843 \times 10^{-3}\text{m}$ con una longitud $l = 0.02\text{m}$ es posible estimar la fuerza necesaria para desacoplar la junta considerando coeficientes μ en un rango de 0.15 a 0.25 que son valores estimados para la fricción en superficies metal-metal [26]. En la Tabla 2.8, se presenta distintos valores de fuerza de fricción para los correspondientes coeficientes de fricción donde se ve claramente que se cumple los valores de resistencia a la tracción para una junta soldada.

Tabla 2.8 Fuerza-coeficiente de fricción.

Coeficiente de fricción estático μ_s	Fuerza N
0.15	1565.6
0.16	1669.9
0.17	1774.3
0.18	1878.7
0.19	1983.0
0.20	2087.4
0.21	2191.8
0.22	2296.2
0.23	2400.5
0.24	2504.9
0.25	2609.3

Cabe mencionar que la fuerza de fricción depende tanto del coeficiente μ_s como del área de contacto. Es importante considerar que el coeficiente de fricción depende del acabado superficial.

Capítulo 3. Resultados y discusión

En el presente capítulo se describe la manufactura del prototipo del cople sin soldadura, así como los resultados experimentales obtenidos en una serie de pruebas realizadas a las muestras fabricadas. Dichos resultados son comparados con los valores calculados en la sección: Diseño del cople presentado en el capítulo 2. Finalmente se hacen propuestas de la factibilidad de escalonamiento y aplicaciones.

3.1 Método de fabricación

La aleación utilizada para generar el prototipo de cople de MMF se elaboró en el Instituto de Investigación en Materiales (IIM UNAM) por fundición en un horno de inducción al vacío como el que se muestra en la Figura 3.1. El material es una aleación con base cobre, con la siguiente composición aproximada: Cu-12%Al-0.5%Be. En la Figura 3.2, se muestran los lingotes rectangulares que se obtuvieron del material.



Figura 3.1 Horno de inducción con atmosfera controlada. [36]

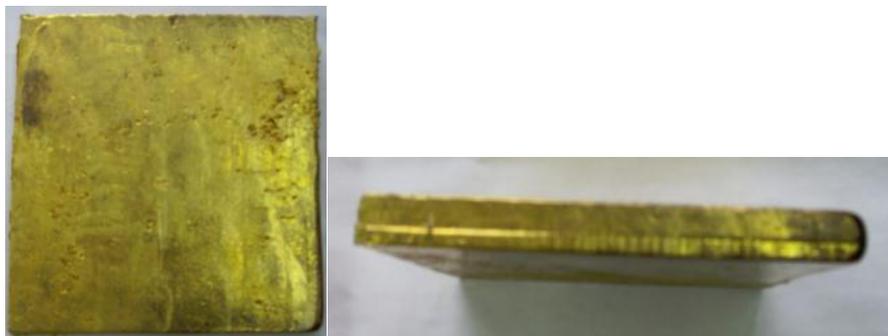


Figura 3.2. Colada de la placa de Cu-Al-Be

De este lote de fundición se tomó una muestra y fue sometida a una prueba denominada, Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC por sus siglas en Ingles) para determinar las temperaturas de transformación. En la Figura 3.3 se puede apreciar la curva flujo de calor-temperatura obtenida en el DSC donde se ve claramente que el valor de M_s es aproximadamente de -20°C .

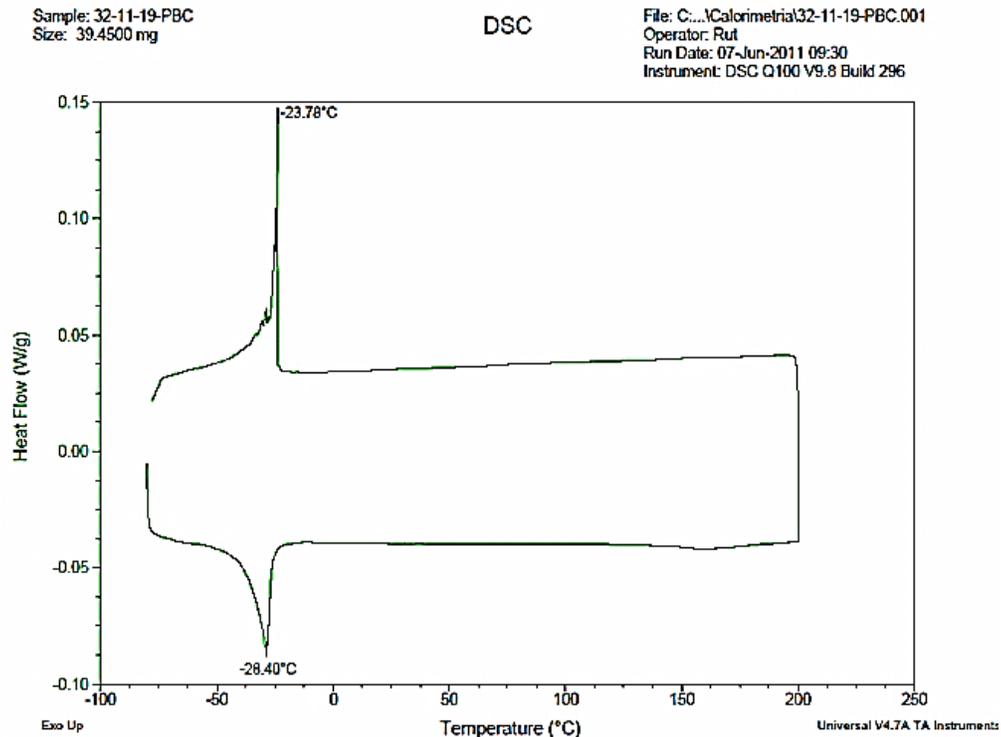


Figura 3.3 Calorimetría Diferencial de Barrido de una muestra Cu-Al-Be del lote fabricado.

