

# Alivio de tensiones residuales: Tratamiento térmico vs. Vibración



**Gorka García Rodero**

Trabajo Fin de Máster en Ingeniería de  
Materiales y Fabricación

Escuela Técnica Superior de Ingenieros  
Industriales y de Telecomunicación

Septiembre 2014

## INDICE

1. Tensiones residuales
  - 1.1. Definición
  - 1.2. Origen de las tensiones residuales
  - 1.3. Tipos de tensiones residuales
  
2. Tensiones residuales en uniones soldadas
  - 2.1. Factores que influyen sobre las tensiones y deformaciones de soldeo
  - 2.2. Origen de las tensiones residuales y deformaciones en uniones soldadas
  - 2.3. Efectos de las tensiones residuales en el comportamiento de la estructura en el servicio
  - 2.4. Ciclos térmicos y estructura de las uniones soldadas
  
3. Métodos para medir tensiones residuales
  
4. Métodos para reducir las tensiones residuales o deformación en uniones soldadas
  
  
5. Alivio de tensiones residuales
  - 5.1. Propósito del alivio de tensiones residuales
  - 5.2. Métodos existentes de alivio de tensiones residuales
  
6. Teorías de alivio de tensiones
  
7. Puesta en contexto del proyecto
  
  
8. Alivio de tensiones residuales por vibración
  - 8.1. Galería de imágenes
  - 8.2. Aliviado de tensiones por vibración de grandes estructuras mecano soldadas
  
9. Alivio de tensiones mediante tratamiento térmico
  
  
10. Ventajas y desventajas de cada método. Comparativa entre ambos
  
  
11. Encuesta acerca del conocimiento y uso del alivio de tensiones residuales mediante vibración
  
  
12. Aplicación a un caso real



# Alivio de tensiones residuales: Tratamiento térmico vs. Vibración

Trabajo Fin de Máster en Ingeniería de Materiales y Fabricación

Gorka García Rodero

---

13. Conclusiones

14. Bibliografía

15. Relación de Ilustraciones

16. Anexos



## 1. TENSIONES RESIDUALES

### 1.1. DEFINICION

Primeramente voy a definir lo que se conoce por tensiones residuales. Las tensiones residuales son aquellas tensiones que quedan o permanecen en el material en ausencia de cargas externas.

### 1.2. ORIGEN DE LAS TENSIONES RESIDUALES

El origen de las tensiones residuales está en los procesos de fabricación de los materiales y en las condiciones de servicio que dan lugar a deformaciones no uniformes. Pueden ser deformaciones plásticas no uniformes de tal manera que el material está sometido a diferentes valores de deformación plástica en diferentes puntos. También pueden tratarse de deformaciones térmicas cuyo valor también varía para diferentes puntos. Cuando estas deformaciones se relajan se producen entonces las tensiones residuales.

Podríamos decir que cualquier proceso de conformado de un material en los que haya tratamientos termo mecánicos es susceptible de dejar en el material un estado de tensiones residuales. Algunos ejemplos pueden ser el conformado en frío de metales como en la laminación y trefilado entre otros, tratamientos superficiales como el shot peening, procesos de soldadura, etc.

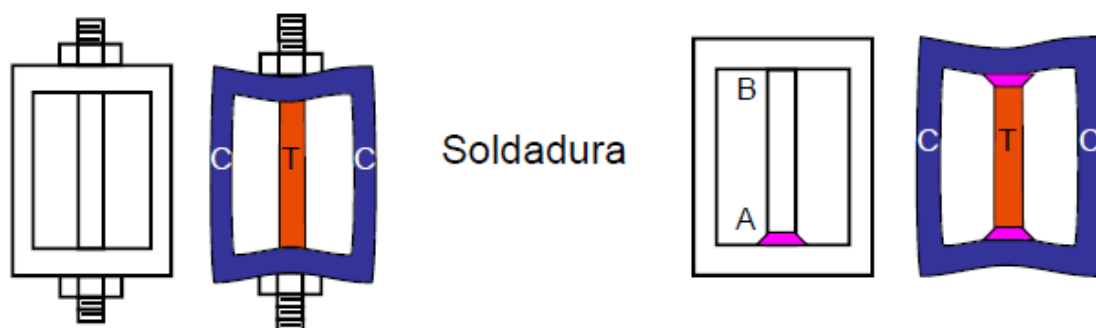


Ilustración 1: Ejemplos gráficos de tensiones residuales

En la ilustración superior izquierda tenemos un marco en azul y tenemos una barra de color rojo con dos tuercas. Si comenzamos a apretar estas tuercas, lo que sucede es que la barra está trabajando a tracción mientras que el marco está trabajando a compresión. Este es un caso típico de tensión residual ya que en este conjunto no hay ninguna carga externa aplicada. Este sistema puede ser el ejemplo conceptual de un material policristalino bifásico que presenta una configuración tensional en la que unos granos están sometidos a tracción mientras que otros granos están sometidos a compresión.



En la ilustración superior derecha representa un caso similar en el que contamos con el mismo marco y la misma barra pero en este caso fijo la barra con soldadura. De esta manera cuando sueldo el primer extremo de la barra con soldadura, esta se encuentra mucho más caliente que el marco de tal forma que cuando fijamos el otro extremo de la barra, esta va a intentar comprimirse, pero como el marco no le va a dejar, la barra va a quedar en tracción mientras que el marco va a quedar en compresión. Así pues, se trata de otro ejemplo de tensiones residuales en el que el material está sometido a una tensión sin estar sometida a carga externa alguna.

Es importante determinar si las tensiones residuales son perjudiciales o beneficiosas. Esto quiere decir que las tensiones residuales por sí mismas no siempre son perjudiciales.

Las tensiones residuales son importantes fundamentalmente porque son desconocidas. La tensión aplicada sobre una estructura o sobre un material es fácil de medir y por tanto de introducirla por ejemplo en un cálculo por elementos finitos. Sin embargo la tensión residual es una tensión interna del material difícil de medir y que como consecuencia no suelen incluirse en el cálculo. Como bien sabemos la tensión de servicio de una estructura o material se compone por la suma de la tensión aplicada y de la tensión residual. Esto significa que si la tensión residual es desconocida, la tensión de servicio es como consecuencia también desconocida con el consiguiente riesgo. Este desconocimiento de la tensión de servicio es especialmente importante cuando estamos tratando con componentes y estructuras de alto riesgo, responsabilidad o valor económico.

Las tensiones residuales nos interesa conocerlas fundamentalmente por su influencia en los fenómenos de rotura frágil, corrosión bajo tensión y fatiga.

Las tensiones residuales son siempre un perfil, es decir, no puede ocurrir que en todas las secciones de un material tengamos solamente tensiones residuales de compresión, o únicamente tensiones residuales de tracción. Esto no puede ocurrir debido a que las tensiones residuales son auto equilibradas para que haya un equilibrio mecánico. Por lo tanto el hecho de que las tensiones residuales sean un perfil significa que si en un punto del material tengo tensiones residuales de compresión, en otro punto del material tendré inevitablemente tensiones residuales de tracción.



Este hecho trato de explicarlo más claramente a continuación con estas figuras.

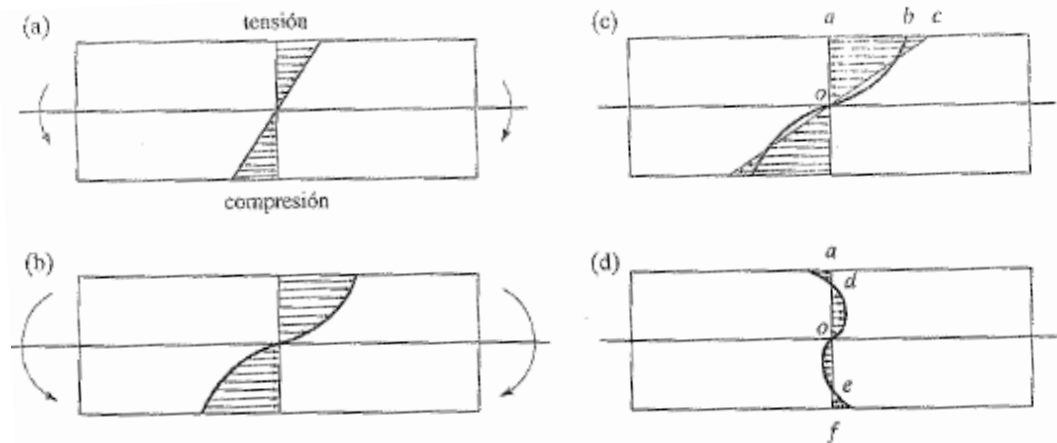


Ilustración 2: Perfil de las tensiones residuales

El momento de flexión en (a) produce una distribución elástica lineal de tensiones. Cuando aumenta el momento externo en (b) las fibras exteriores de la barra alcanzan un nivel de tensión lo suficientemente alto para provocar fluencia y sufrir una deformación permanente. Si retiramos el momento de flexión externo de la barra en (c) es como si aplicásemos un momento igual pero opuesto sobre la barra. En consecuencia los momentos de las áreas  $oab$  y  $oac$  deben ser iguales. La línea  $oc$  es lineal debido a que la retirada de la carga y la recuperación es elástica. La diferencia entre las dos distribuciones de tensiones da el patrón de tensiones residuales dentro de la barra en (d). Existen tensiones residuales de compresión en las capas  $ad$  y  $oe$ , mientras que existen tensiones residuales de tracción en las capas  $do$  y  $ef$ . Debido a que no existen fuerzas externas aplicadas, las fuerzas internas resultantes de estas tensiones residuales deben estar en equilibrio estático.

El equilibrio de las tensiones residuales en (d) puede ser perturbado al eliminar una capa de material de la barra, como por ejemplo en un proceso de mecanizado o rectificado. La barra adquirirá entonces un nuevo radio de curvatura para equilibrar las fuerzas internas. Tales perturbaciones de las tensiones residuales llevan al alabeo de las estructuras como se puede observar más abajo. El equilibrio de las tensiones residuales también puede ser perturbado por el relajamiento de estas tensiones tras un periodo. Las tensiones residuales también pueden ser provocadas por gradientes de temperatura dentro de un cuerpo, como los que ocurren durante el enfriamiento de una fundición o una forja o tras un proceso de soldadura. En este caso la dilatación y las contracciones locales provocadas por los gradientes de temperatura dentro del material producen una deformación no uniforme.



## Alivio de tensiones residuales: Tratamiento térmico vs. Vibración

Trabajo Fin de Máster en Ingeniería de Materiales y Fabricación

Gorka García Rodero

Las tensiones residuales de tracción en la superficie de un material o estructura son por lo general indeseables debido a que reducen la resistencia a la fatiga y a la fractura de la misma. Esto se debe a que la superficie con tensiones residuales de tracción no puede soportar tensiones adicionales producidas por fuerzas externas, tan grandes como los soportados por una superficie sin tensiones residuales. Esta reducción de la resistencia es característica particularmente de los materiales frágiles o menos dúctiles, en los que la fractura ocurre con poca o ninguna deformación plástica precediendo a la fractura. Las tensiones residuales de tracción también pueden llevar, después de un periodo, al agrietamiento por tensión o agrietamiento por corrosión bajo tensión. En cambio, las tensiones residuales de compresión sobre una superficie generalmente son deseables. De hecho para aumentar la vida a la fatiga de los componentes, se pueden aplicar tensiones residuales de compresión a las superficies mediante técnicas como el granallado, el shot peening, etc.

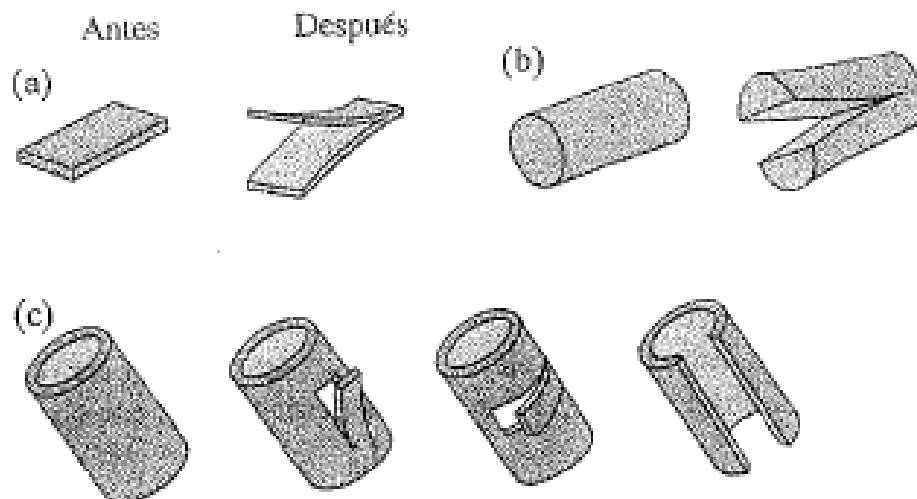


Ilustración 3: Efecto de las tensiones residuales en productos laminados



## 1.3. TIPOS DE TENSIONES RESIDUALES

Pueden dividirse en dos grandes grupos: macro y micro tensiones pudiendo hallarse ambas presentes al mismo tiempo.

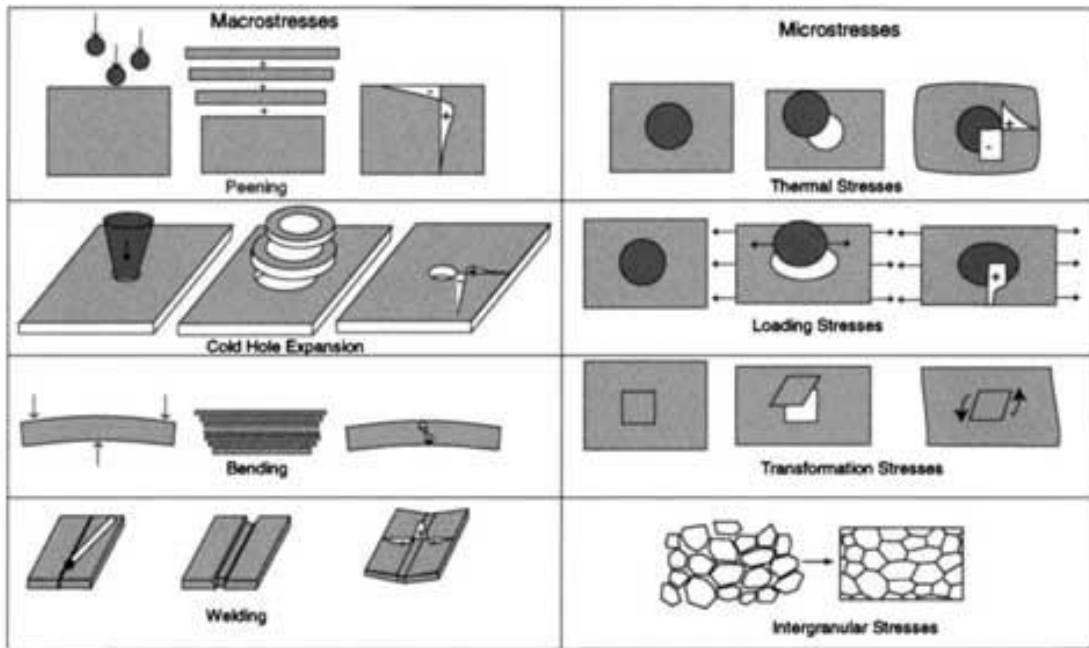


Ilustración 4: Origen de las tensiones residuales

- Tensiones residuales macroscópicas o macro tensiones o tensiones de tipo I: tensiones esencialmente constantes a lo largo de una longitud relativamente grande (bastante mayor a la del tamaño de grano). Estas son las tensiones residuales que queremos modelizar cuando hacemos un cálculo por elementos finitos. Estas tensiones tienen su origen en el procesado del material como por ejemplo en procesos de mecanizado, soldadura, aplicación de tratamientos térmicos.
- Tensiones residuales microscópicas o micro tensiones o tensiones de tipo II y III: se encuentran a una escala mucho más pequeña, escala de tamaño de los granos. Puedo tener variaciones locales de macro tensión a la que hacíamos mención anteriormente. Estas tensiones tienen su origen en la textura de los granos y en la anisotropía elástica y plástica. Las tensiones residuales tipo II varían en la escala de un grano mientras que las de tipo III corresponden a las tensiones que surgen dentro de un grano como consecuencia de la presencia de dislocaciones u otros defectos cristalinos. Estas micro tensiones a menudo tienen su origen en la presencia de diferentes fases o constituyentes en un material. **(1)**



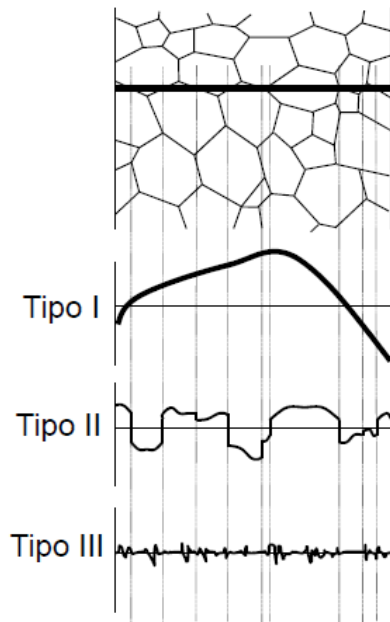


Ilustración 5: Tipos de tensiones residuales

En lo que supone la inmensidad del ámbito de las tensiones residuales y los métodos para aliviarlas, vamos a intentar incidir especialmente o al menos vamos a poner el foco de una manera más intensa en las tensiones residuales asociadas al proceso de soldadura. Este campo encierra particularidades que lo diferencian claramente frente al alivio de tensiones de estructuras no soldadas. Es por esta razón que a continuación tratare de desgranar a modo introductorio algunos de los aspectos del proceso de la soldadura asociados a las tensiones residuales y su posterior aliviado.



## 2. TENSIONES RESIDUALES EN UNIONES SOLDADAS

Los procesos de soldadura por fusión de los materiales metálicos, en los que se supera la temperatura de "liquidus" del material base y del material de aportación, son los más ampliamente utilizados en la industria por la relativa facilidad con que puede obtenerse una unión metalúrgica perfecta, por su rapidez y por sus grandes posibilidades de automatización. No obstante, este tipo de procesos requiere un aporte térmico importante que permita superar la temperatura de fusión de los materiales a unir. Este aporte de energía provoca un flujo de calor al material base.