3.1.1 Coples fabricados

Considerando que se ha reportado en la literatura que el Cu-Al-Be policristalino puede experimentar deformaciones súper-elásticas del 3 al 4% se determinaron las dimensiones de un cople que será insertado en un tramo de tubería de cobre cuyo diámetro externo es de 1.125" ó 28.575mm. De este modo, el diámetro interno del cople se llevara de 1.09" (27.71mm) hasta 1.133" (28.77mm) con lo que se obtendrá una interferencia a temperatura ambiente de 0.035" (0.889mm). Con estas medidas se fabricaron cinco prototipos de coples de MMF. Las medidas finales de los prototipos fueron:

$$\text{Diámetro interior} = 1.133 - 4\% = 1.133" - 0.043" = 1.091" = 27.71\text{mm}$$

$$\text{Diámetro exterior} = 1.169" = 29.71\text{mm}$$

3.1.1.1 Fabricación de los coples

Los prototipos de coples de Cu-Al-Be con MMF se fabricaron mediante un proceso denominado “fundición por inversión”. Este proceso consiste en generar un modelo en cera, el cual se elimina por calor cuando se fabrica el molde, con las medidas de la pieza que se desea obtener. La Figura 3.4 muestra el modelo para el cople con memoria de forma empleado en el estudio.

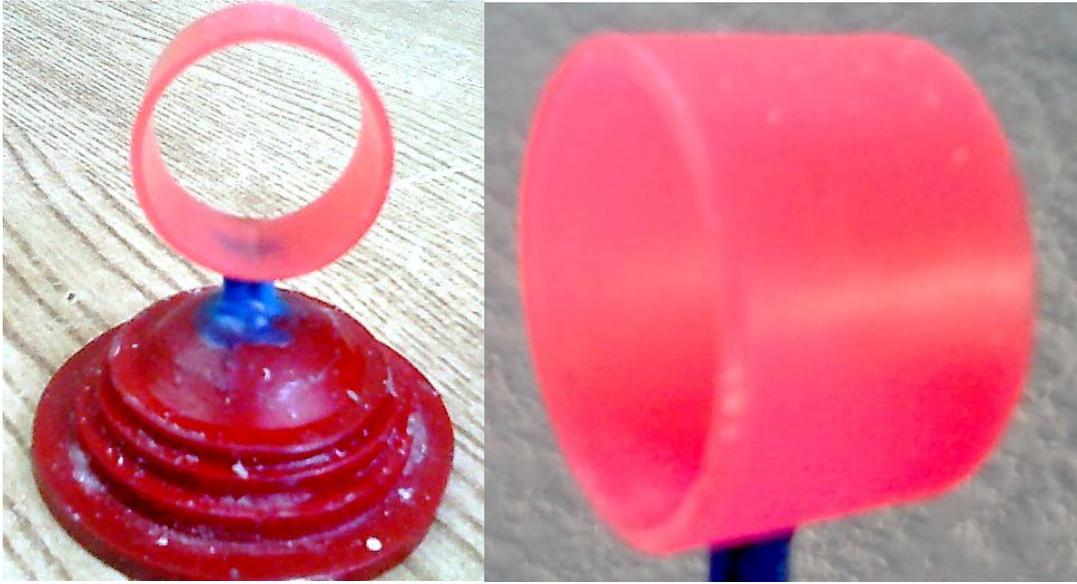


Figura 3.4 Modelo del cople en cera.

Obtenido el modelo, se procede a realizar el molde de la siguiente manera:

- 1.- El modelo se impregna con un recubrimiento de material refractario.
- 2.- Enseguida se calienta el cascaron de tal forma que se elimina la cera, aproximadamente a 100°C.
- 3.- El cascaron es recubierto con un material cerámico que es contenido por una caja, en este caso se utilizó un tramo de tubo de PVC como se observa en la Figura 3.5, así queda conformado el molde para vaciar el material.



Figura 3.5 Molde de yeso.

Siguiendo con este proceso se hicieron moldes para generar coples con los mismos parámetros. Cabe destacar que el acabado superficial de este proceso fue pobre y debido a ello el espesor no fue homogéneo en todo el perímetro del cople, encontrando variaciones de espesor de hasta 0.36mm. En la Tabla 3.1 se muestran las medidas promedio de los espesores de cada cople fabricado, así mismo, en la Figura 3.6 se pueden observar los coples obtenidos.

Tabla 3.1. Espesor de anillo de coples fabricados.

Cople	Espesor mm
1	1.44
2	1.71
3	1.5
4	1.65
5	1.8



Figura 3.6. Coples colados de Cu-Al-Be.