En los procesos de soldadura el aporte de energía está focalizado en una zona concreta, lo que provoca una transferencia o disipación de calor. Esta transmisión de calor en los materiales metálicos provoca una distribución de temperaturas y un ciclo térmico característico en la unión soldada. Dicho ciclo térmico es el primer origen de los cambios micro estructurales, tensiones y deformaciones que se producen y que afectan al comportamiento en servicio de la unión soldada de forma importante. Esto es debido a que los campos de distribución de temperaturas que se obtienen son los que determinan las tensiones residuales, las deformaciones térmicas y las debidas a eventuales transformaciones que pueden acompañar a los cambios de estado y de micro estructura. **(2)**

### 2.1. FACTORES QUE INFLUYEN SOBRE LAS TENSIONES Y DEFORMACIONES DE SOLDEO

Durante el soldeo el material base es calentado por el aporte térmico del proceso de soldeo.

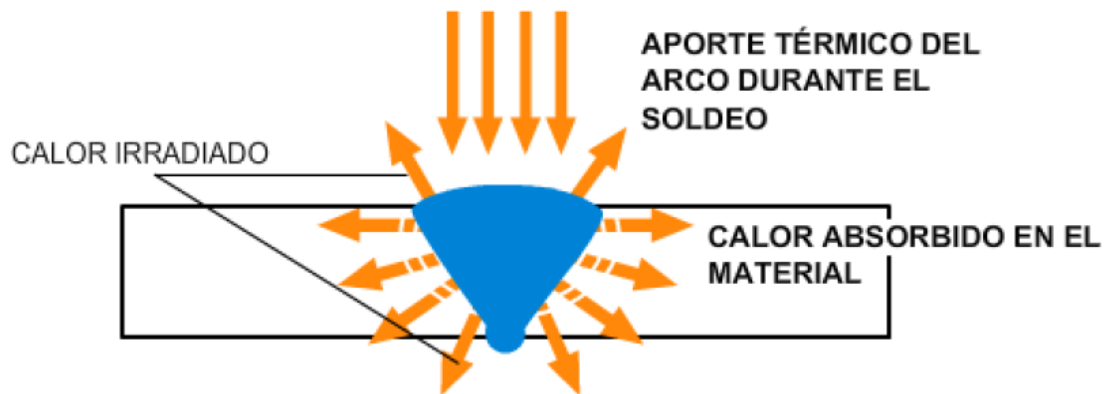
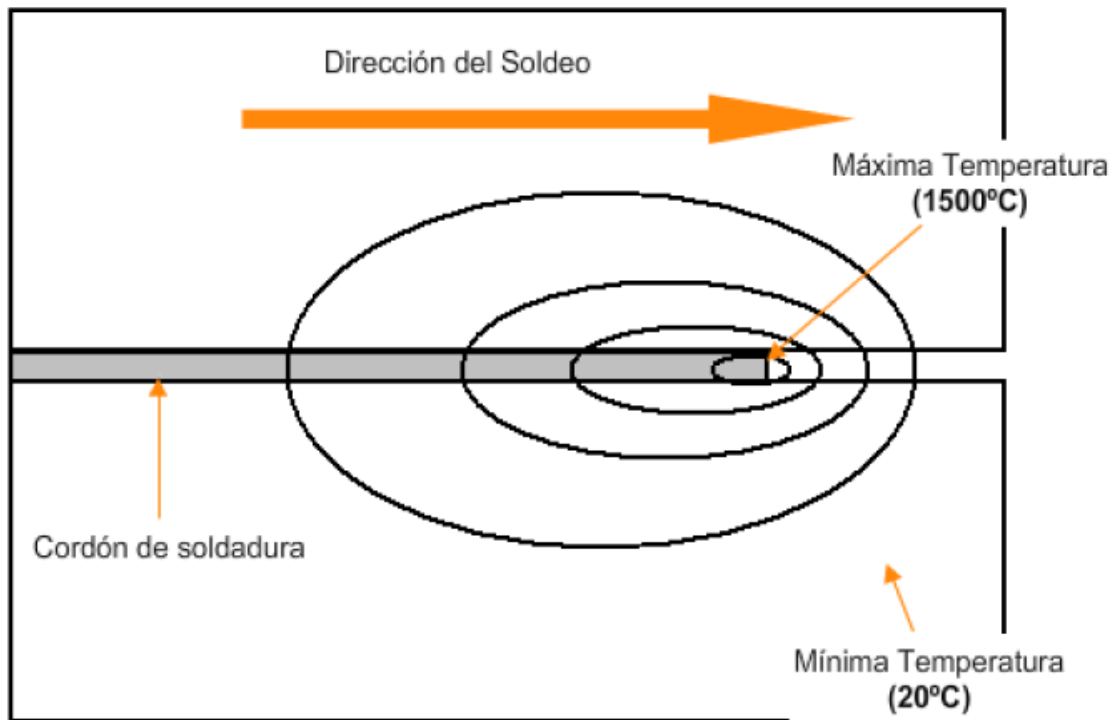


Ilustración 6: Aporte térmico del proceso de soldeo

Los niveles de temperatura se distribuyen uniformemente por todo el material, desde el punto de fusión alcanzado en el lugar donde se está soldando, hasta la temperatura inicial en las zonas no afectadas por el calor. Estos niveles se llaman isoterms y tienen idealmente forma de elipses, cada elipse representa la línea que une todos los puntos que tienen la misma temperatura en un determinado momento. La forma y el tamaño de estas isoterms dependen de la conductividad térmica del material base y de la velocidad de soldeo que a su vez depende de cada proceso de soldeo. Cada punto de sector afectado por el calor del medio energético

de la soldadura experimenta un incremento y una disminución de temperatura. Los puntos más cercanos a la unión son los que alcanzan las más altas temperaturas.



### *Isotermas de Soldeo*

Ilustración 7: Isotermas de soldado

Sin duda alguna, durante el avance del soldeo se produce una dilatación para cada incremento de temperatura y una contracción para cada enfriamiento del metal, lo que produce a su vez un juego de fuerzas internas de tracción y compresión. A consecuencia de las diferentes temperaturas, se presentan dilataciones y contracciones puntual y temporalmente. Las deformaciones plásticas que se originan a las temperaturas mayores a los 800 °C terminan por causar las tensiones residuales en el material.

#### 2.2. ORIGEN DE LAS TENSIONES RESIDUALES Y DEFORMACION EN UNIONES SOLDADAS

Durante la solidificación el metal se contrae muy fuertemente, debido al cambio de estado de líquido a sólido. Esto se debe a que en estado líquido el metal tiene menor densidad que cuando está en estado sólido. Esto significa que el cordón depositado se contrae inevitablemente ya al momento de la solidificación, creando tensiones residuales iniciales por la solidificación. Adicionalmente con el enfriamiento a temperatura ambiente habrá un incremento de las tensiones residuales por la contracción debidas al efecto inverso a la dilatación térmica.



## Alivio de tensiones residuales: Tratamiento térmico vs. Vibración

Trabajo Fin de Máster en Ingeniería de Materiales y Fabricación

Gorka García Rodero

La figura de más abajo muestra el origen de las tensiones longitudinales y transversales:

- Analizando una sola chapa
- Que se calienta por un borde
- Que después se contrae deformando la chapa
- La supuesta deformación de las chapas de la unión a tope con los esfuerzos transversales y longitudinales

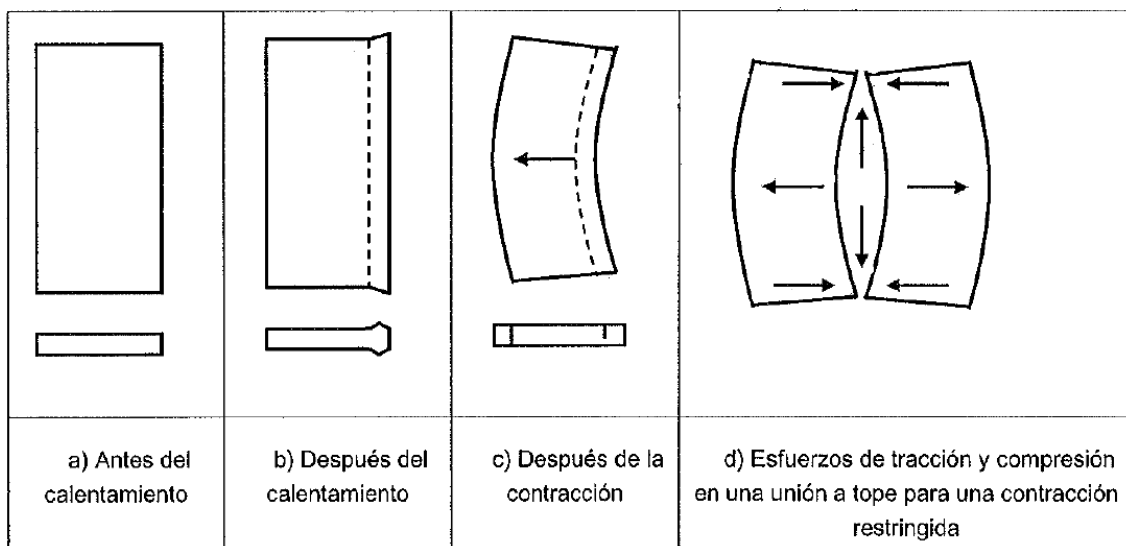


Ilustración 8: Origen de las tensiones transversales y longitudinales



En la siguiente figura se muestra la distribución de tensiones en dos chapas unidas a tope.

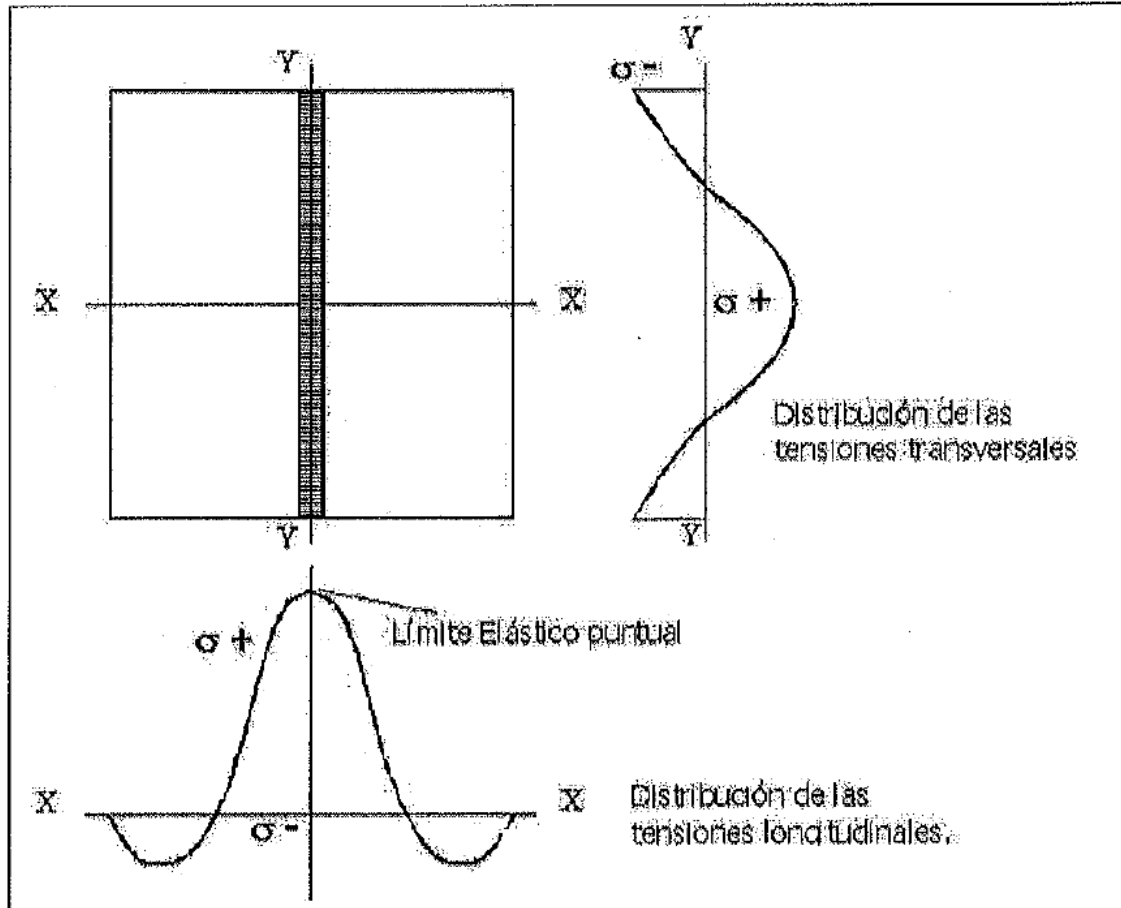
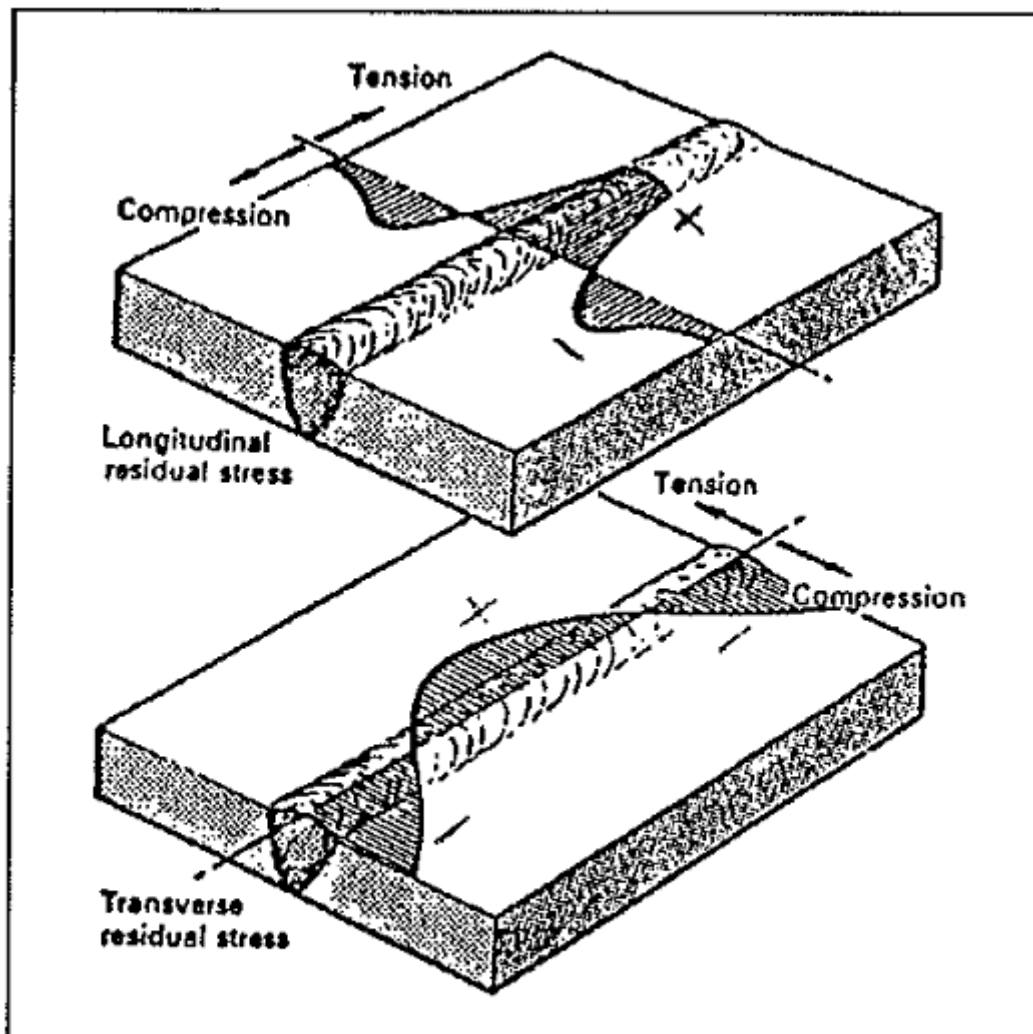


Ilustración 9: Distribución de tensiones en dos chapas unidas a tope

(3)





**FIGURA 3.7-26. TENSIONES RESIDUALES EN UNA UNIÓN A TOPE**

**Ilustración 10: Tensiones residuales en una unión a tope**

Las tensiones residuales pueden superar el límite elástico en algunos puntos de los cordones de soldadura y la fractura es en general frágil e intempestivo. El efecto de la concentración de tensiones en las uniones soldadas es similar al efecto de entalladura. La combinación de esfuerzos residuales en diferentes direcciones sobrecarga al acero y le producen una fisura sin la deformación normal que suele darse en un elemento sin tensiones residuales.

**2.3. EFECTOS DE LAS TENSIONES RESIDUALES EN EL COMPORTAMIENTO DE LA ESTRUCTURA EN EL SERVICIO**

Las tensiones internas se ocasionan con la limitación de la contracción del depósito de soldadura. Estas tensiones pueden ser de una magnitud tal que llegan a producir grietas y



roturas bruscas en el material base, en la zona afectada por el calor o en la soldadura. La limitación de la posibilidad de deformación tiene diferentes causas que se pueden agrupar como sigue:

- Rigidez externa: demasiada rigidez por una longitud muy corta entre dos soportes o elementos rígidos, el cordón de soldadura esta con tensiones internas.

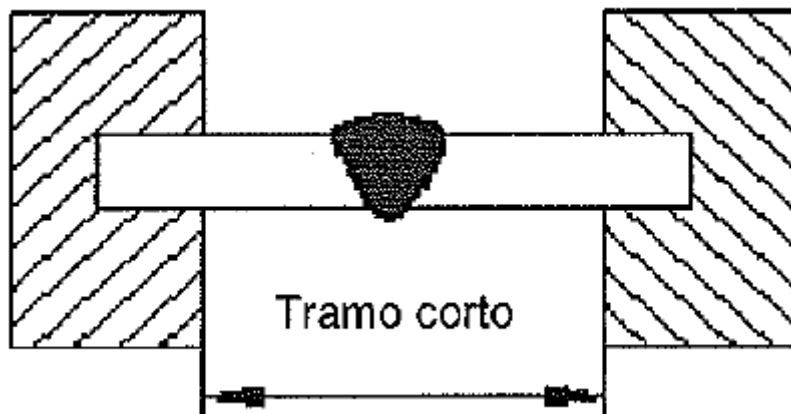


Ilustración 11: Limitación de deformación por rigidez externa

- Rigidez interna por el material adyacente al cordón: los cordones de soldadura están con tensiones internas debido a la chapa del perfil soldado.

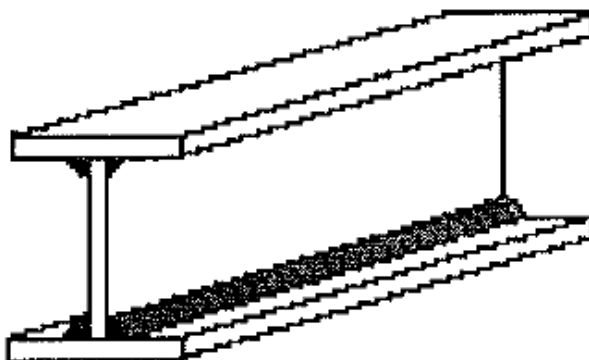


Ilustración 12: Limitación de deformación por rigidez interna por material adyacente al cordón

- Rigidez interna por acumulación de cordones de soldadura: los cruces de los cordones de soldadura no se pueden deformar más, debido a las contracciones en diferentes direcciones.



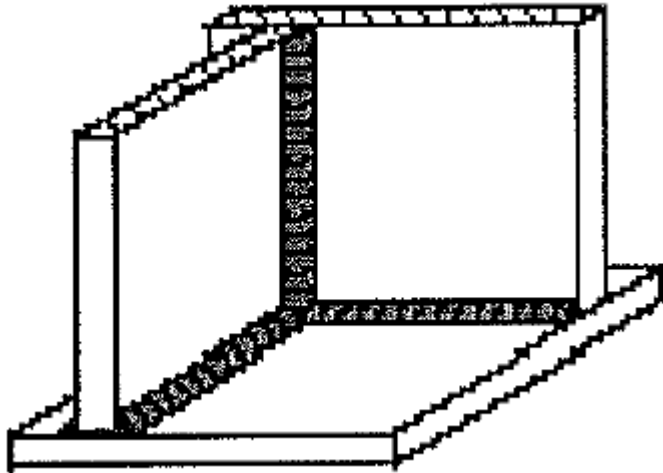


Ilustración 13: Limitación de deformación por rigidez interna por acumulación de cordones de soldadura

El riesgo de tensiones residuales se deberá evitar desde el diseño de la estructura, planificando el soldeo para definir la secuencia de soldeo más adecuada, evitando los cruces de cordones, buscando soluciones que distribuyan los esfuerzos en lugar de concentrarlos en puntos críticos.

La importancia del peligro de tensiones residuales radica en que:

- Las tensiones residuales de la soldadura no son visibles
- Las tensiones residuales de la soldadura se pueden presentar en varias direcciones
- Las tensiones residuales de la soldadura pueden ocasionar grietas y fracturas frágiles
- Las tensiones residuales de la soldadura son especialmente peligrosas en tramos cortos con rigidez externa y en espesores gruesos de material

La restricción de la contracción favorece el aumento de las tensiones residuales, en ocasiones los esfuerzos pueden ser mayores a la resistencia del material, entonces se producen grietas.





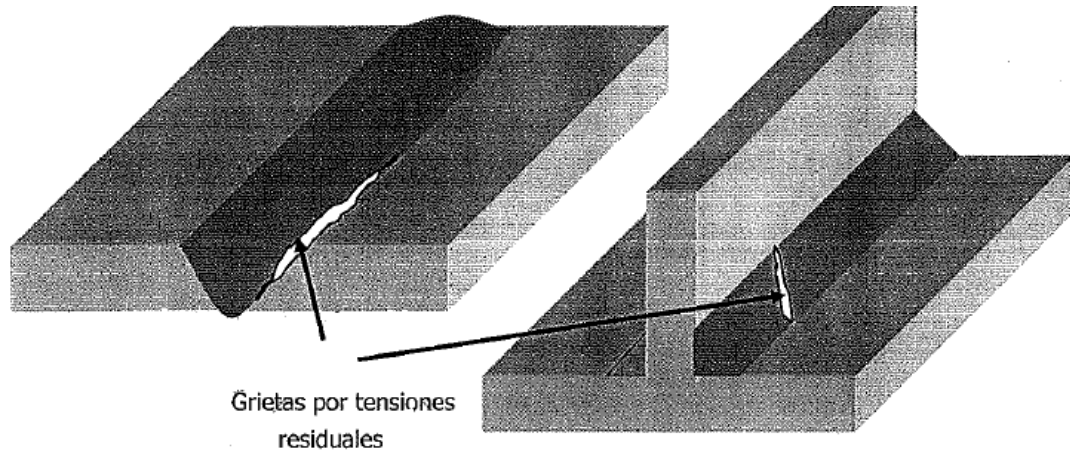


Ilustración 14: Aparición de grietas por tensiones residuales

Las tensiones residuales son inversamente proporcionales a la posibilidad o libertad de deformación que se otorgue a las partes a unir con una unión soldada.

SOLDEO CON:	DEFORMACION	TENSION RESIDUAL
Deformación limitada	Pequeña	Grande
Deformación sin limitación	Grande	Pequeña

Ilustración 15: Relación entre deformación y tensión residual

La deformación puede ser considerable mediante una baja rigidez de los elementos a unir. Sin embargo una deformación excesiva no es deseable porque las medidas y tolerancias no se pueden establecer dentro de los límites predeterminados.



# Alivio de tensiones residuales: Tratamiento térmico vs. Vibración

Trabajo Fin de Máster en Ingeniería de Materiales y Fabricación

Gorka García Rodero

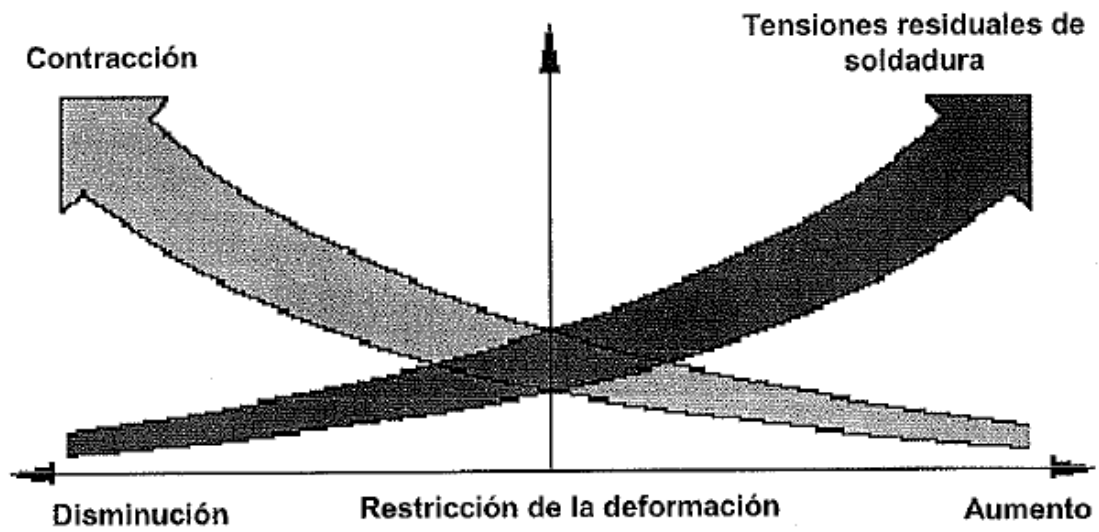


Ilustración 16: Relación entre la restricción de la deformación y las tensiones residuales de soldadura



# Alivio de tensiones residuales: Tratamiento térmico vs. Vibración

Trabajo Fin de Máster en Ingeniería de Materiales y Fabricación

Gorka García Rodero

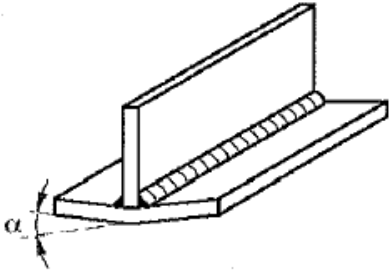
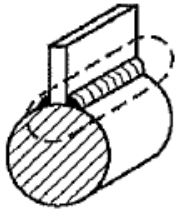
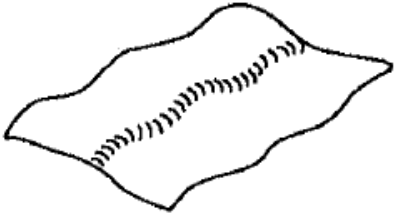
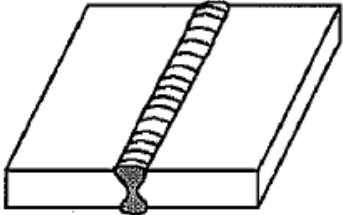
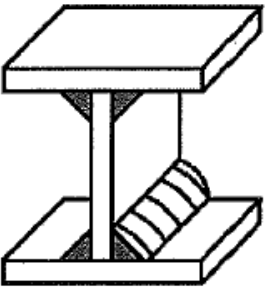
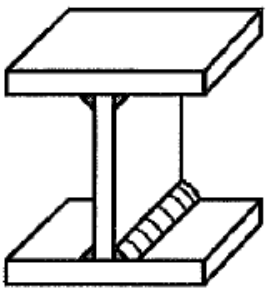
Exceso de contracción /deformación	Exceso de tensión residual
<p>Poca rigidez de la estructura o del material.</p> 	<p>Demasiada rigidez de la estructura o del material. Zona de peligro de la formación de grietas.</p> 
<p>Espesor delgado</p> 	<p>Espesor grueso</p> 
<p>Gran sección de los cordones de soldadura en relación con la sección total del elemento soldado</p>  <p>Garganta fuerte.</p>	<p>Menor sección de los cordones de soldadura en relación con la sección total del elemento soldado.</p>  <p>Garganta débil.</p>

Ilustración 17: Motivos conducentes a un exceso de deformación o de tensión residual

## 2.4. CICLOS TERMICOS Y ESTRUCTURA DE LAS UNIONES SOLDADAS

En el estudio de una unión soldada se pueden distinguir las siguientes zonas:

- Zona fundida: zona en la que se supera la temperatura de “liquidus” del material. Esta zona está constituida por el material fundido y solidificado, sirviendo de nexo de unión entre las dos piezas soldadas.

- Zona afectada térmicamente (ZAT): zona del material base adyacente al cordón de soldadura que sufre una serie de transformaciones como consecuencia del ciclo térmico al que se ve sometida.
- Zona sin afectar: zona del material base alejada del cordón, en la cual no se han producido cambios estructurales y de propiedades de consideración.

## Zona fundida

En esta zona las velocidades de enfriamiento son muy elevadas. Los principales fenómenos que se pueden producir en la zona fundida son:

- Variación de composición química: debida fundamentalmente a la pérdida de elementos por oxidación y al aporte voluntario de ciertos elementos para mejora de propiedades.
- Absorción de gases: fundamentalmente los gases atmosféricos y el hidrogeno ocasionando la precipitación de compuestos (óxidos y nitruros) que modifican las propiedades mecánicas del cordón de soldadura y la aparición de porosidad y sopladuras si las cantidades absorbidas son elevadas. La absorción de hidrogeno en la zona fundida está relacionada principalmente con la presencia de humedad en las inmediaciones del arco eléctrico. La influencia de este gas es variada siendo su influencia más directa la fragilización y agrietamiento de uniones soldadas.
- Precipitación de compuestos: este tipo de transformaciones perjudican seriamente la soldabilidad de una aleación. En los aceros pueden producirse fundamentalmente por la presencia de impurezas como el azufre y el fosforo.
- Modificaciones estructurales: se producen transformaciones que afectan a la estructura del grano y modificaciones físico-químicas. En el primer caso en función de la cantidad de material fundido se dará más o menos tiempo al crecimiento del grano de solidificación y se obtendrá una estructura más o menos basta. En el caso de modificaciones físico-químicas hay que considerar los posibles cambios de composición química, fenómenos de segregación y las velocidades de enfriamiento.

En lo que se refiere a las fases existentes en la zona fundida de la unión soldada de un acero al carbono, debemos recordar que el diagrama Fe-C meta estable está basado en enfriamientos de equilibrio. Estas velocidades son lentas y rara vez se producen al soldar.

Seguidamente describiré las estructuras que se obtienen para un acero con 0,2% de carbono en función de la velocidad de enfriamiento:

- Velocidad de enfriamiento lenta: la estructura resultante es una estructura de equilibrio de ferrita y perlita.
- Velocidades de enfriamiento medias: se forma estructura de Widmanstaetten.



- Velocidades de enfriamiento rápidas: la micro estructura que se obtiene es bainita superior (precipita cementita entre las agujas de ferrita).
- Velocidades de enfriamiento muy rápidas: en estos rangos de velocidades se puede formar bainita inferior o martensita.

Las estructuras de la zona fundida de una unión soldada pueden ser predichas conociendo el ciclo térmico y los diagramas temperatura-tiempo de transformación continua (diagramas TTT).

### Zona afectada térmicamente

Debido al flujo térmico por conducción, en el material base adyacente se produce un ciclo térmico que afecta a su estructura y propiedades. Cuanto más cerca este del cordón de soldadura, las temperaturas alcanzadas son mayores y las velocidades de enfriamiento obtenidas superiores.

Los ciclos térmicos de las uniones soldadas provocan en el material base modificaciones que determinan:

- Crecimiento de grano
- Fenómenos de re cristalización
- Modificaciones físico-químicas

#### Crecimiento de grano

Las características del calentamiento inducido durante el ciclo térmico por el soldeo provocan, en la mayoría de los casos, el crecimiento del tamaño de grano en la ZAT. La presencia de zonas de grano grueso tiene singular importancia debido principalmente a la distribución de la tenacidad resultante. El crecimiento del tamaño de grano en las ZAT de las soldaduras tiene lugar preferentemente cuanto mayor sean las temperaturas alcanzadas y los tiempos de permanencia a temperatura elevada.

#### Procesos de re cristalización

La re cristalización de un metal agrio tiene lugar cuando se calienta por encima de su temperatura de re cristalización y supone, en primer lugar, la reorganización de la estructura cristalina del metal y posteriormente, un fuerte crecimiento de grano que conducen al ablandamiento de la aleación.

#### Modificaciones físico-químicas

Estas modificaciones incluyen las posibles transformaciones alotrópicas y precipitaciones que puedan ocurrir como consecuencia de los ciclos térmicos sufridos por el material.



## Tratamientos térmicos de soldadura

Los tratamientos térmicos realizados antes o después de la realización de una soldadura tienen por objetivo conseguir una unión soldada sin defectos (tanto operacionales como metalúrgicos) y con unas propiedades mecánicas adecuadas a las condiciones de servicio. Esto lo consiguen bien modificando el ciclo térmico o bien modificando las propiedades y estructura final.

Los tratamientos térmicos de soldadura son:

- **Pre calentamiento:** consiste en calentar las piezas antes de realizar el proceso de soldadura. Este tratamiento modifica el ciclo térmico en el sentido de elevar las temperaturas alcanzadas (facilita la fusión del material, aumenta el tamaño de la zona afectada térmicamente y favorece el aumento de las deformaciones) y disminuir la velocidad de enfriamiento (disminuye el peligro de formación de estructuras frágiles, facilita la posterior difusión de hidrogeno y disminuye el valor de las tensiones residuales).
- **Pos calentamiento:** consiste en impedir que la pieza una vez soldada se enfríe por debajo de 250-300 °C, manteniendo esta temperatura durante un tiempo determinado (2 horas aproximadamente). El objeto de este tratamiento es permitir la difusión de hidrogeno.
- **Tratamiento térmico pos soldadura:** consiste en realizar un tratamiento posterior con el fin de mejorar la tenacidad y eliminar tensiones residuales que luego desarrollaremos más detenidamente. Este tratamiento permite igualmente la difusión de hidrogeno. **(2)**



### 3. METODOS PARA MEDIR TENSIONES RESIDUALES

Los métodos para la medición de las tensiones residuales pueden ser destructivos o no destructivos. La medición de las tensiones residuales tiene una gran importancia para la seguridad de las uniones soldadas, ya que se han dado casos de fallos sorprendentes de uniones soldadas sin que las construcciones o estructuras estuviesen sometidas a carga externa alguna. En otras ocasiones las construcciones o estructuras no soportaron las cargas para las que fueron diseñadas a pesar de haber sido correctamente calculadas.

Muchas técnicas se han desarrollado para el análisis experimental de tensiones residuales. Los fundamentos pueden agruparse en cuatro:

1. Técnicas de relajación de tensiones
2. Técnicas de difracción de rayos X
3. Técnicas basadas en el uso de propiedades del material sensibles al estado de tensión
4. Técnicas de propagación de grietas

A su vez uno de estos fundamentos agrupa un número variable de técnicas experimentales, un resumen de las cuales se presenta en la siguiente tabla. El fundamento tercero y cuarto de la lista anterior están aún en fase experimental, mientras los dos primeros gozan de gran fiabilidad y está extendido su uso industrial.



<i>Algunas Técnicas de Medida de Tensiones Residuales</i>		
<b>Técnicas de Relajación de Tensiones</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Uso de galgas extensométricas eléctricas o mecánicas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Técnicas aplicables a placas delgadas.</li> <li>• Técnicas aplicables a tubos.</li> <li>• Técnicas aplicables a sólidos 3D.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Perforando la placa.</li> <li>• Mecanizados sucesivos.</li> <li>• Método de seccionado.</li> </ul>
<b>Otras Técnicas Diferentes a Bandas Extensométricas</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mallado.</li> <li>• Capa frágil.</li> <li>• Técnica fotoelástica.</li> </ul>		
<b>Técnicas de Difracción de Rayos X</b>		
<b>Técnica Basada en Propiedades Sensibles a la Tensión</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ultrasonidos.</li> <li>• Dureza.</li> </ul>		
<b>Técnicas de Propagación de Grietas</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Por hidrógeno.</li> <li>• Por corrosión bajo tensión.</li> </ul>		

**Ilustración 18: Técnicas de medida de tensiones residuales**

En la técnica de relajación de tensiones, el fundamento consiste en medir las deformaciones elásticas que se recuperan al eliminar una parte de la pieza que estamos analizando. Dichas deformaciones están relacionadas con las tensiones residuales. Tal y como se observa en la tabla anterior hay un grupo de técnicas que se basan en medir esta situación de deformaciones mediante bandas extensométricas y hay otras que se basan en otro principio. La técnica de relajación de tensiones tiene el inconveniente de que se trata de un método destructivo en la mayoría de los casos.