3.1.1.2 Tratamiento térmico

Una vez fabricados los coples de Cu-Al-Be se sometieron a un tratamiento térmico para obtener el efecto de memoria de forma. Como se mencionó en el Capítulo 1, dicho tratamiento se denomina “Betatizado” y se realizó de la siguiente manera:

- 1.- Se colocó el cople en una matriz de acero para evitar deformaciones no deseadas y para asegurar que el diámetro interno, al final del proceso fuera homogéneo.
- 2.- Enseguida, se introdujo el conjunto a una mufla, llegando hasta 750°C donde se mantuvo por 15 minutos.
- 3.- Se retiró el conjunto de la mufla para introducirlo en agua hirviendo aproximadamente a 93°C y se dejó ahí por 20 minutos. La Figura 3.7 muestra una gráfica tiempo-temperatura la cual indica los pasos del tratamiento térmico.
- 4.- Finalmente, se sacó del agua hirviendo y se dejó enfriar hasta temperatura ambiente.

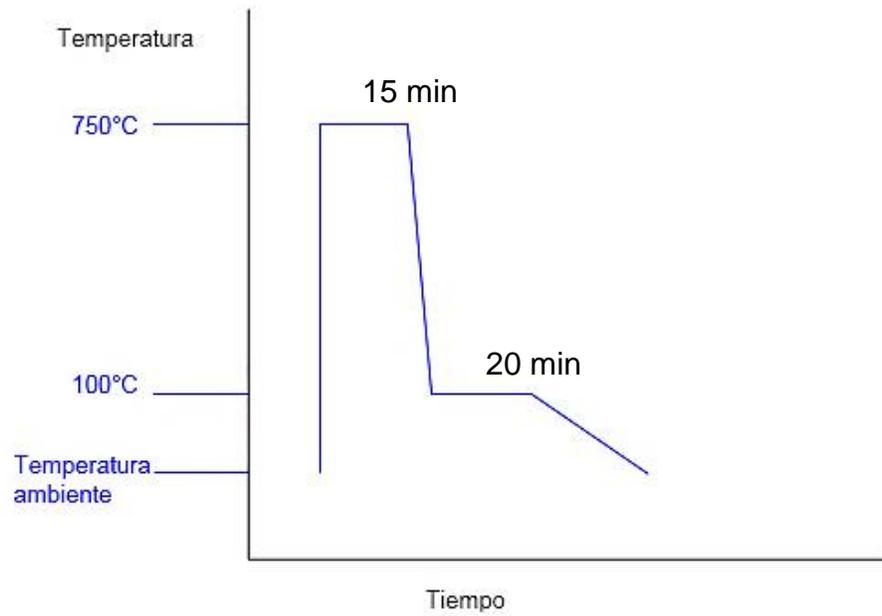


Figura 3.7 Diagrama del tratamiento térmico de Betatizado [Flores, 1993].



Figura 3.8. Mufla utilizada para el tratamiento térmico del Laboratorio de Mecánica Aplicada Fes Aragón.

3.2 Proceso de instalación del cople

En este apartado se describe el procedimiento que se siguió para la inserción de los prototipos de coples fabricados en Cu-Al-Be en tramos de tubería de cobre rígido tipo M de 1". Cada tubo de cobre fue instrumentado con 2 galgas extensométricas tangenciales en la pared interna del tubo. Cada galga fue colocada a 180° respecto a la otra como se aprecia en la Figura 3.9. Los tubos instrumentados permitieron medir las deformaciones inducidas por el cierre del cople al incrementar la temperatura hasta la temperatura ambiente.

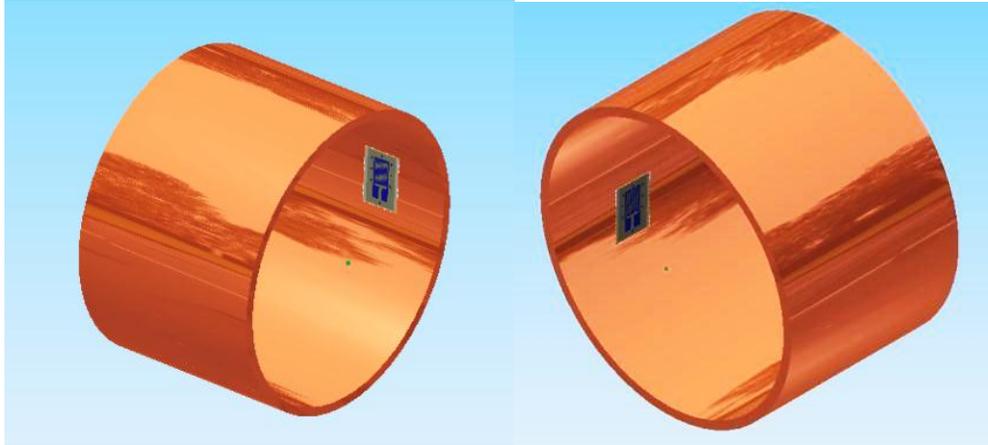


Figura 3.9. Tubos de cobre instrumentados con galgas extensométricas en la pared interna.

El proceso de inserción del cople en el tubo se divide en 3 pasos principales descritos a continuación:

- 1.- Se enfrió el cople hasta una temperatura menor a M_s sumergiéndolo en hielo seco que se encontraba a una temperatura aproximada de -78°C como se muestra en la Figura 3.10.



Figura 3.10. Cople con memoria de forma introducido en hielo seco.

2.- Una vez que el cople alcanza el equilibrio térmico con el hielo seco, y por lo tanto se puede asegurar que se encuentra en fase martensita, se hace pasar un avellanador en forma de cilindro dentro del cople mediante una prensa, como se muestra en la Figura 3.11. El cilindro avellanador ensancha en un 4% la pared interna del cople y con ello es posible insertar el tubo en el cople. El avellanador tiene un diámetro nominal de 1.133" y una entrada de 45° como se muestra en la Figura 3.12.



Figura 3.11. Prensa para introducir el avellanador en el cople.

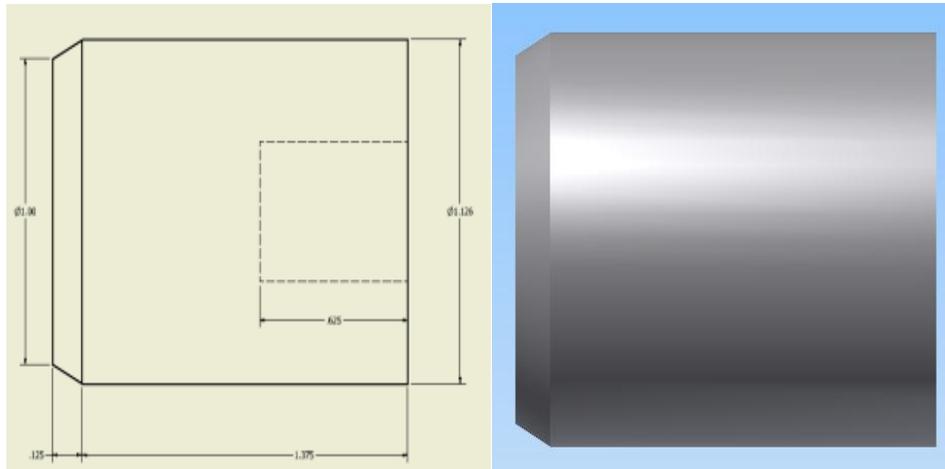


Figura 3.12. Avellanador

3.- Una vez deformado el cople, se retira el avellanador y enseguida se introduce en el tubo de cobre como se muestra en la Figura 3.13.

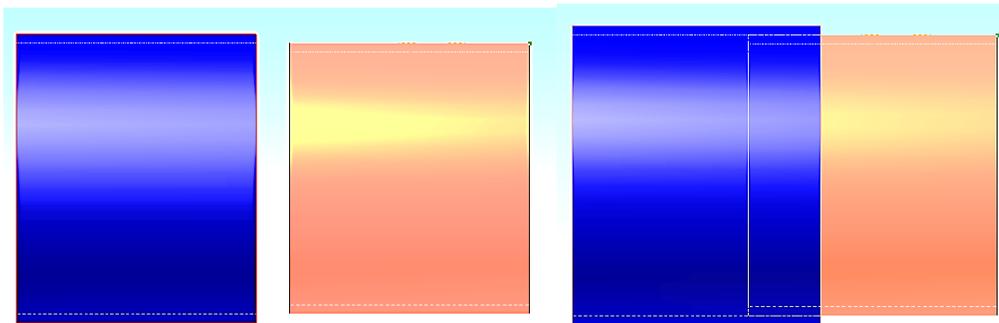


Figura 3.13. Cople ensanchado 4%, concéntrico para la inserción sobre el tubo de 1" de diámetro.

4.- Una vez insertado el cople se alambraron las galgas extensométricas como se muestra en la Figura 3.14, se conectaron al equipo de adquisición de datos y se monitoreó la deformación del tubo conforme la temperatura incrementó desde aproximadamente -30°C hasta temperatura ambiente. Es claro que a temperatura ambiente, cercana a 25°C , el MMF se ha transformado a la fase austenita con lo que el cople ejercerá una presión sobre la pared externa del tubo, que produce interferencia entre el cople y el tubo, según lo previsto por el modelo de Cortés que se mostró en el Capítulo 2.

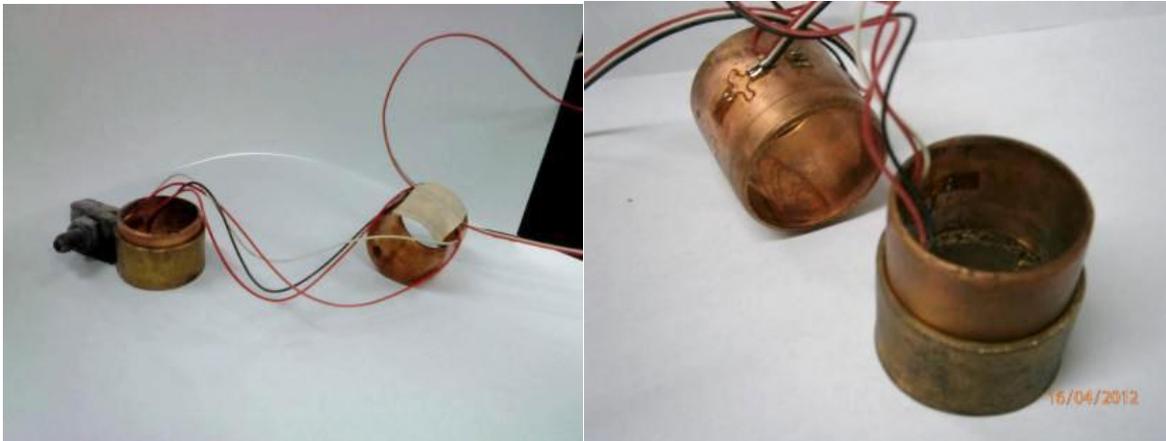


Figura 3.14. Inserción del cople de MMF a tubos de cobre instrumentados con 2 galgas extensométricas en su pared interna.