Las técnicas de difracción de rayos X se basan en la medición de la distancia de los planos atómicos, cuyo valor en el estado no deformado es conocido. Los procedimientos basados en esta técnica tienen la ventaja de no ser destructivos, pero tienen el inconveniente de ser lentos en su realización, por el tiempo de exposición que se requiere. Los resultados pueden no ser muy precisos cuando la red atómica ha sido distorsionada por la aparición de grandes temperaturas.

Las técnicas que se agrupan bajo denominación de medir cambio en propiedades que se ven afectados por el estado de tensión no han superado aun el umbral de técnicas de laboratorio en proceso de investigación. Así se han intentado medir la variación del ángulo de polarización en ondas ultrasónicas polarizadas (inspirándose es la técnica foto elástica), también se ha





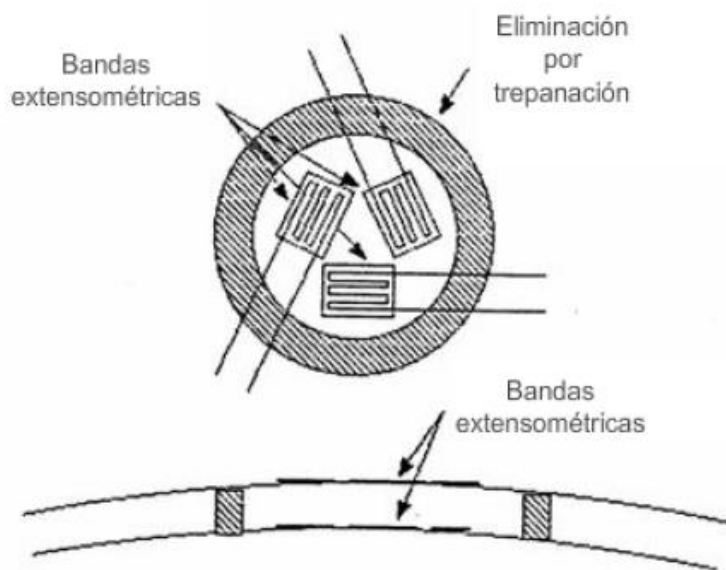
intentado medir la atenuación o absorción de ondas ultrasónicas bajo estados tensionales y finalmente se ha intentado medir los cambios sufridos por la dureza en dicho estado tensional.

Finalmente se ha intentado estudiar el proceso de propagación de grietas producidas por hidrogeno o por corrosión bajo tensión. Esta técnica es ventajosa bajo estados tensionales muy complicados pero hasta este momento solo se han obtenido resultados cualitativos.

A continuación se describen algunas de las técnicas indicadas en la tabla anterior:

### Perforación de placas

Este método se enmarca dentro de la técnica de relajación de tensiones y es aplicable a placas delgadas. Las deformaciones elásticas que se van a recuperar se miden mediante bandas extenso métricas. El método consiste en adherir en un punto de la superficie, cuyas tensiones residuales se quieren medir, las bandas extenso métricas en tres direcciones no coincidentes.



**Ilustración 19: Técnica de perforación de placas**

Al trepanar una zona que rodea el punto y que incluye la zona donde se encuentran las tres bandas, se recuperaran las deformaciones elásticas y las bandas miden la variación de desplazamiento en una dirección. Conocido esto en tres direcciones, se puede conocer el campo de deformaciones lineales que se ha producido al separar el elemento de la pieza y con esto calculamos las tensiones residuales.

El método tal y como se ha descrito es fiable y razonablemente simple. La precisión está muy condicionada por la evolución real del campo de tensiones, dado que el tamaño físico de las

tres bandas extenso métricas limita el diámetro de la zona a trepanar que debería ser lo menor posible dado que lo que se ha aplicado es una relación a nivel puntual. Si el estado tensional que se relaja no es uniforme los valores que aparecerán serán promedios de los existentes en la zona liberada. Así, en zonas próximas a una unión soldada donde las evoluciones son muy bruscas este método puede conducir a valores que no sean indicativos ni del nivel ni de la evolución de las tensiones.

### Procedimiento de taladro

Para los casos donde las evoluciones son muy bruscas se utiliza un procedimiento de taladrado que aunque tiene el mismo fundamento que el anterior se diferencia en que en lugar de aplicar una relación puntual, aplica la solución analítica de un problema, obteniendo el valor de la tensión particularizando la solución en deformaciones al punto donde se adhieren las bandas extenso métricas.

El método se puede aplicar a placas delgadas perforándolas o también puede ser aplicado superficialmente a sólidos tridimensionales.

El procedimiento de colocación de una solución conocida es más representativo del estado tensional que el anteriormente comentado de trepanación dado que el tamaño del agujero es mucho menor. Los errores en este procedimiento pueden estar asociados a las imprecisiones inherentes a las bandas extenso métricas.

### Taladrado de un agujero ciego

Aunque el procedimiento descrito hasta ahora implica la perforación de la placa, la mayor aplicación del procedimiento es para la evaluación de tensiones residuales en la superficie de sólidos tridimensionales realizando agujeros ciegos de pequeña profundidad en la misma. El procedimiento para los agujeros pasantes es aplicable para los agujeros ciegos.

El taladrado de un agujero ciego puede ser calificado como un método prácticamente no destructivo ya que en muchos casos el diámetro del agujero y su profundidad no merman la capacidad resistente de la estructura en la que se practica y en cualquier caso puede ser reparado sin excesiva dificultad una vez que se ha realizado la medida.

### Mecanizados sucesivos

Este método se conoce como técnica de Heyn Bauer y consiste en eliminar capas del material mediante un proceso de mecanización, midiendo la longitud final de la probeta después de cada eliminación. Se trata de un método simple pero aplicable exclusivamente a sólidos de revolución.



### Perforación central

Se aplica para el mismo tipo de elementos que el anterior. El mecanizado consiste en perforar longitudinalmente un orificio central (o en ampliar el ya existente), midiendo en la cara exterior, mediante bandas extenso métricas situadas en dirección circunferencial y tangencial.

Este proceso, al igual que el anterior, es totalmente destructivo y presenta el inconveniente de generar tensiones residuales durante la perforación.

### Método de seccionado en sólidos tridimensionales

Este método es aplicable a placas gruesas en las que no puede aplicarse la técnica de la perforación indicada anteriormente. El método consiste en eliminar de la pieza completa, bloques estrechos y alargados (de longitud aproximadamente doble que el espesor de la placa) en la dirección de la soldadura y normal a ella.

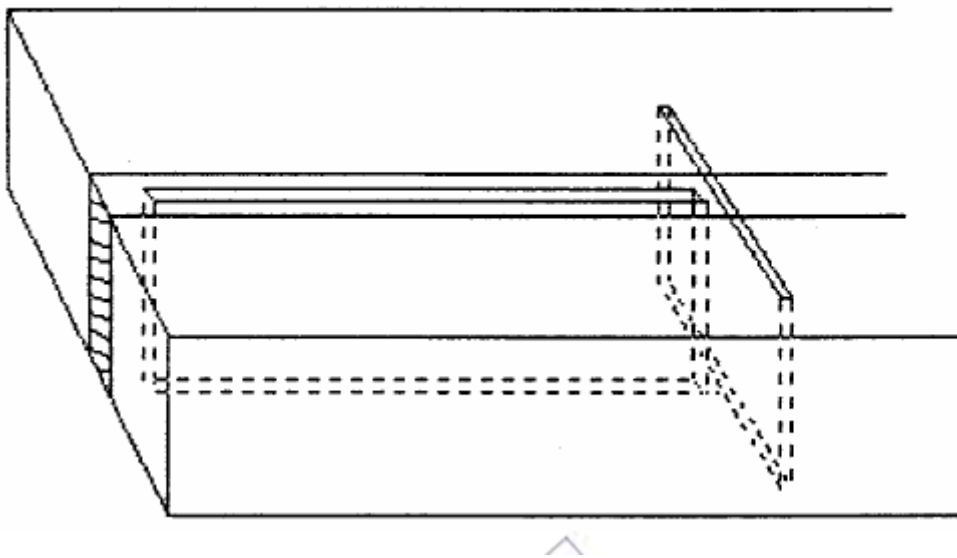


Ilustración 20: Método de seccionado en sólidos tridimensionales

Al eliminar por ejemplo el bloque tridimensional es razonable suponer que se habrán liberado las tensiones normales al eje longitudinal, por lo que si medimos en la cara superior e inferior y hacemos una extrapolación a lo largo del espesor, conocemos la evolución aproximada de dicha tensión. Si aplicamos ahora la técnica de perforación a la placa delgada que hemos seccionado podemos obtener una información tridimensional del estado de tensiones residuales.

Se trata también de un método destructivo, pudiendo obtenerse resultados precisos si se dispone del equipo adecuado para realizar el procedimiento que es evidentemente de laboratorio.



### Sistema de mallado

Consiste en implementar sobre la superficie del sólido a ensayar un sistema de coordenadas bidireccional. A partir de esta malla se secciona el dominio en elementos rectangulares teniendo cada uno de estos elementos cuatro puntos de medida en los que esta se realiza antes y después de corte. La diferencia entre ambas medidas permite interpolar el estado de tensiones. Al igual que los anteriores supone la destrucción de la pieza.

### Método de la capa frágil

Consiste en extender una capa de laca sobre la zona superficial en la que se quiere establecer el estado de tensiones residuales. Una vez extendida la capa, se perfora y el tipo de grietas que aparece permite establecer la sollicitación existente.

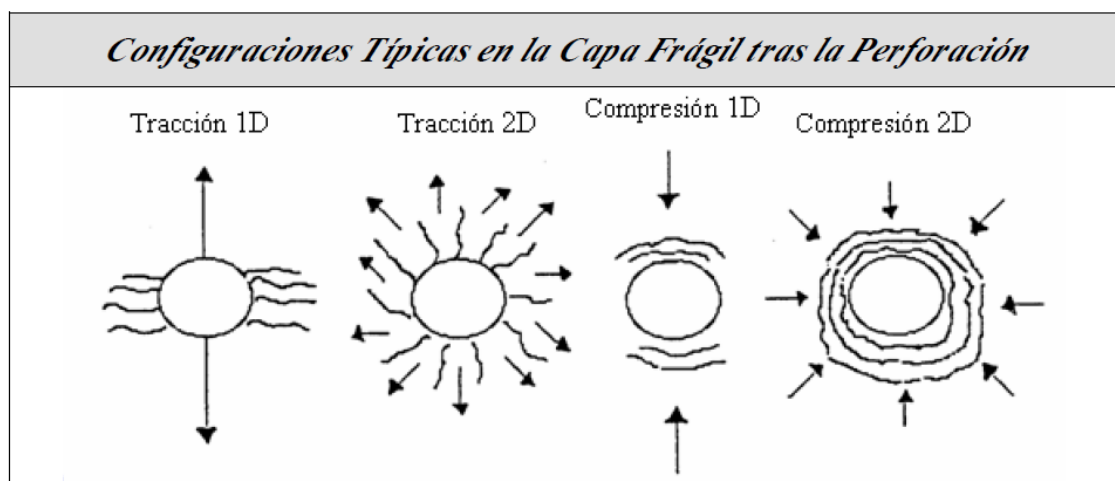


Ilustración 21: Método de capa frágil, configuraciones típicas

Este método no es destructivo, pero solo da información cualitativa del estado tensiones existentes.

### Técnicas de difracción de rayos X

Las deformaciones elásticas en metales que tienen estructura cristalina pueden determinarse midiendo el parámetro de la red, cuyo valor es conocido en el estado sin deformación.

Cuando algún tipo de sollicitación actúa sobre una estructura de cristales metálicos, la red cristalina se distorsiona, produciéndose un cambio en las distancias interatómicas. Cuando la deformación excede el límite elástico, se producen deformaciones plásticas como resultado del deslizamiento en tres planos de la red. El cambio en el espacio interatómico es siempre proporcional a la tensión.



Si suponemos que una onda plana monocromática se introduce en planos atómicos en una dirección, se producirá una onda reflejada en otra dirección.

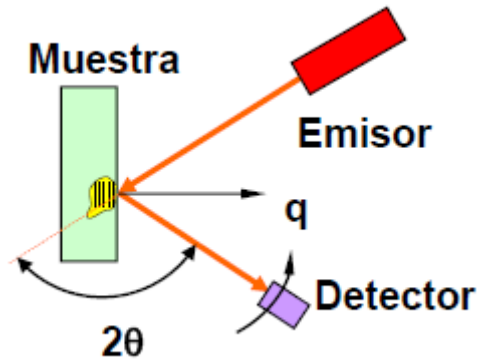


Ilustración 22: Método de difracción de rayos X

Las variables implicadas en la reflexión están relacionadas por la ley de Bragg.

$$2d_{hkl} \operatorname{sen}\theta = n\lambda$$

Con este método se miden deformaciones elásticas y no es precisa una preparación previa de la muestra. La técnica de rayos X permite medir tensiones residuales solo en la superficie del material y está especialmente indicada para variaciones muy rápidas de las mismas, dado que el área de medida es prácticamente puntual.

### Técnica de ultrasonidos

La técnica de ultrasonidos resulta en general muy atractiva, como método experimental dado su carácter no destructivo y la ausencia de medidas de precaución (a diferencia de los rayos X) durante la realización de la medida.

En el área de la medida de tensiones residuales han sido varios los fundamentos que se han intentado para su evaluación. El que parece más viable es el de la dependencia de la velocidad de propagación de una onda del estado tensional. En situaciones reales complicadas como las que se dan en uniones soldadas es preciso tomar varias medidas para generar el sistema de ecuaciones que permita determinar las tensiones principales, lo que no siempre resulta inmediato o no siquiera posible.

La mayor limitación, no obstante, de los ultrasonidos radica en el valor promedio que permite medir. Dado que la evaluación está asociada al tiempo que una onda emitida por un palpador (emisor) tarda en llegar a otro palpador (receptor), atravesando el material tensionado, el valor medido es un valor promedio de todos los existentes en el camino recorrido por la onda. El tamaño de los palpadores es por tanto una limitación de la zona de medida. Por consiguiente una medida solo es representativa cuando la tensión es constante en la distancia



que recorre la onda. No obstante, pueden obtenerse perfiles de estados tensionales desplazando el conjunto de los dos palpadores.

De cualquier forma uno de los problemas que queda por resolver es la dependencia de la velocidad del sonido de la textura del material, que es mayor que del estado tensional. En principio esto puede resolverse con elementos de calibración, aunque esta solución es impracticable, en la mayoría de los casos en situaciones reales.

Los ultrasonidos tienen algunas ventajas que hasta el momento no presentan las demás técnicas. Además del carácter no destructivo y la aplicación sencilla en obra, sin instalaciones especiales, se pueden tomar medidas en el interior. Naturalmente estas medidas tienen de nuevo carácter de promedio, pero medidas con ondas de menor penetración pueden ayudar a construir un perfil de tensiones hacia el interior del dominio.

En comparación a la técnica de rayos X, la más extendida dentro de las no destructivas, puede decirse que son técnicas absolutamente complementarias. Los rayos X dan información muy puntual y estrictamente de la superficie. Los ultrasonidos dan valores promedios y puede permitir sacar medidas internas. En cualquier caso ambas son técnicas costosas por el equipo que requieren y por el desarrollo de la medición, especialmente los rayos X. **(3)**



## 4. METODOS PARA REDUCIR LAS TENSIONES RESIDUALES O DEFORMACION EN UNIONES SOLDADAS

- Secuencia de soldeo  
En uniones transversales con refuerzos o puentes, primero se deberá soldar la unión a tope (1) para permitir una libre contracción transversal, luego se deberá soldar las uniones en ángulo (2) tal y como se muestra seguidamente.

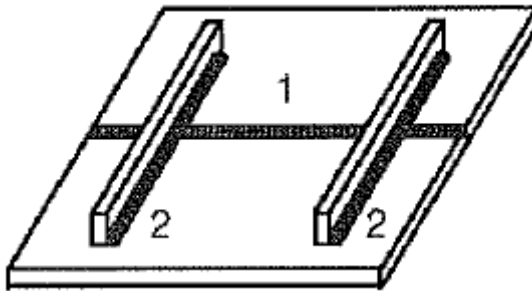


Ilustración 23: Secuencia de soldeo para reducir las tensiones residuales en uniones soldadas

Si se soldaran primero las uniones en ángulo, las tensiones residuales en la unión a tope podrían ser tan grandes que podrían originar una grieta, debido a la restricción de la contracción transversal.

En uniones de suelos y paredes con chapas, primero deberá soldarse las uniones transversales en el orden de 1 a 5 para permitir una libre contracción transversal de estas, luego se deberá soldar las uniones longitudinales en el orden 6 a 9 del centro hacia fuera. Esta secuencia se muestra a continuación.

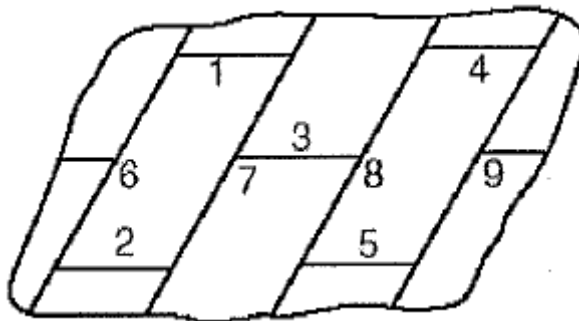


Ilustración 24: Secuencia de soldeo para reducir las tensiones residuales en uniones soldadas

En los empalmes a tope de vigas soldadas, se deberá soldar primero las alas (1) porque son las chapas que soportan los mayores esfuerzos de tracción y compresión. Es



preferible soldar primero la que será expuesta a esfuerzo de tracción, luego con la contracción libre quedaran pocas tensiones residuales en estas uniones. Después se debe continuar con el soldeo del alma (2) y finalmente se rematan las uniones en ángulo (3).

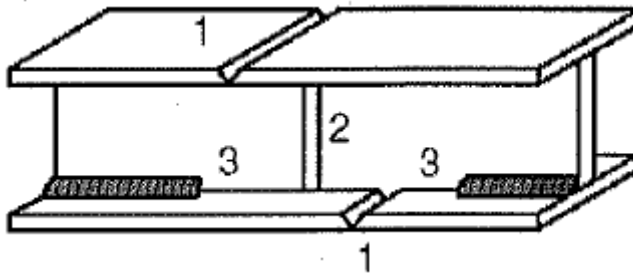


Ilustración 25: Secuencia de soldeo para reducir las tensiones residuales en uniones soldadas

Otras recomendaciones para controlar las tensiones residuales de soldeo son:

- Permitir en lo posible la libre contracción de las partes a soldar
  - Las partes de chapa gruesa se deben precalentar
  - Emplear en lo posible materiales de aportación de alto porcentaje de deformación
- 
- Alivio de tensiones
    - Tratamiento post soldadura
- Después de soldar frecuentemente se tiene que aliviar las tensiones residuales de piezas que serán sometidas a procesos de mecanizado.
- Con el incremento de la temperatura se disminuye la resistencia y el límite de fluencia, el material cede ante las fuerzas internas y las tensiones remanentes son insignificantes en comparación con la tensión de trabajo.