Las deformaciones capturadas en cada prueba permiten estimar la magnitud de presión que las original empleando las ecuaciones 2.2 *c* y 2.3 *d* con $r = a$:

$$P_0 = \frac{(a^2 - b^2)E_t * \varepsilon}{2b^2} \quad (3.1)$$

La Tabla 3.2 muestra los resultados de 11 pruebas de inserción realizadas.

Tabla 3.2. Deformaciones registradas por los sensores a temperatura ambiente después de la inserción.

Tubo instrumentado	Galga	Deformaciones registradas a 25°C (m/m)	Desplazamiento u_r (m)	P_0 (MPa)
1	A	0.00143375	1.98474E-05	9.4
	B	0.0005725	7.92512E-06	3.7
2	A	0.000600625	8.31445E-06	3.9
	B	0.00053	7.33679E-06	3.4
3	A	0.00115375	1.59714E-05	7.5
	B	0.000885	1.22511E-05	5.8
4	A	0.0012225	1.69231E-05	8
	B	0.000361875	5.00944E-06	2.3
5	A	0.0015575	2.15605E-05	10
	B	0.0007225	1.00016E-05	4.7
6	A	0.001492121	2.06554E-05	9.7
	B	0.00093697	1.29705E-05	6.1
7	A	0.001046875	1.44919E-05	6.8
	B	0.000685625	9.49111E-06	4.4
8	A	0.000893125	1.23635E-05	5.8
	B	0.0007725	1.06937E-05	5
9	A	0.000765625	1.05985E-05	5
	B	0.00054875	7.59635E-06	3.5
10	A	0.00074625	1.03303E-05	4.8
	B	0.000400625	5.54585E-06	2.6
11	A	0.00167125	2.31351E-05	10
	B	0.001000625	1.38517E-05	6.5

Por otro lado, la Figura 3.15 muestra la gráfica micro-deformaciones vs tiempo correspondiente a una de las pruebas realizadas al tubo instrumentado número 2.

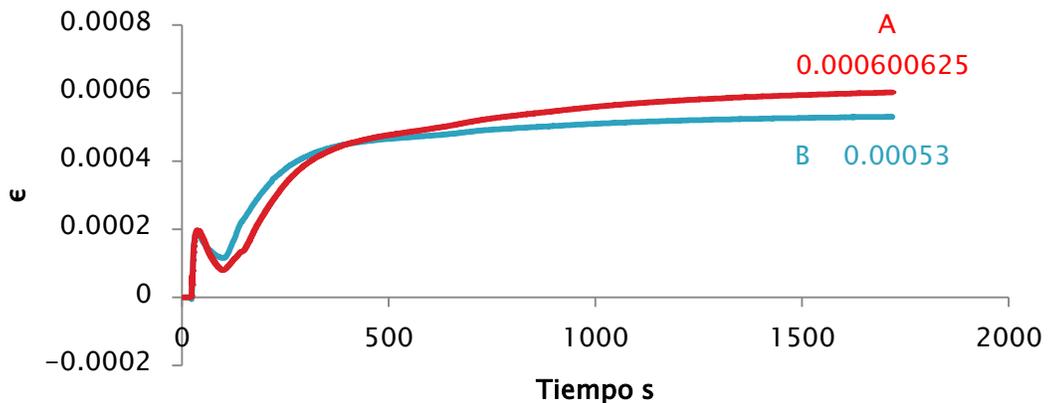


Figura 3.15. Grafica deformación-tiempo para la prueba con el sensor 2, galgas A y B.

Finalmente, la Figura 3.16 muestra la variación de la presión aplicada sobre el tubo en cada uno de las pruebas realizadas a todos los coples fabricados. En dicha gráfica, se aprecia el valor máximo de presión correspondiente a 10MPa, mientras que el valor mínimo fue 2.3MPa.

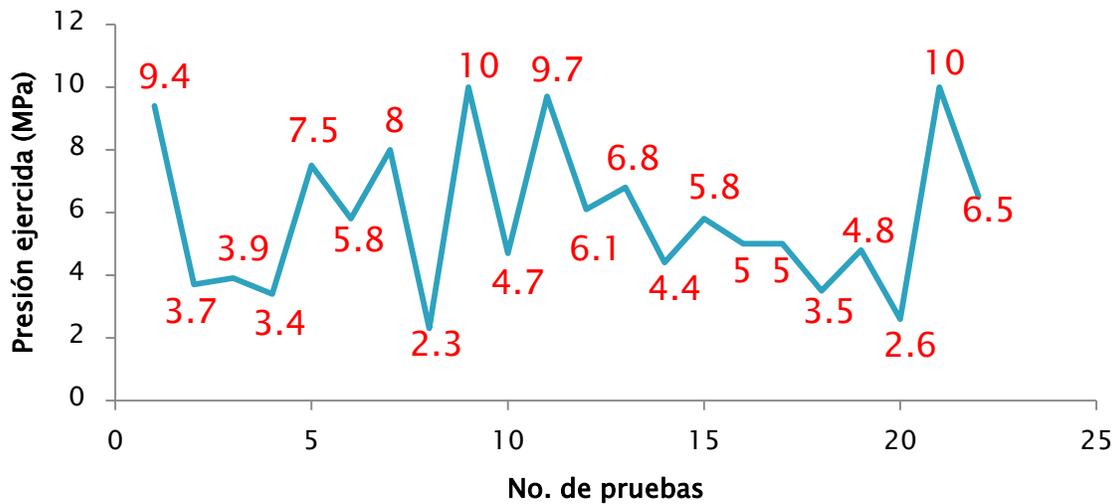


Figura 3.16. Variación de presión ejercida en las pruebas realizadas.

Es importante mencionar que la variación de la presión aplicada en la superficie se vio influenciada por la variación de espesor de cada cople, el acabado superficial y la forma asimétrica del tubo de cobre. De igual forma, es posible que la aleación con la que fueron hechos los prototipos, obtuviera cambios en su composición, provocando que la M_s se desplazara a temperaturas más altas, como se mostró en el diagrama de la Figura 2.14. Este fenómeno puede ocurrir ya que la aleación de MMF fue sometida al proceso de fundición para generar la geometría y tratamiento térmico para obtener el efecto memoria de forma.

Factibilidad de escalonamiento

3.2.1 Métodos de fabricación en serie

Como se mencionó en el apartado 3.1.1, el proceso de “fundición por inversión” empleado para fabricar los prototipos de coples sin soldadura del presente trabajo es relativamente sencillo y económico por lo que actualmente es ampliamente utilizado en la industria. Se puede utilizar prácticamente en cualquier tipo de material, especialmente aleaciones que presentan puntos de fusión altos. El acabado superficial que proporciona este método va de 63 a 125 μin , y las tolerancias que se pueden obtener van de ± 0.003 a ± 0.005 in/in. Es importante mencionar que este proceso se limita a piezas pequeñas menores a 5 o 6 libras y puede utilizarse con espesores de hasta 1 pulgada [37].

Es importante mencionar que para producir secciones tubulares se recomiendan procesos de manufactura diversos tales como: extrusión, estirado, o por fundición centrífuga. Debido a que la mayor parte de la aleación empleada para fabricar los coples es cobre, se deduce que puede ser conformada como la tubería de cobre. La producción de esta aleación promete ser factible ya que se puede elegir el proceso, así como la disponibilidad de materia prima. La Tabla 3.3 muestra las características de manufactura para diferentes aleaciones, en la cual se puede observar la versatilidad media para manufacturar una aleación base cobre.

Tabla 3.3. Características generales de manufactura para diferentes aleaciones. [29].

ALEACIÓN	CAPACIDAD DE FUNDICIÓN	CAPACIDAD DE SOLDADURA	MAQUINABILIDAD
Aluminio	e	f	g-e
Cobre	f-g	f	f-g
Fundición gris	e	d	g
Fundición blanca	g	vp	vp
Níquel	f	f	f
Aceros	f	e	f
Zinc	e	d	e

e=excelente g=bueno f=aceptable d=difícil vp=muy pobre

3.2.2 Recomendaciones para su aplicación

Como se mostró en el primer capítulo, existen una serie de aplicaciones para los coples de MMF, especialmente para las aleaciones de Ni-Ti debido a su biocompatibilidad, alta resistencia a la corrosión, y que el efecto memoria de forma permite una deformación de hasta el 8%. Sin embargo, el costo de esta aleación es muy elevado debido a que la tecnología para su fusión y procesamiento es bastante compleja. Actualmente existe un proceso de fundición popular para las aleaciones Ni-Ti denominado Vacuum Induction Melting (VIM). Los principales problemas de fundición para estas aleaciones se deben a la reactividad química con crisoles, el material del molde y su afinidad por los gases atmosféricos.

Por otro lado, en 2006 se publicó el estudio “A method of pipe joining using shape memory alloys” [38] el cual propone una técnica para la aplicación de una junta con un cople de MMF el cual permite ser deformado cerca del 2%. La aleación que emplean en dicho trabajo es Fe-30%Mn-6%Si y su principal limitación es que la deformación máxima permisible es menor en comparación con otras aleaciones lo cual provoca que la unión no sea óptima. En el caso de la aleación de Cu-Al-Be

que se empleó en el presente estudio mostró buenos resultados al ser deformada cerca del 4%.

Considerando lo anterior, es claro que los cople fabricados con la aleación Cu-Al-Be con memoria de forma ofrece una solución que promete ser competitiva con los cople de Ni-Ti ya que los elementos de la aleación son en su mayoría 100% reciclables dando sustentabilidad a su producción. Es importante mencionar que el cobre, que forma cerca del 87% en peso de la aleación citada, no se degrada ni pierde características al ser reciclado. Así mismo, el cobre es un elemento utilizado para hacer tuberías para la conducción de diversos fluidos debido a su alta resistencia a la corrosión, además de ser un elemento clave para el diseño de tubos en intercambiadores de calor debido a su excelente conductividad térmica, ciclos de refrigeración, etc.