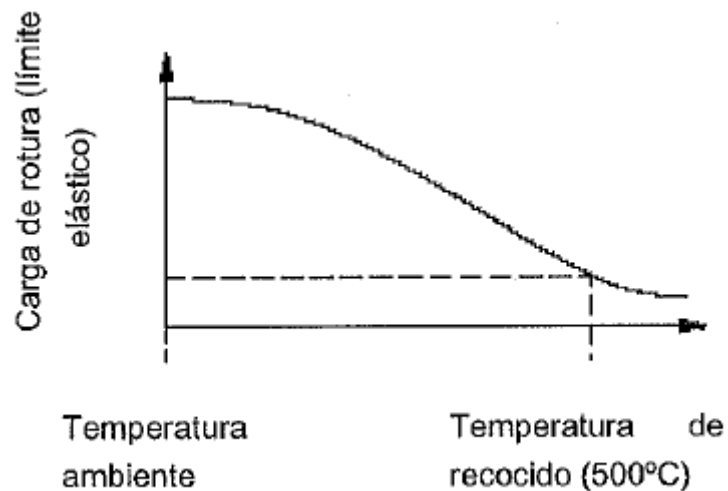


Ilustración 26: Tratamiento térmico post soldadura para alivio de tensiones

- Corrección de la deformación después de soldar

### *Enderezado en frío*

Mediante la deformación en frío, ya sea en prensas o con golpes puede obligarse a la estructura a recuperar las dimensiones deseadas. Es preciso tener en cuenta que algunas zonas del material serán aplastadas. Con el enderezado en frío también se originan tensiones en el material.

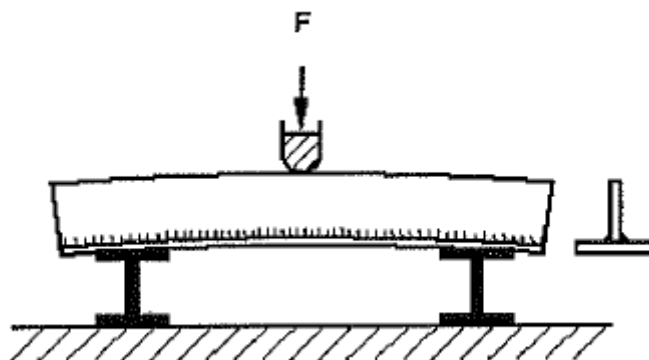


Ilustración 27: Corrección de la deformación mediante enderezado en frío

### *Enderezado por llama*

El material es recalado puntualmente en las zonas del calentamiento, porque las zonas frías impiden la dilatación. Con el enfriamiento las zonas recaladas se contraen originando fuerzas de tracción que enderezan el material o estructura.



Las formas del calentamiento dependen del tipo de trabajo y pueden ser en forma de puntos, líneas, cuñas o elipses.

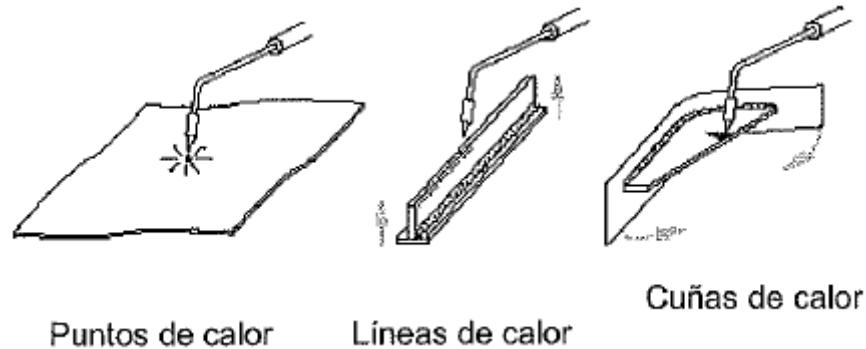


Ilustración 28: Corrección de la deformación mediante enderezado por llama

En las siguientes figuras, las flechas indican el sentido de enderezado que se pretende lograr con este método.

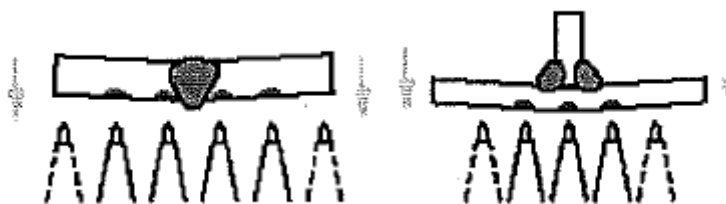


Ilustración 29: Sentido del enderezado mediante el método por llama

La ventaja del enderezado por llama es que el material queda libre de tensiones residuales, pero es necesario seguir un orden lógico para el calentamiento, además de contar con el equipo oxigas adecuado. Es preferible usar sopletes de acetileno en lugar de propano para tener una mayor velocidad de calentamiento.

La técnica de enderezado por llama debe ser realizada por un especialista y con la supervisión de un coordinador de soldeo, porque un calentamiento excesivo, o un enfriamiento brusco, o bien alguna combinación de efectos perjudiciales pueden dañar al material.

De entre todos los métodos descritos anteriormente para reducir las tensiones residuales, nosotros nos vamos a focalizar en el alivio de tensiones, en el cual profundizaremos seguidamente.



## 5. ALIVIO DE TENSIONES RESIDUALES

### 5.1. PROPOSITO DEL ALIVIO DE TENSIONES RESIDUALES

Una vez que hemos conocido que son las tensiones residuales, como se originan, tipologías existentes, etc. seguidamente expondremos brevemente cual es el objetivo del alivio de tensiones, es decir, por qué nos interesa atenuar o eliminar las tensiones residuales en un material o estructura.

Si atendemos a los principales efectos que tienen las tensiones residuales, seremos capaces de entender que hay de beneficioso en aliviar las tensiones residuales de un material o estructura.

Entre otros los efectos de las tensiones residuales en piezas soldadas fundamentalmente y en consecuencia lo que pretendemos evitar por medio del alivio de las mismas son los siguientes:

- Las tensiones residuales se suman a la carga para la que una soldadura o una estructura ha sido diseñada para soportar, lo cual puede conducir al colapso del material.
- Las tensiones residuales reducen la resistencia a la corrosión bajo tensión. Las regiones sometidas a tensiones residuales pueden sufrir corrosión localizada en ambientes agresivos.
- Riesgo de grietas. Todos los mecanismos de agrietamiento son afectados por las tensiones residuales.
- Inestabilidad dimensional. En estructuras mecano soldadas, tras el proceso de soldadura en el que se inducen tensiones residuales, tienen lugar procesos de arranque de viruta con el fin de obtener unas tolerancias más estrechas. En estos procesos de mecanizado en los que se elimina material mediante arranque de viruta, la estructura en su afán por equilibrar sus tensiones internas sufre deformaciones que conducen a una inestabilidad dimensional.

### 5.2. METODOS EXISTENTES DE ALIVIO DE TENSIONES RESIDUALES

Los métodos de alivio de tensiones existentes se agrupan en dos grandes campos:

- Mecánicos: Como shot peening, hammer peening, needle peening, ultrasonic peening.
- No mecánicos: térmicos y por vibraciones.



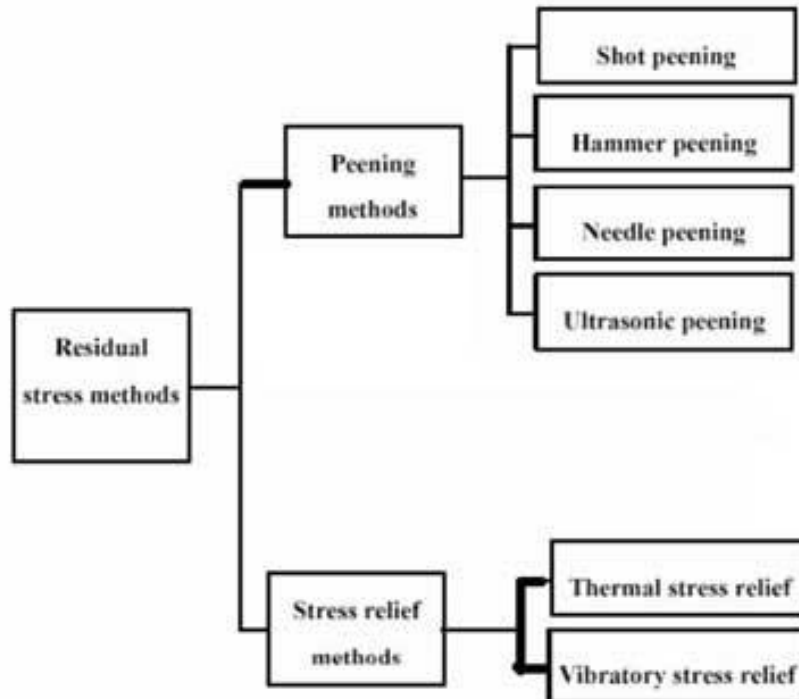


Ilustración 30: Métodos de alivio de tensiones residuales

(4)

Hay otro método para el alivio de tensiones residuales, consistente en el método electromagnético, si bien su aplicación es mucho menos común que el resto.

Los que peinan canas no me perdonarían si no hiciera referencia al método de alivio de tensiones más eficaz que existe para muchos como es el alivio de tensiones “natural”. Este método no consiste más que en dejar el material o estructura al aire libre, a la intemperie durante un periodo de tiempo prolongado dejando que el material se distienda de forma natural y bajo los efectos de continuas dilataciones y contracciones provocadas por las diferencias de temperatura que sufre el material.

Los métodos mecánicos de alivio de tensiones residuales se basan fundamentalmente en aplicar cargas de compresión sobre los cordones de soldadura. En una unión soldada podemos tener tanto tensiones residuales de tracción como de compresión. Las que nos preocupan son las tensiones residuales de tracción que tienden a quebrar las uniones soldadas. Es por esto que existen métodos mecánicos de alivio de tensiones que lo único que hacen es aplicar cargas de compresión sobre los cordones de soldadura para lo cual existen diferentes estrategias

como los siguientes: granallado, martilleado, compresión mediante la utilización de agujas, ultrasonidos.

El método mecánico de alivio de tensiones residuales es un proceso de trabajo en frío utilizado para crear una capa de tensión residual de compresión y modificar las propiedades mecánicas de los metales. La superficie se extiende plásticamente provocando cambios en las propiedades mecánicas de la misma. La deformación plástica induce una tensión de compresión en la superficie del material, junto con la tensión de tracción en el interior. Tensiones de compresión en la superficie del material confieren resistencia frente a la fatiga del metal y aumenta su resistencia frente a la corrosión bajo tensión. Las tensiones a tracción en el interior del material no son tan problemáticas como en la superficie ya que es menos probable que las grietas tengan su inicio en el interior. La tensión residual de compresión en un metal es producida por la transferencia de la energía cinética de una masa en movimiento sobre la superficie de un material con la capacidad de deformarse plásticamente.

Por lo tanto, los métodos mecánicos que introducen tensiones residuales pueden perseguir eliminar las tensiones residuales de tracción o introducir tensiones residuales de compresión. Además a través de la aplicación de estos métodos podemos incrementar de forma sustancial la vida a fatiga retrasando la iniciación de las fisuras.

Los métodos que más se han utilizado en aplicaciones industriales son:

## Martilleado

El martilleado se suele utilizar utilizando un martillo de bola (normalmente neumático) de diámetro 6-14 mm. Los resultados óptimos del martilleado se obtienen tras cuatro pasadas. Los efectos del martilleado pueden desaparecer bajo cargas de amplitud variable con picos de tensión de compresión elevadas. Por otro lado, un martilleado excesivo puede provocar fisuras.



# Alivio de tensiones residuales: Tratamiento térmico vs. Vibración

Trabajo Fin de Máster en Ingeniería de Materiales y Fabricación

Gorka García Rodero



Ilustración 31: Equipo de martilleado o needle peening



Ilustración 32: Efecto del needle peening sobre el cordón de soldadura



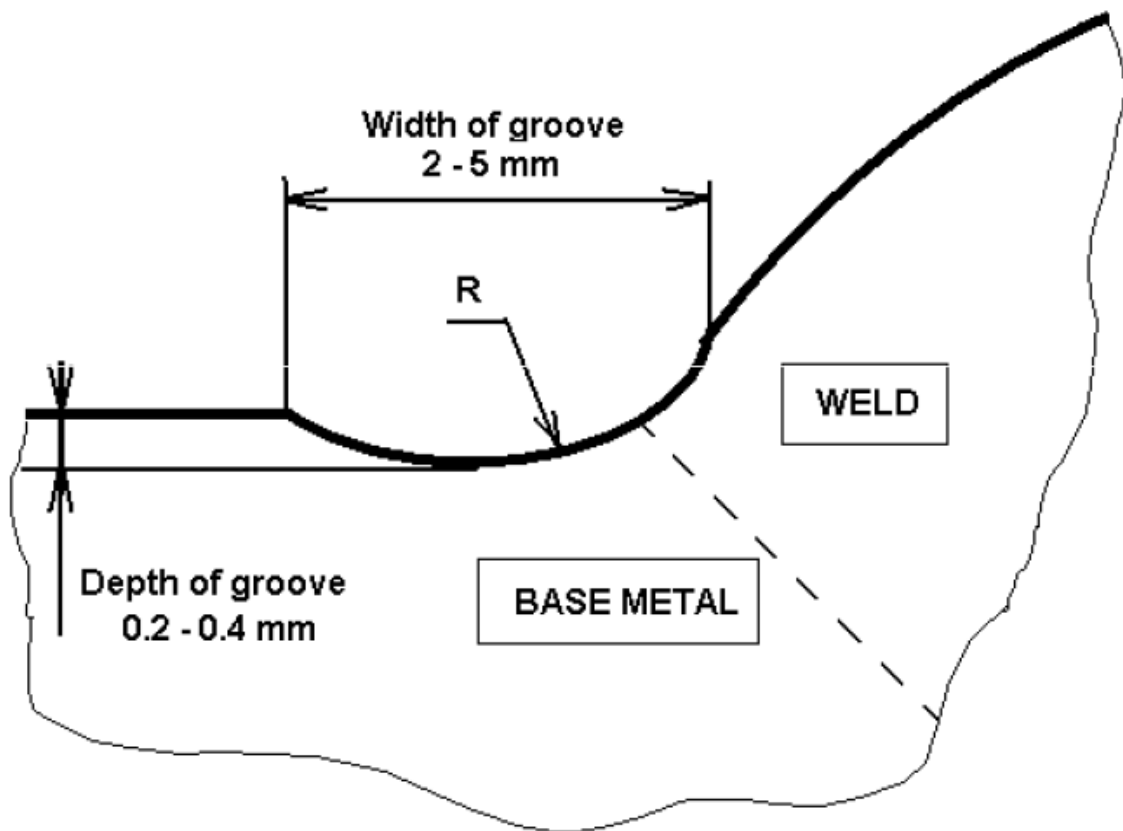


Ilustración 33: Efecto del needle peening sobre el cordón de soldadura

### Granallado

El granallado consiste en chorrear la superficie de la soldadura con pequeños proyectiles de acero a gran velocidad, lo que induce tensiones residuales de compresión en la superficie del orden de 70-80 % de la tensión de fluencia. La principal ventaja del granallado es que cubre grandes áreas a un coste reducido. No obstante, la aplicación práctica a grandes estructuras no está demostrada.



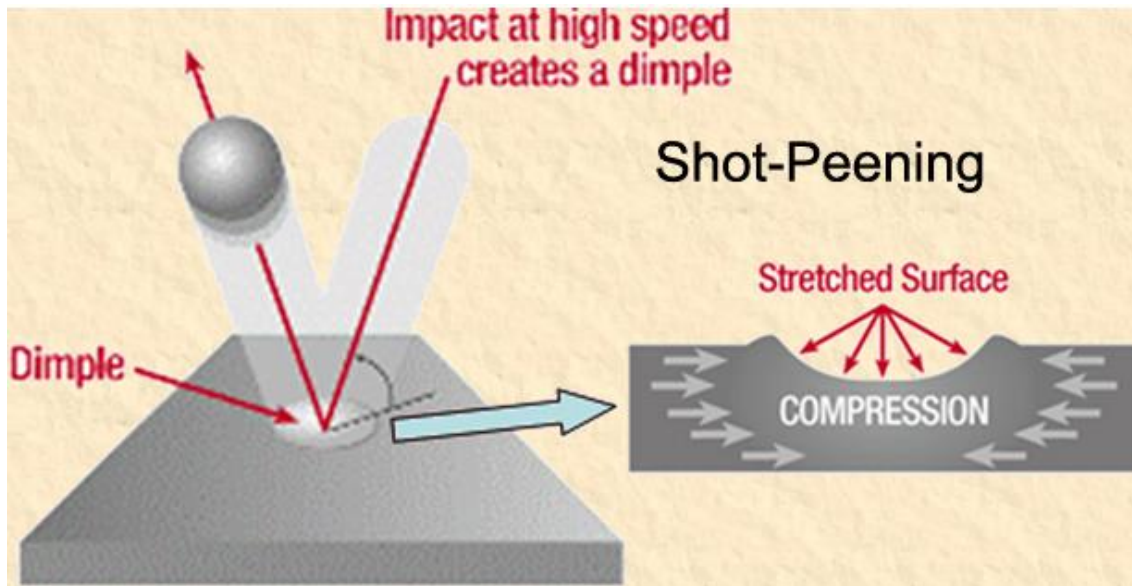


Ilustración 34: Efecto del granallado o shot peening

(5)

### Tratamiento térmico de alivio de tensiones

El diagrama de equilibrio de un acero nos sirve para determinar la micro estructura de un acero con un contenido en carbono dado, a una temperatura determinada. Si dicho acero fuera sometido a un enfriamiento muy lento, casi reversible, el diagrama también nos determinaría la estructura final a temperatura ambiente.