Considerando lo anterior, se propone emplear dichos cople sin soldadura fabricados con una aleación de Cu-Al-Be en tubería de cobre rígido en sus diversos tipos K, L, M, aunque el estudio se realizó se llevó a cabo en el tipo M, el cual es el de menor cedula y por ende el menos rígido. Lo anterior, debido a que la presión generada por el cople no produjo daños a la geometría original del tubo.

También, se mostró en el presente capítulo que la junta con un cople de Cu-Al-Be puede ser diseñado para operar en distintos escenarios, los cuales pueden ser determinados con el diseño y consideraciones mostradas. Por ejemplo: temperatura de cierre del cople, fuerza para desacople de la junta, presión ejercida en la tubería en distintos intervalos de temperatura, etc.

Es importante mencionar que el alcance de esta tesis no contempló el análisis de corrosión galvánica y que podría ser un parámetro para la aplicación del cople de MMF. Este tipo de corrosión ocurre cuando dos metales de diferente potencial electroquímico están en contacto y sumergidos en un electrolito provocando corrientes eléctricas entre ellos provocando que un elemento se reduzca y otro se oxide. Sin embargo, se sabe que el fenómeno de corrosión galvánica puede evitarse si se unen metales situados en posiciones próximas en la serie galvánica.

Conclusiones

1. Se diseñó un cople sin soldadura, fabricado con una aleación de Cu-Al-Be con memoria de forma, para unir tubos de cobre rígido tipo M de 1". de diámetro nominal.
2. Se desarrolló una metodología para la fabricación e instalación de un cople sin soldadura fabricado con una aleación de Cu-Al-Be con memoria de forma.
 - a) El método empleado para fabricar los coples fue "fundición por inversión" a partir de un bloque de aleación obtenido por fundición en un horno de inducción.
 - b) La inserción del cople en las tuberías se realizó sumergiendo el conjunto en hielo seco en lugar de nitrógeno líquido.
3. Las pruebas realizadas a los prototipos de cople sin soldadura fabricados, fueron consistentes con los resultados obtenidos empleando el modelo propuesto por Cortés para simular el comportamiento mecánico de MMF.
 - a) Los coples fabricados resistieron sin problemas una deformación del 4%.
 - b) La presión inducida por el cople sobre el tubo no generó colapso.
4. Se puede asegurar que el escalamiento industrial de los coples de Cu-Al-Be es factible.

Referencias

1. K. Otsuka and C. M. Wayman,(1998) *Introduction to shape memory materials. Shape Memory Materials*. Cambridge University Press.
2. Ríos Cortés J. Alejandro, (2013). “*Evaluación de la eficiencia térmica de aleaciones con memoria de forma típicas para su uso en distintos dispositivos recuperadores de energía*”. Tesis de maestría. UNAM
3. G. A. Lara-Rodríguez, G. González, H. Flores-Zúñiga, J. Cortés-Pérez, (2006). *The effect of solidification and grain size on the transformation temperatures of Cu-Al-Be melt spun alloys*. *Materials Characterization* **57**, pp. 154-159.
4. Olson M., Cohen G.B., Clapp P.C., (1979), “*On the classification of displacive phase transformations*”. *Proceedings of the international conference on martensitic transformation*. ICOMAT 79, pp. 1-11.
5. Francisco Manuel Sánchez Arévalo, (2007). “*Estudio experimental del comportamiento mecánico de un material con memoria de forma*”. Tesis de doctorado. UNAM.
6. de la Flor López, Silvia (2005). *Simulación numérica y correlación experimental de las propiedades mecánicas en las aleaciones con memoria de forma*. Tesis de doctorado. Universitat Politècnica de Catalunya. Departament de Resistència de Materials i Estructures a l'Enginyeria.
7. Flores H. Stabilité thermodynamique de la phase beta et L'effect memoire double sens d'un alliage a memoire de forma du type Cu-Al-Be. Thèse de doctorat: Inst. Nat. Sc. Appl., Lyon., FRA 1993.
8. Etienne Patoor, Dimitris C. Lagoudas, (2005). *Shape memory alloys, Part I: General properties and modeling of single crystals*. LPMM-ISGMP/ENSAM, Ile du Saulcy, 57045 Metz Cedex 1, France.
9. Cortés-Pérez J., A. Souza Jiménez, G. A Lara Rodríguez, L. A. Ferrer A. and H. Flores Zúñiga, (2007). *Experimental study of stress induced martensite transformation under plane state of stress*. *Materials Science Forum*. **561-565**, Pp 1485-1488.
10. J. Cortés P., García C F. N., González R. J. G., Flores Z H. and. Reyes S. A, (2010). *Influence of grain interaction on the mechanical behavior in shape memory material in flexion test*. *Mater. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 1243*. pp 115-120
11. Cortés Jacinto, García F. N., Sánchez F. M. González J. G. and V. Amigó B. *Micromechanical analysis of stress induced martensite transformation in polycrystalline cu-al-be shape memory alloy*. *European Symposium of Martensitic Transformation 2012*. September 9 to 14, San Petersburg, Rusia.
12. C. Bouvet, S. Calloch and . C. Lexcellent., (2002). *Mechanical Behavior of a Cu-Al-Be Shape Memory Alloy under multiaxial proportional and*