Si los aceros se enfriasen siempre así, la estructura final dependería únicamente de su porcentaje en carbono y las características físicas de un acero serían función solo de su composición química.

En la práctica podemos modificar la estructura de los aceros sometiéndolos a ciclos térmicos irreversibles, que reciben el nombre de tratamientos térmicos. Tienen por objeto mejorar las propiedades y características de los aceros, y consiste en calentar y mantener las piezas de acero a temperaturas adecuadas, durante un cierto tiempo y enfriarlas luego a una velocidad que podrá variar en función de los resultados que se deseen obtener. De esta forma, se pueden conseguir a temperatura ambiente, para un mismo acero estructuras muy diferentes y por tanto obtenerse propiedades también muy distintas. En general los tratamientos térmicos se inician con un calentamiento del acero hasta la temperatura de austenización del mismo. El tiempo y la temperatura son siempre factores principales de un tratamiento térmico.

Todos los tratamientos térmicos de los aceros comienzan con un calentamiento. La función del calentamiento es obtener una estructura parcial o totalmente austenítica, excepto en el revenido y en algunos recocidos. El calentamiento se realiza introduciendo la pieza en un



horno, buscamos conseguir en toda la pieza de acero, una temperatura uniforme para poder obtener una estructura homogénea.

Los hornos para tratamientos térmicos se pueden clasificar atendiendo a distintos criterios, según el modo de funcionamiento, según el tipo de energía empleado y según las características de la atmosfera.

Cuando se aplica el primer criterio, los hornos se pueden clasificar en hornos de funcionamiento intermitente y hornos continuos.

- Hornos intermitentes: suelen tener un límite de temperatura de 1300 °C y admiten una gran variedad de ciclos térmicos. Estos hornos están especialmente indicados para trabajar con productividades reducidas puesto que requieren de un trabajo importante de manipulación de piezas.
- Hornos continuos: tienen básicamente los mismos elementos que un horno de funcionamiento intermitente, junto con un sistema que permite el desplazamiento continuo de las piezas. Estos hornos están especialmente indicados para trabajar con grandes volúmenes de piezas en condiciones idénticas, pudiéndose garantizar la obtención de resultados uniformes.

Cuando se aplica el segundo criterio, los hornos se pueden clasificar en dos grupos, hornos de llama y hornos eléctricos.

- Hornos de llama: estos hornos tiene la ventaja fundamental del bajo coste de energía y el inconveniente de que su control y ajuste es más complejo que en los hornos eléctricos. La instalación exige equipos de ventilación adecuados. En ocasiones estos hornos pueden no ser adecuados por las posibles interacciones entre los gases de combustión y las piezas a tratar. En los hornos de llama incluimos los hornos de gas, tanto natural como propano y fuel.
- Hornos eléctricos: los hornos eléctricos más empleados son los de resistencias. El calor se transfiere fundamentalmente a través de una resistencia por la que circula la corriente eléctrica. Estos hornos son menos contaminantes que los de llama, su funcionamiento es más silencioso y el control del proceso es más preciso. En los hornos eléctricos incluimos los equipos de inducción y los hornos de sales con electrodos sumergidos.

Cuando se aplica el tercer criterio, los hornos se pueden clasificar en hornos sin control de la atmosfera, hornos de atmosfera controlada y hornos de vacío.

### *Recocido de estabilización*

Con este tratamiento se busca atenuar las tensiones residuales de los aceros pero sin modificar su micro estructura. Se realiza un calentamiento a una temperatura del orden de 500 a 650 °C, seguido de un enfriamiento al aire. A esta temperatura el material sufre una



plastificación suficiente para facilitar su fluencia bajo la acción de las tensiones, con lo que estas se reducen. La atenuación de tensiones es mayor cuanto más elevada es la temperatura de tratamiento. Las tensiones desaparecerían por completo a la temperatura de re cristalización.

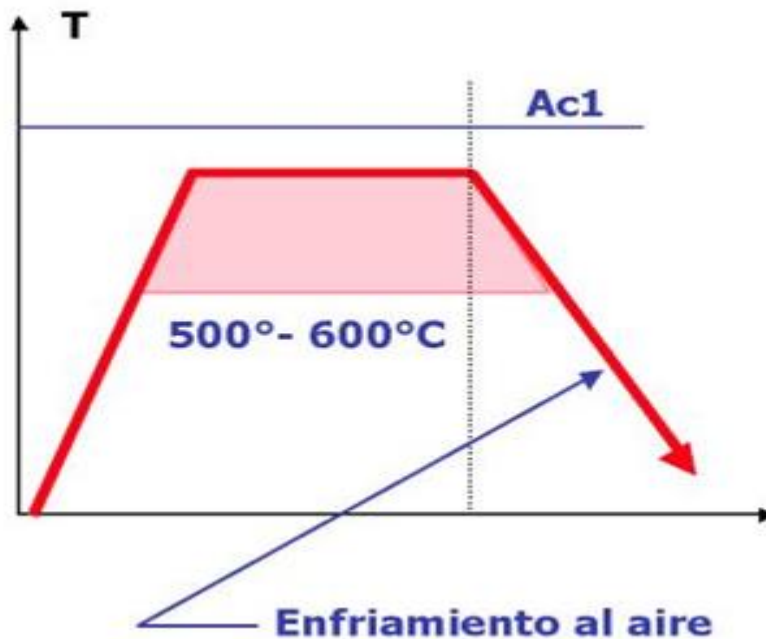


Ilustración 35: Rampas típicas de un recocido de estabilización

### Tratamientos térmicos de las uniones soldadas

La soldadura de puede considerar un tratamiento térmico, que como tal, afecta a la micro estructura de la región soldada, introduciendo en la misma, tensiones residuales debido a fenómenos de dilatación y contracción. Los objetivos de un tratamiento térmico pos soldadura (PWHT) son principalmente dos:

- Eliminar o disminuir las tensiones introducidas por el proceso de soldeo.
- Actuar como revenido de las micro estructuras que pueden presentarse.

Ocasionalmente se pueden dar tratamientos para favorecer la difusión de hidrogeno como es el caso de pos calentamiento que se debe confundir con el tratamiento térmico pos soldadura. El tratamiento suele consistir en un calentamiento de la unión a una temperatura elevada, pero por debajo de la temperatura de transformación, manteniendo dicha temperatura hasta que se consigue eliminar las tensiones residuales. Los PWHT se evitaban en los casos en los que no sean necesarios, y tendrán distintos efectos en los distintos materiales.

Seguidamente indico un ejemplo real en el que una entidad certifica la no necesidad de aliviar las tensiones de una estructura soldada.

### (6)

Se trata de una estructura de acero en forma de celosía que forma parte de un utillaje utilizado para el remachado del VTP del A380 en la planta alemana de Stade. Las características, uso y dimensiones de la estructura hicieron que el equipo de proyecto optase por hacer un aliviado de tensiones residuales por medio de vibración en vez de recurrir al tratamiento térmico de alivio de tensiones.

Sin embargo, entre los requisitos técnicos a cumplir en la normativa del cliente figuraba la obligatoriedad de tratar térmicamente la estructura. Este hecho hizo que el cliente solicitase que se volviera a fabricar la estructura de acuerdo a esta restricción. Debido a que la estructura ya estaba fabricada y prácticamente terminada, se solicitó una tercera opinión que pudiera desatascar la situación.

De este modo se contrataron los servicios de TÜV para que emitiese un veredicto al respecto, el cual se adjunta íntegramente a continuación.

La conclusión dicta que debido a la ausencia de estados de tensión multi axiales, la ausencia de nodos de soldadura sobre tensionados, que las precisiones solicitadas son alcanzables en términos de los procesos de fabricación considerados, los espesores están por debajo de 25 mm y que la tensión es estática y no dinámica entre otras consideraciones, esta estructura en particular no precisa un aliviado de tensiones residuales, bien térmico bien por vibración.

Ante esta conclusión el cliente aceptó finalmente la aceptación de la estructura que estaba ya fabricada y que había sido aliviada mediante un tratamiento de vibración.

Esta documentación se expone en el Anexo 1, al final del presente documento.



## *Métodos térmicos de alivio de tensiones*

Los métodos térmicos de alivio de tensiones pueden dividirse en tratamientos completos en horno y tratamientos parciales.

- Tratamientos en horno: en los hornos es necesario mantener el control de la distribución de temperaturas y del flujo de calor, para lo que será necesario controlar los siguientes parámetros, velocidad de calentamiento, temperatura del tratamiento, tiempo de enfriamiento y velocidad de enfriamiento. Uno de los problemas de los hornos es el fenómeno de la convección que hace que la parte superior del horno este a mayor temperatura que la inferior. Esto se evita con hornos de circulación forzada o mediante unidades eléctricas independientes de calentamiento que distribuyen el flujo de calor hacia la parte inferior del horno.
- Tratamientos locales: cuando la pieza que requiere un tratamiento térmico es demasiado grande, o por razones técnicas o económicas no sea posible su tratamiento en horno, se recurre a un tratamiento térmico local, siendo los métodos de calentamiento más usuales los que se citan a continuación.
  - Calentamiento por resistencia eléctrica: se realiza empleando elementos cerámicos, que recubren el alambre conductor que, a su vez recubrirá la pieza sobre la que queremos realizar el tratamiento, calentándola por resistencia.
  - Calentamiento mediante energía radiante: la radiación es el mecanismo principal de transmisión de la energía desde la fuente a la pieza. Las ventajas de este sistema son el bajo coste del combustible y la facilidad de aplicación y control. Como desventaja, se debe fabricar la unidad de calentamiento para adecuarse a la forma de la pieza.
  - Calentamiento con llama: es un método económico empleado en el trabajo en campo. Requiere el control de parámetros como, consumo de combustible, ajuste de la llama, distancia entre la llama y la pieza y el manejo de la llama.
  - Calentamiento por inducción con corriente alterna: se aplica mediante bobinas enrolladas alrededor de la pieza a calentar. El campo magnético generado en las bobinas, induce una corriente eléctrica en la pieza, que se calienta por la resistencia que ofrece a la circulación de la corriente.

El alivio de tensiones mediante tratamiento térmico se realiza calentando la pieza o unión soldada a una temperatura y durante un periodo de tiempo determinado. Se recomienda un calentamiento gradual uniforme de toda la pieza, un tiempo de permanencia a una temperatura determinada, que en el caso de los aceros es alrededor de 600 °C durante una hora por cada pulgada de espesor, seguido de un enfriamiento igualmente gradual y uniforme. Cuando el material es sometido a un calentamiento, se produce en él una disminución de su límite elástico. Como las tensiones residuales de los cordones de soldadura, especialmente los longitudinales, pueden alcanzar valores muy cercanos al límite elástico, el nivel de las



# Alivio de tensiones residuales: Tratamiento térmico vs. Vibración

Trabajo Fin de Máster en Ingeniería de Materiales y Fabricación

Gorka García Rodero

tensiones residuales se reducirá al redistribuirse para mantener el equilibrio de fuerzas. También es posible que se produzcan mecanismos de termo fluencia que relajan las tensiones durante el tratamiento térmico. Finalmente, también se observa una disminución de la dureza. Para alcanzar un efecto importante se requieren permanencias prolongadas que no siempre son posibles en la práctica.

El tratamiento térmico de alivio de tensiones residuales se hace en la práctica introduciendo la pieza entera o partes de la misma en un horno fijo. En caso de no disponer de horno, también se puede recurrir a la utilización de un quemador temporal dentro de estancia preparada para ello o también se pueden tratar térmicamente los cordones de soldadura de manera individualizada mediante la utilización de resistencias eléctricas.

A modo de reseña, cabe mencionar que los métodos de calentamiento mediante kits exotérmicos y que fueron muy populares en las décadas de los 60 y 70, finalmente cayeron en desuso al no producir los resultados esperados.



Ilustración 36: Hornos para tratamiento térmico





Ilustración 37: Piezas tras el tratamiento térmico

(7)

Se recomienda efectuar un tratamiento térmico de alivio de tensiones en los siguientes casos:

1. Cuando el acero tiene un contenido en carbono superior al 0,35%.
2. Cuando se sueldan aceros al manganeso en los que se registran una elevada presencia de tensiones residuales y existe riesgo de fisuración en frío.
3. Cuando la unión soldada va a estar sometida a ambientes corrosivos que provoquen corrosión bajo tensión.
4. Uniones soldadas de fundiciones.
5. En aceros inoxidables austeníticos debido a su elevado coeficiente de dilatación. De 850 °C (1 hora por pulgada de espesor) a 650 °C (4 horas por pulgada de espesor).
6. En aceros inoxidables martensíticos con un contenido en carbono superior al 0,1% es recomendable hacer un tratamiento de alivio de tensiones en el rango de temperatura comprendido entre 650 y 800 °C.
7. En aceros inoxidables ferríticos a una temperatura superior a 800 °C asegurándose un enfriamiento rápido en el rango de 400 a 600 °C para evitar la fragilización.
8. En aleaciones de níquel de solución sólida en el rango de temperaturas comprendido entre 425 y 870 °C. Cuando no se quiere reducir la dureza de la aleación el tratamiento se hace entre 315 y 425 °C, en cuyo caso la eliminación de las tensiones residuales es parcial.
9. En aleaciones de aluminio a una temperatura de 350 °C.

## 6. TEORIAS DE ALIVIO DE TENSIONES

### Teoría de la fluencia

#### Re cristalización

Cuando se deforma plásticamente a un metal a temperaturas que son bajas en relación con su punto de fusión, se dice que el metal es trabajado en frío. No se puede expresar exactamente la temperatura que define el límite superior de la zona de trabajo en frío, puesto que varía tanto con la composición como con la cantidad de deformación. Una regla empírica aproximada es suponer que la deformación plástica corresponde al trabajo en frío si este se efectúa a temperaturas menores de la mitad del punto de fusión medido sobre una escala absoluta.

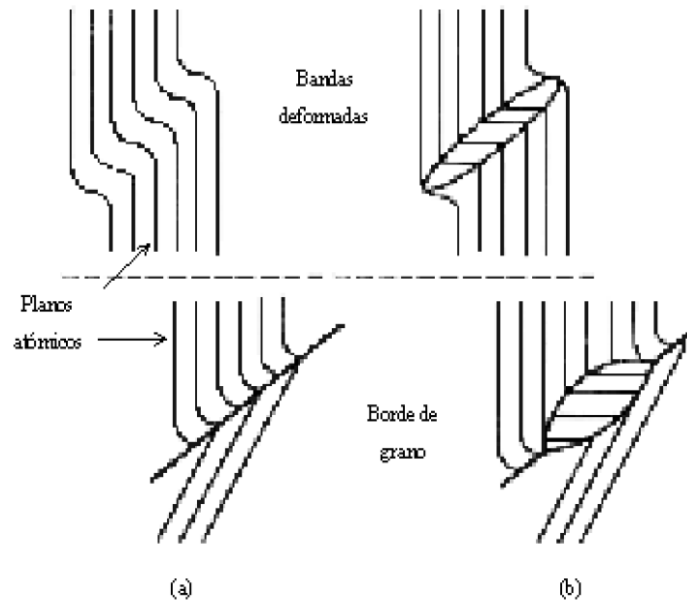
La energía gastada en el trabajo en frío aparece, en su mayor parte, en forma de calor, pero una fracción limitada se almacena en el metal como energía de deformación asociada con diversos defectos reticulares creados por la deformación. La cantidad de energía retenida depende del proceso de deformación y de un determinado número de otras variables como composición del metal y temperatura de deformación. Cierta número de investigadores han indicado que la fracción de la energía que permanece en el metal varía desde un pequeño porcentaje hasta el 10%.

Se designa como recocido al tratamiento cuyo objeto es destruir mediante un calentamiento la estructura distorsionada por el trabajo en frío y hacer que adopte una forma libre de deformaciones. Este proceso se realiza totalmente en el estado sólido y el calentamiento va seguido normalmente de un enfriamiento lento en el horno desde la temperatura alcanzada. En la primera etapa del recocido denominada recuperación, por una parte, con mayor temperatura se produce el alivio de esfuerzos internos causados por el trabajo en frío (tensiones residuales), y por otra parte, se producen cambios micro estructurales.

Si un metal previamente deformado en frío, es recocido a una temperatura suficientemente alta (temperatura de re cristalización), aparecen nuevos cristales en la micro estructura, que tienen idéntica composición y estructura cristalina que los antiguos granos no deformados y su forma no es alargada, sino que son aproximadamente de dimensiones uniformes (equiaxiales). Por lo general se suelen desarrollar en las zonas del grano más intensamente deformadas, como suelen ser los contornos de grano y los planos de deslizamiento. Las agrupaciones de átomos que dan origen a estos nuevos cristales se denominan núcleos. El fenómeno de re cristalización puede considerarse como la combinación de dos procesos distintos, uno de nucleación de granos libres de distorsión y el otro de crecimiento de estos núcleos, los cuales se desarrollan absorbiendo el material inestable trabajado en frío.

La fuerza impulsora de la re cristalización proviene de la energía almacenada del trabajo en frío.





Esquema de zonas altamente deformadas en trabajo en frío, donde surgen los nuevos granos.

**Ilustración 38:** Esquema de zonas altamente deformadas por trabajo en frío

Una idea de cómo se realiza el proceso, se hace estudiándolo en función de la energía de la red. Al hablar de la deformación plástica decimos que los planos de deslizamiento y los contornos de grano son puntos localizados de energía interna elevada debido a la acumulación de dislocaciones en ellos. Ahora bien, la misma naturaleza de la acritud impide a los átomos o dislocaciones de la red distorsionada moverse para formar una red libre de distorsión. La figura de más abajo muestra un símil simplificado de lo que les ocurre a estos átomos. Supongamos que algunos átomos situados inicialmente en los contornos de grano o en los planos de deslizamiento son empujados y ascienden por la ladera de una colina energética hasta alcanzar la altura  $E_1$  con relación a la energía interna de los átomos de la red no deformada, siendo  $E_2$  la energía necesaria para vencer la rigidez de la red distorsionada. Los átomos no pueden volver a recuperar la energía correspondiente a su posición inicial en el cristal libre de distorsión, recorriendo en sentido inverso el camino seguido en su ascensión, sino que tienen que alcanzar la cima de la colina, para desde allí rodar fácilmente, hasta alcanzar el nivel energético inicial. La energía que les falta por coronar la cima  $E_2 - E_1$ , se les puede comunicar mediante calor. Cuando estas zonas localizadas alcanzan temperaturas suficientes para que su





## Alivio de tensiones residuales: Tratamiento térmico vs. Vibración

Trabajo Fin de Máster en Ingeniería de Materiales y Fabricación

Gorka García Rodero

energía sea  $E_2$  ceden parte de esta energía bajo la forma de calor de re cristalización y se desarrollan núcleos de nuevos granos libres de distorsión. Parte de este calor es absorbido por los átomos vecinos, los cuales cuentan, gracias a esto, con la energía suficiente para vencer la rigidez de la red distorsionada y poder pasar a formar parte de la estructura cristalina de los granos libres de distorsión, iniciándose el crecimiento de grano. El número de puntos de energía elevada y la cuantía de esta dependen en gran medida del valor de la deformación sufrida por el material, siendo tanto más numerosos y tanto más elevada la energía que poseen cuanto mayor sea la deformación previa del material.

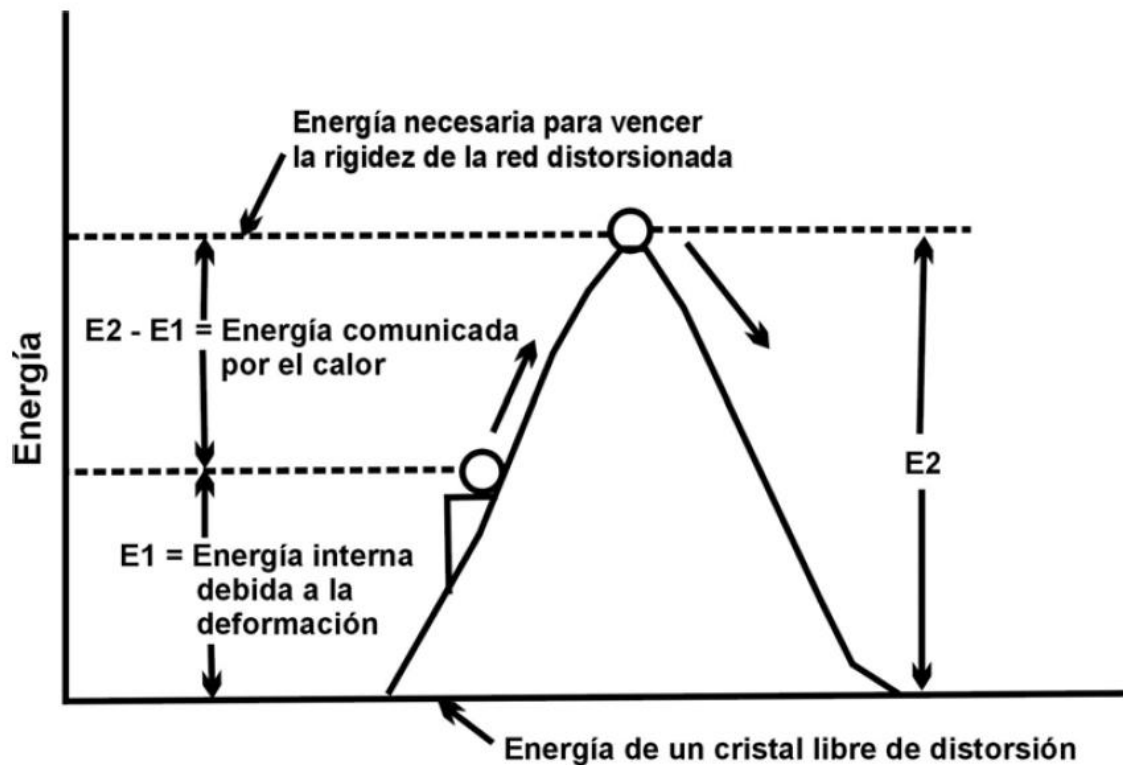


Ilustración 39: Energía interna de los átomos

(12)



## 7. PUESTA EN CONTEXTO DEL PROYECTO

Tal y como hemos visto anteriormente, las tensiones residuales son susceptibles de aparecer en la práctica totalidad de los procesos de fabricación. Con el fin de focalizar el objeto del presente estudio, vamos a restringir el alcance de este proyecto a las estructuras mecano soldadas. Una estructura mecano soldada es una estructura soldada que posteriormente es mecanizada con el fin de obtener tolerancias dimensionales y geométricas no alcanzables en el proceso de soldadura o bien para obtener determinados acabados superficiales propios de un proceso de mecanizado mediante arranque de viruta.

Las estructuras mecano soldadas pueden ser fabricadas en diversos materiales como acero al carbono, acero inoxidable, aluminio, etc. Dentro de las estructuras mecano soldadas vamos a centrarnos en aquellas fabricadas con acero al carbono.

Así pues, el objeto del estudio se centra en estructuras mecano soldadas de acero al carbono.



Ilustración 40: Celosías de acero





**Ilustración 41:** Pieza mecano soldada de acero

De esta forma dejamos fuera del estudio piezas de fundición, piezas forjadas y piezas que partiendo de un macizo laminado son mecanizadas para obtener su geometría final. Este último grupo merecerían un estudio diferenciado fundamentalmente en aquellos casos en los que partiendo de un macizo o “tocho” tiene lugar un proceso previo de desbaste en el que se elimina buena parte del material para seguir con un proceso de mecanizado de afino. En estos casos, durante el proceso de de desbaste tiene lugar un arranque de viruta muy importante el cual induce tensiones residuales en la pieza y que posteriormente se manifiestan durante el proceso de arranque de viruta más fino que tiene lugar a continuación para la búsqueda de la geometría final de la pieza así como de su rugosidad.

Una estructura mecano soldada está constituida de partes soldadas entre sí. Estas partes provienen generalmente de cortes de formatos mayores de materia prima. Cuando hablamos de materia prima nos referimos a formatos comerciales laminados en frío o en caliente dando lugar a diferentes formas, bien planas en diferentes espesores o bien en forma de perfiles cerrados o abiertos.



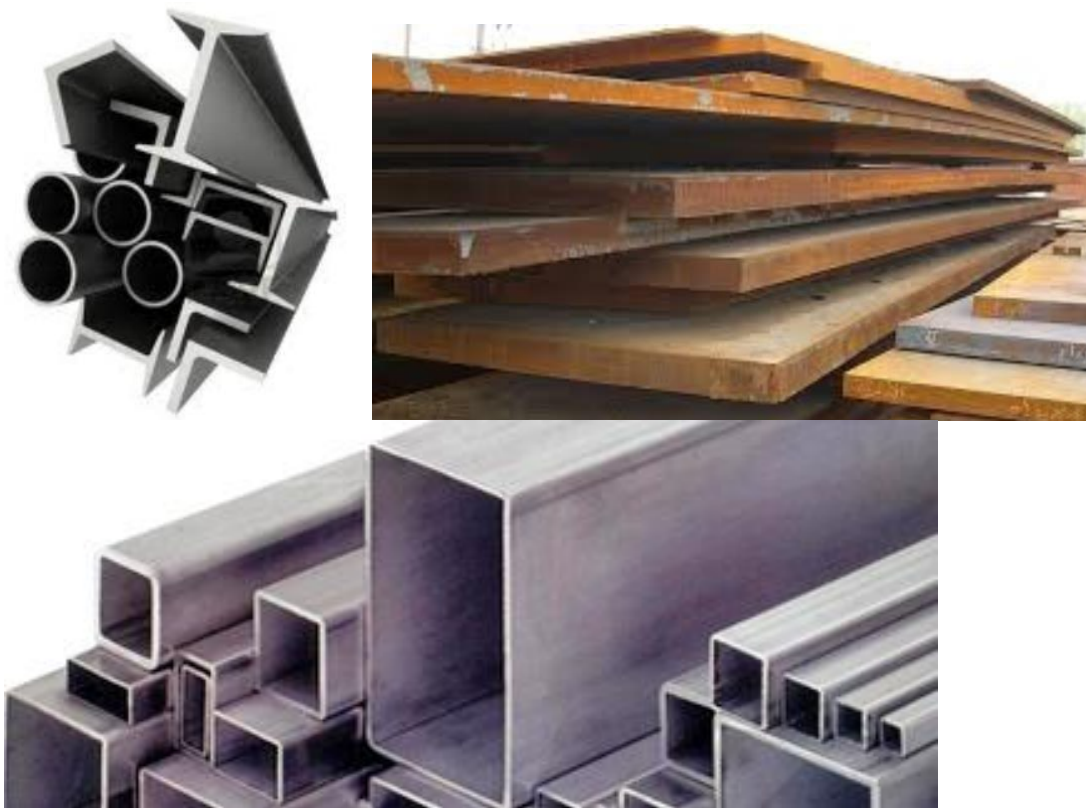


Ilustración 42: Formatos típicos de materia prima

Seguidamente voy a explicar brevemente los procesos de fabricación que se siguen en la construcción de una estructura mecano soldada:

### *Soldadura*

Al proceso de soldadura se le suele llamar también con el nombre de calderería en la jerga industrial y es así como me referiré al mismo de ahora en adelante. El proceso de calderería parte de materia dispuesta en diferentes formatos. Estos formatos provienen generalmente de laminados en frío y en caliente. Se distinguen por un lado los formatos planos pudiéndose encontrar en diversos espesores y dimensiones, y por otro lado los perfiles, los cuales pueden ser abiertos o cerrados (tubos), de diferentes formas y distintos espesores y dimensiones. En el proceso de calderería en primer lugar se cortan los formatos comerciales en las diferentes partes que vamos a necesitar para la construcción de la estructura. Seguidamente tiene lugar el proceso de armado de la estructura. Para el armado de la estructura se puntean las diferentes partes mediante puntos de soldadura. Una vez armada la estructura, se procede a la soldadura completa de la estructura mediante cordones de soldadura continuos o no.



### *Estabilizado de alivio de tensiones*

En aquellas estructuras en las que precisamos un distensionado o alivio de tensiones, este tiene lugar justamente después del proceso de soldadura o calderería. Como ya hemos explicado en puntos anteriores, este distensionado puede hacerse por medio de diversos métodos.

### *Granallado e imprimación*

Para aquellas estructuras que van a ser pintadas, tras el distensionado, son sometidas a un proceso de granallado e imprimación. El objetivo del granallado es la limpieza de la superficie de la estructura. Debemos tener en cuenta que los laminados que se emplean como materia prima, especialmente los laminados en caliente, se encuentran en unas condiciones poco óptimas para un proceso de aplicación de pintura. Para cualquier recubrimiento superficial, es esencial para una buena adherencia la preparación de la superficie o sustrato. Uno de los mejores métodos para limpiar y preparar el sustrato es el granallado. Además debemos tener en cuenta, que si utilizamos a distensionar la estructura por medio de un tratamiento térmico, debido a las altas temperaturas alcanzadas en el proceso, la superficie de la estructura adquiere un aspecto “requemado” quedando cubierta de una especie de cascarilla que conviene eliminar si queremos obtener un buen grado de adherencia de los recubrimientos superficiales que aplicaremos posteriormente.

Tras el proceso de granallado, el primer recubrimiento que aplicamos sobre la estructura es una capa de imprimación. Esta capa de imprimación debe adherirse perfectamente al sustrato si no queremos tener problemas más tarde con la aplicación de la pintura final. Esta capa de imprimación tiene dos funciones principales. Su principal función es la de preparar el sustrato para posteriores capas de pintura decorativa. Otra función secundaria de la capa de imprimación consiste en proteger la estructura frente a la corrosión durante los procesos posteriores y hasta que la pieza no es pintada.



Ilustración 43: Proceso de granallado



Ilustración 44: Proceso de pintura

### *Mecanizado*

Existen unas tolerancias generales propias del proceso de calderería que están lejos de lo que necesitamos para una estructura mecano soldada. Cuando mecanizamos una estructura lo hacemos para obtener unas tolerancias dimensionales y geométricas más exigentes o más estrechas de las que podemos obtener mediante el proceso de soldadura o calderería. Es decir, cuando mecanizamos una estructura es porque estamos buscando una precisión que no podemos obtener en el proceso de soldadura. Además cuando procedemos a mecanizar una estructura, estamos obteniendo de forma implícita un acabado superficial o rugosidad más fina que si no mecanizásemos la estructura.

### *Acabado o recubrimiento superficial: pintura*

Para finalizar, tras el proceso de mecanizado tiene lugar el proceso de pintura. La pintura es un recubrimiento superficial que tiene dos funciones esenciales: en primer lugar protege a la estructura de la acción de la corrosión y en segundo lugar proporciona a la estructura un acabado estético. La pintura se aplica sobre la capa de imprimación dada anteriormente que sirve a modo de sustrato para su perfecta adherencia. Para ello, las estructuras suelen ser limpiadas y desengrasadas previamente a la aplicación de la pintura para eliminar los restos de taladrina provenientes del proceso de mecanizado y favorecer la adherencia de la capa final de pintura. Además las superficies mecanizadas deben ser protegidas de la pintura debido a que el espesor de la capa pintura alteraría las tolerancias dimensionales de la estructura además de modificar la rugosidad o acabado superficial de las mismas.





Ilustración 45: Proceso de aplicación de pintura

De esta forma queda explicado el proceso típico de fabricación de una estructura mecano soldada, por lo que hemos puesto en contexto el tipo de estructuras y los procesos de fabricación asociados entre los que se encuentra el proceso de alivio de tensiones.



### 8. ALIVIO DE TENSIONES RESIDUALES POR VIBRACION

La posibilidad de utilizar las vibraciones para aliviar tensiones residuales se descubrió alrededor de 1943, durante la segunda guerra mundial, cuando unas construcciones soldadas que se transportaron desde el taller de soldadura o calderería hasta el taller de mecanizado por tren y por camión presentaron una menor distorsión cuando se mecanizaron. A medida que la guerra avanzaba, los alemanes introdujeron el “transporte después de la soldadura” en componentes de gran tamaño y precisión.

Los ingenieros no sabían por qué ocurría este fenómeno pero pensaron que era a consecuencia de los movimientos en la pieza de trabajo y comenzaron experimentar y desarrollar métodos para generar los movimientos de una manera más controlada. Los estadounidenses también descubrieron que a través de las vibraciones inducidas en el material, las construcciones ganaban en precisión.

El alivio de tensiones por vibración es un método relativamente simple que induce vibraciones armónicas o sub-armónicas con gran amplitud en el material. El equipo habitual consta de una fuente eléctrica con una unidad de control, un motor eléctrico que gira excéntrico (inductor de la fuerza) y un acelerómetro (transductor) que registra el flujo de frecuencia a través de la pieza de trabajo.

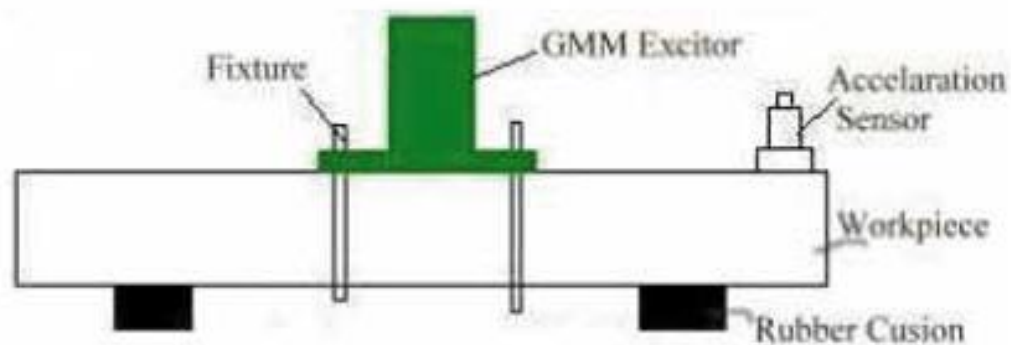


Ilustración 46: Esquema de alivio de tensiones por vibración

Todos los metales tienen una frecuencia armónica. El metal vibrará a esta frecuencia cuando se expone por ejemplo a un martilleo repentino sobre una viga. Después del golpe, el metal vibra hasta que toda la energía se disipa a través de la fricción interna. El alivio de tensiones por vibración afecta al material de manera similar al golpe de un martillo. La diferencia se encuentra dentro de la fuente de vibración, ya que utiliza un motor eléctrico que genera un suministro constante de vibraciones. Cuando una pieza de trabajo se hace vibrar, el calor se acumula y causa un incremento infinitesimal de la temperatura en el interior del material,



induciendo la energía suficiente como para que las dislocaciones se reposicionen y vuelvan a un nivel de tensiones menor. De esta manera las tensiones residuales se reducen en el material.

La frecuencia de las vibraciones depende del material, tamaño y forma de la pieza de trabajo. Por lo general, la frecuencia de vibración esta en el intervalo de 0 a 100 Hz. Se sabe que la aplicación en la que han encontrado mayor efectividad es en el control dimensional de estructuras soldadas.

Actualmente hay dos tipos de métodos disponibles de alivio de tensiones por vibración:

1. En el primer método se hace un vibrado y barrido lento de la pieza de trabajo desde la frecuencia cero a la frecuencia máxima, por ejemplo 0-100 Hz durante 8 minutos. La respuesta es analizada y su frecuencia armónica registrada. Por lo general, se registran dos o tres de esas frecuencias. El vibrador se ajusta y se cambia la velocidad a una que sea igual a la primera frecuencia armónica. La vibración sigue un tiempo dado, por lo general 10 minutos. Después de esto la velocidad del vibrador se incrementa a una que es igual a la siguiente frecuencia armónica superior y el proceso de repite. El máximo exponente de este método denominado resonante es el "Formula 62" del fabricante SER (Stress Relief Engineering Co.). Según los defensores del segundo método que veremos a continuación, achacan al método de resonancia su poca consistencia, opinando además que vibrando en la frecuencia de amplitud pico o máxima (como lo hace el método resonante) se provoca una deformación plástica además de fatiga sobre la pieza o estructura objeto de la vibración.