- nonproportional loadings*. Journal of Engineering Material and Technology. 124, pp. 112-123.
13. Huang W. M. and J. J. Zhu. (2002). *To predict the behavior of shape memory alloys under proportional load*. *Mechanics of Materials*. 34, pp. 547-561.
 14. E.Patoor, A Eberhardt an M. Berveiller. *Micromechanical Modeling of Superelásticity in Shape Memory Alloys*, (1994). Proceedings of de III European Symposium on Mrtensitic Transformations BARCELONA, SPAIN: PLANES a, (ed), J de Physique Colloque C-2, pp. 501-506.
 15. Ríos Cortés J. Alejandro, (2009). *Diseño de dispositivos para generar movimiento a partir del comportamiento termomecánico de los materiales con memoria de forma*. Tesis de licenciatura. UNAM.
 16. Cortés-Pérez J., González R. J. G., J. Carrera B. H. Flores Z, (2009). *Mathematical analysis of experimental results in polycrystalline shape memory samples subject to a simple uniaxial tension test*. in *ESOMAT 2009 - The 8th European Symposium on Martensitic Transformations*, edited by P. Šittner, L. Heller and V. Paidar, Paidar, [10.1051/esomat/200903012], published by EDP Sciences (www.esomat.org).
 17. Cortés Pérez Jacinto, (1997). *"Superelastividad en aleaciones con memoria de forma Cu-Al-Be"* Tesis de licenciatura. UNAM
 18. Olaez García Jesús Enrique, (1998) *"Fabricación de la aleación y caracterización de cintas con memoria de forma por un proceso de solidificación rápida de la aleación Cu-Al-Be"*. Tesis de licenciatura. UNAM.
 19. Cortés Pérez J., (2007). *Modelación matemática de la transformación martensítica inducida por esfuerzo*. Tesis de doctorado. UNAM
 20. Flores Zuñiga, Horacio (1989). *Estudio de propiedades mecánicas de aleaciones con memoria de forma: Cu-Zn-Al y Cu-Al-Ni*. Tesis de Maestría. UNAM.
 21. Belkahala (S), Guenin (G), (1991). *Martensitic Transformation and metallurgical study of low temperature Cu-Al-Be Ternary Alloy*. European symposium on martensitic transformation and shape memory properties. Aussuis, FRA: Edited by G. Guenin, J. de Phys. IV. Colloque C-4, 145-150
 22. Martínez-Fuentes R.J., Sánchez-Arévalo F.M. García-Castillo, Lara-Rodríguez F.N, G.A., Cortés-Pérez J., Reyes-Solís A. (2013). *Micromechanical Behavior of Cu-Al-Be Shape Memory Alloy Undergoing 3-Point Bending Analyzed by Digital Image Correlation*, *Shape Memory Alloys - Processing, Characterization and Applications*, Dr. Francisco Manuel Braz Fernandez (Ed.), ISBN: 978-953-51-1084-2, InTech, Available from: <http://www.intechopen.com/books/shape-memory-alloys-processing-characterization-and-applications/micromechanical-behavior-of-cualbe-shape-memory-alloy-undergoing-3-point-bending-analyzed-by-digital>.

23. Cortes Pérez J., (1998). *Contribución al estudio de la pseudo-elasticidad en aleaciones con memoria de forma*. Tesis de maestría. UNAM
24. <http://www.aerofit.com/sma.html>
25. *Official publication of the American Society of Plumbing Engineers, (2001).* “Shape Memory Alloys simplifies medical gas work”.
26. <http://www.smarttapinc.com/>
27. Kansas H. C., Glenn E. Baker, Thomas G. Grego (1983). *Procesos básicos de manufactura*. McGraw-Hill
28. Leo Alting (1996). *Procesos para ingeniería de manufactura*. Alfa omega Grupo Editor
29. SEROPE KALPAKJIAN (2002). *Manufactura, ingeniería y tecnología*.
30. NMX-W-101/1-SCFI-2004 / NMX-W-101/2-SCFI-2004
31. NOM-002-CNA-1995
32. Shigley Joseph Edward, Larry D. Mitchell. *Diseño en ingeniería mecánica* McGraw-Hill, 1997
33. Dally James W. *Experimental stress analysis*. Fourth Edition.
34. Norton Robert L.. *Diseño de máquinas*. Pearson Education, 2011.
35. González Jorge Luis, (1999). *Metalurgia mecánica*.
36. Sánchez Arévalo Francisco Manuel. (2004). *Estudio de la deformación en materiales policristalinos que presentan memoria de forma mediante una técnica de análisis de imágenes*. Tesis de maestría. UNAM
37. Reyes Solís Alberto. *Procesos de conformado de materiales*. Documento de trabajo No. 21. UNAM. FES Aragón.
38. K.K. Jee, J.H. Hana, W.Y. Jangb, (2006). *A method of pipe joining using shape memory alloys*. Division of Materials Science and Engineering, Korea Institute of Science and Technology, Seoul 136-791, Republic of Korea, Division of Metallurgical and Materials Engineering, Chosun University, Gwangju 501-759, Republic of Korea. Proceedings of the International Conference on Martensitic Transformations, Volumes 438–440, 25 November 2006, Pages 1110–1112.
39. H. Sakamoto and K. Shimizu. *Experimental Investigation of Cyclic Deformation and Fatigue Behavior of Polycrystalline Cu-Al-Ni Shape Memory Alloys above Ms*. Transactions of Japan Institute of Metals, 8, pp 592-600. (1986).