(14)



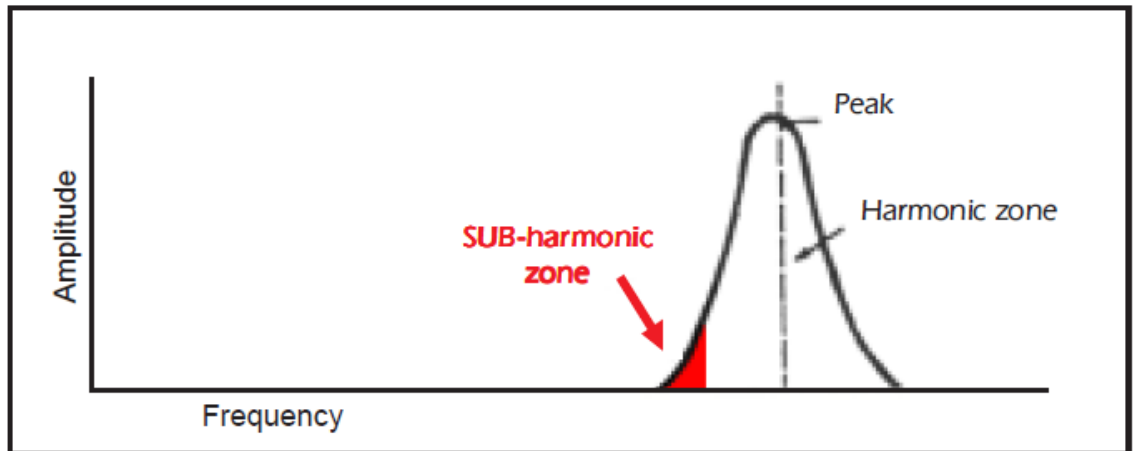


Ilustración 47: Frecuencia y amplitud en el alivio de tensiones mediante vibración sub armónica

2. El otro método llamado sub resonante tiene el mismo procedimiento de iniciación donde se registran las frecuencias armónicas y, luego, la frecuencia de las vibraciones se mantiene ligeramente por debajo del armónico, generalmente por debajo de 4 Hz. Cuando disminuye y estabiliza la primera frecuencia significa que se ha relajado la pieza de trabajo desde las tensiones residuales. El tiempo para que esto ocurra es de aproximadamente 20-30 minutos, dependiendo del tamaño de la pieza de trabajo.  
**(4)**

El denominado método sub resonante está patentado por la compañía americana Bonal Technologies Inc. Bonal es el pionero, el poseedor de la patente y único suministrador mundial del equipo de vibración sub armónico o sub resonante. Originalmente esta compañía trató de implementar el método de alivio de tensiones por vibración resonante o armónica en su propio taller de mecanizado y de acuerdo a su experiencia, encontró que este método era algo inconsistente. Fue entonces cuando esta compañía desarrolló su propio método o técnica basada en la vibración sub resonante o sub armónica a la cual denominó técnica "Meta-Lax".

En este método, primeramente se determina la curva de frecuencia armónica actual del material o estructura. Esta curva representa una frecuencia armónica "falsa" de la estructura tensionada.



# Alivio de tensiones residuales: Tratamiento térmico vs. Vibración

Trabajo Fin de Máster en Ingeniería de Materiales y Fabricación

Gorka García Rodero

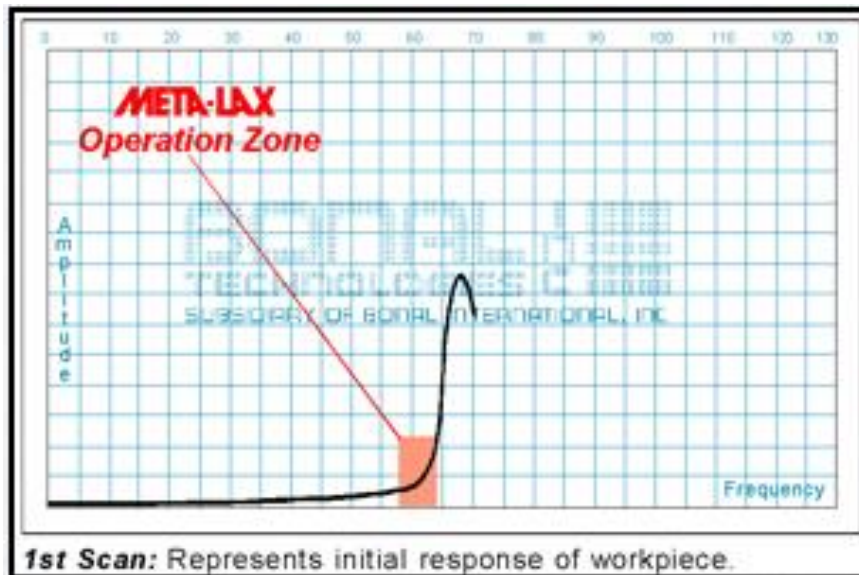


Ilustración 48: Frecuencia y amplitud en el alivio de tensiones mediante vibración sub armónica

Tras una vibración de aproximadamente 20 minutos de duración a una frecuencia correspondiente a un tercio de la altura o pico de amplitud armónica, se observa que la frecuencia armónica cambia a una nueva posición permanente. Así pues, mediante la aplicación de energía vibratoria sub armónica, las zonas o bolsas de alta concentración de tensiones en la pieza o estructura son redistribuidas reduciendo los efectos de las tensiones residuales y haciendo que la curva armónica se desplace. La nueva curva es una lectura real indicativa del estado aliviado de tensiones de la pieza o estructura.

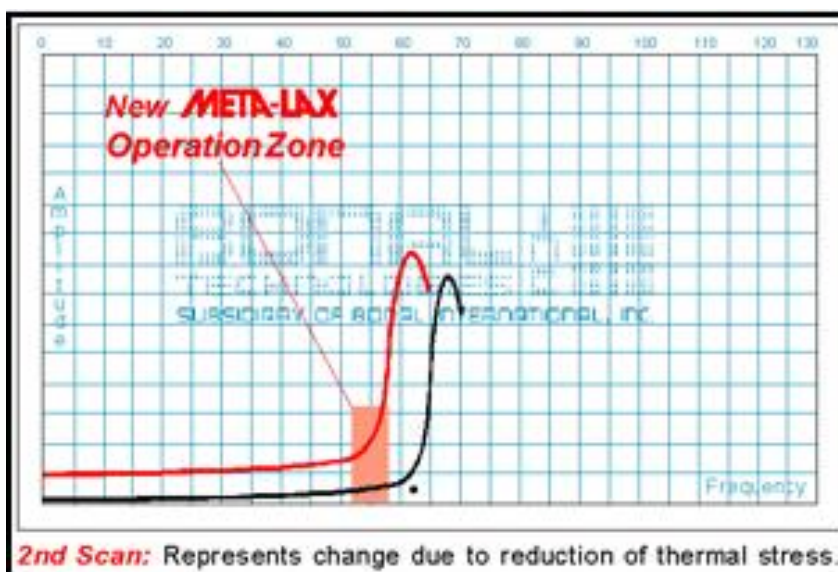


Ilustración 49: Nueva curva indicativa del estado de aliviado de tensiones de la pieza



Cuando la pieza o estructura objeto del vibrado queda aliviada de tensiones residuales, la curva armónica se estabiliza en su localización de frecuencia natural. Gráficamente puede observarse como la curva armónica se desplaza ligeramente pero tiende a estabilizarse en torno a su frecuencia natural, lo cual indica que la pieza o estructura se ha aliviado de sus tensiones residuales.

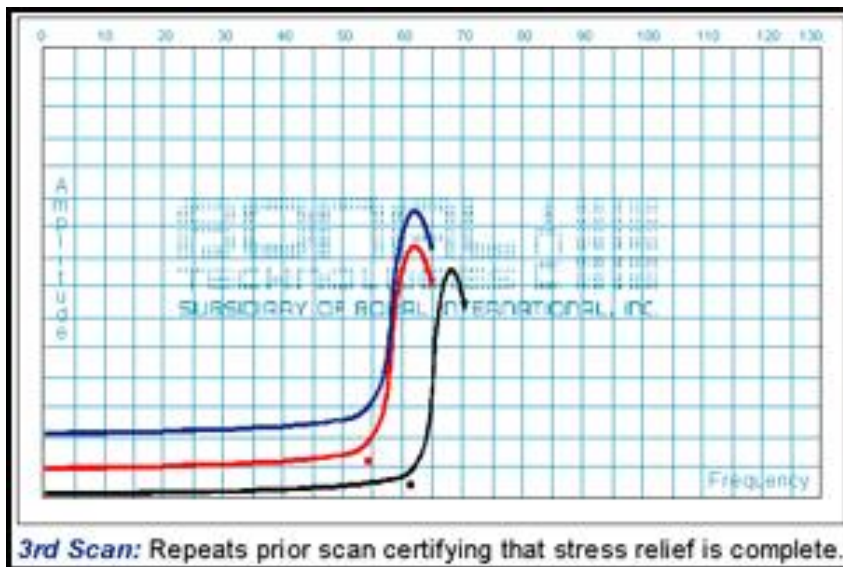


Ilustración 50: Estabilización de la curva armónica a consecuencia del alivio de tensiones de la pieza

En definitiva, de acuerdo a esta tecnología, todas las estructuras metálicas muestran un comportamiento armónico y no armónico. Si la pieza o estructura contiene tensiones residuales generadas por alguna de las diferentes causas vistas con anterioridad, como resultado la curva armónica estará fuera de fase respecto a la localización de su frecuencia natural.

Este método se basa en dos principios fundamentales:

- Principio numero 1: la frecuencia óptima para el alivado de tensiones residuales mediante la utilización de energía de vibración se corresponde a la porción de frecuencia sub armónica de la curva armónica.
- Principio numero 2: la frecuencia natural de una pieza o estructura que posee tensiones residuales se encuentra o localiza en una posición no natural o “falseada”. El fenómeno de desplazamiento de la curva que se produce como consecuencia de la reducción del nivel de tensión residual, puede ser aprovechado para examinar la efectividad del proceso de alivio de tensiones.

# Alivio de tensiones residuales: Tratamiento térmico vs. Vibración

Trabajo Fin de Máster en Ingeniería de Materiales y Fabricación

Gorka García Rodero

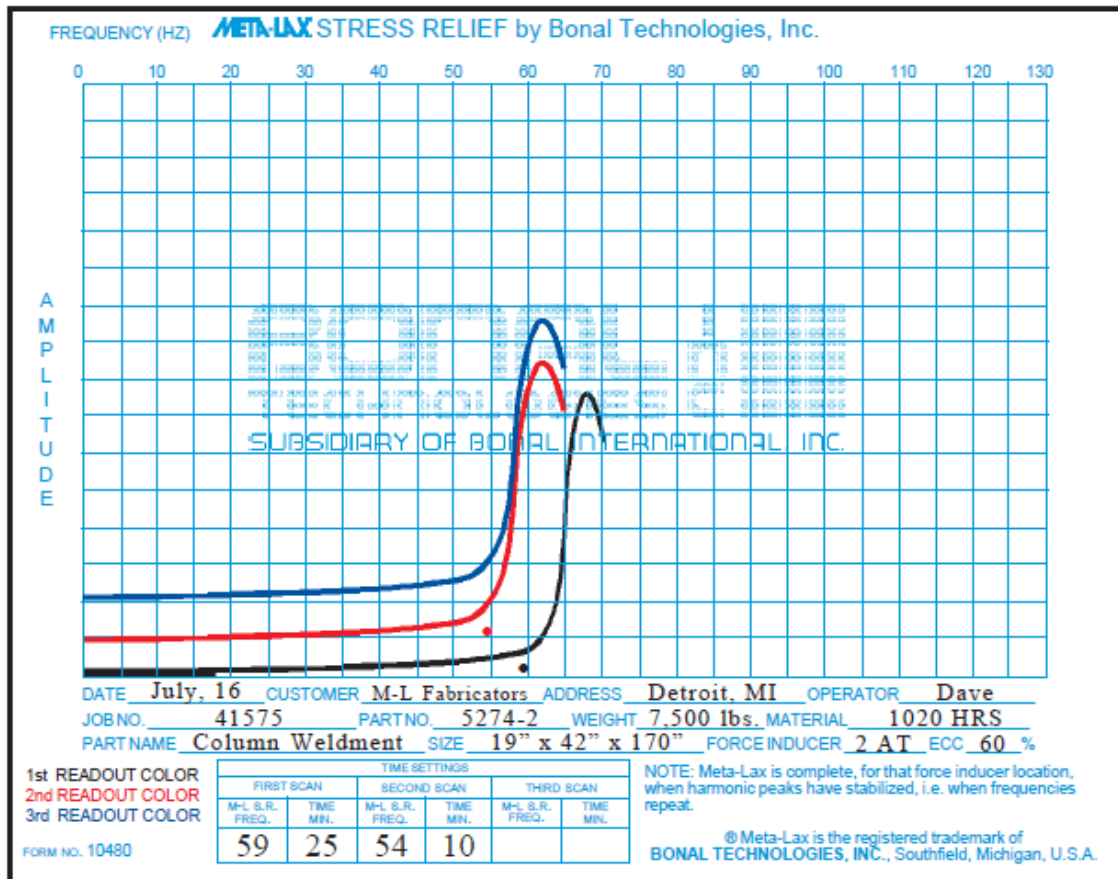


Ilustración 51: Estabilización de la curva armónica a consecuencia del alivio de tensiones de la pieza

(13)

Según el representante comercial de Metronic, distribuidor en España y Portugal del aparato Formula 62, el hecho de que se elija el método resonante o subresonante no es decisivo. En su opinión ambos métodos son igualmente efectivos a la hora de relajar las tensiones residuales de la pieza o estructura en cuestión. En su opinión, es mucho más decisivo e importante para lograr un buen resultado, el hecho de que la vibración se aplique siguiendo las instrucciones y respetando los principios básicos para una correcta aplicación de la misma.

El método por vibración introduce energía dentro de la pieza a estabilizar. Para la red de átomos con tensiones, no existe diferencia entre la energía térmica y la introducida por vibración. Esta energía vuelve a alinear la estructura interna del material aliviando los esfuerzos y estabilizando la pieza sin sufrir deformaciones.



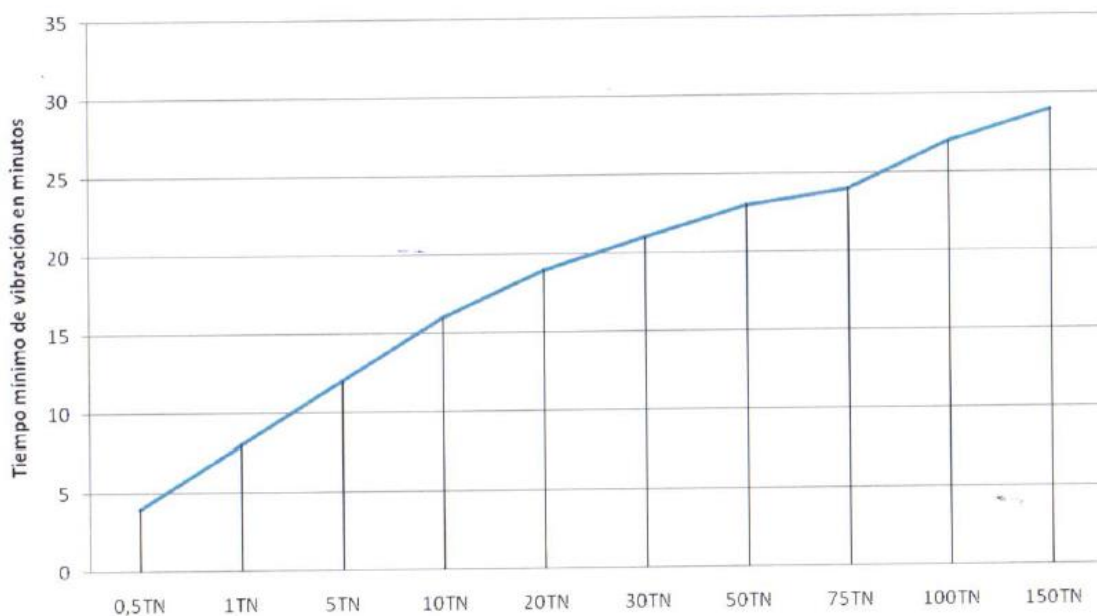
El tratamiento por vibración se puede usar para estabilizar piezas que presentan tensiones debido a procesos de mecanizado, rectificado, troquelado, escariado, forjado y soldado.

El método se basa en la introducción de vibraciones de baja frecuencia y alta amplitud durante un breve periodo de tiempo. Se ha comprobado que las vibraciones resonantes son el método más efectivo para reducir los esfuerzos residuales por medio de vibraciones. El proceso mediante frecuencias resonantes produce una redistribución más pronunciada en comparación con los métodos con frecuencias sobre sonantes o su armónicas.

Las vibraciones de baja frecuencia proporcionan energía de gran amplitud y son muy eficientes en la reducción de los picos de esfuerzos residuales en las piezas metálicas y estructuras de componentes soldados.

El equipo consta de un vibrador de velocidad variable que se aplica a la pieza y de una consola electrónica encajada dentro de un pupitre portátil que se puede desplazar a cualquier punto de la planta de producción. A la pieza a estabilizar también se le aplica un acelerómetro que detecta las vibraciones y transmite la señal a la consola por medio de un cable coaxial. Se determina el punto de resonancia de la pieza, cuya búsqueda queda plasmada por medio de una grafica que imprime la consola. El punto de resonancia se determina variando la velocidad del vibrador hasta alcanzar la amplitud deseada. Una vez localizado, se vibra la pieza por un tiempo en relación al peso de la misma según se muestra en el siguiente grafico.

**TIEMPO DE ESTABILIZADO SEGÚN PESO**



**Ilustración 52: Tiempo de vibrado en función del peso de la pieza**

El tiempo de trabajo puede variar entre 10 minutos y una hora dependiendo del tamaño de la pieza. Si se trata de una pieza muy grande, será necesario aplicar el equipo en varios puntos diferentes. El vibrador tiene un radio de acción equivalente a una esfera de 3 metros de diámetro. Por lo tanto, en función de las dimensiones de la pieza a estabilizar, será preciso hacer tantas "atadas" del vibrador como sea preciso como para cubrir la dimensión total de la pieza en base a este parámetro.

Si nos excedemos en el tiempo de aplicación no ocurre nada pues el exceso de vibración no genera efectos negativos en el material. El equipo puede trabajar también en modo automático. La maquina trabajara durante 15 minutos en tres ciclos distintos de velocidad. Esto es suficiente para estabilizar una pieza de hasta 10 toneladas de peso. Para piezas mayores se emplearan dos periodos consecutivos de 15 minutos.

Para un buen estabilizado se han de cumplir dos reglas básicas:

- Aislar la pieza del suelo tanto como sea posible para hacerla vibrar con libertad.
- Aplicar de manera firme el vibrador a la pieza mediante sargentos de apriete, tornillos, etc.

El proceso de estabilizado se puede usar en una amplia variedad de metales ferrosos y no ferrosos incluyendo aceros al carbono, aceros inoxidable, aluminio, hierro fundido, manganeso, etc. Además es aplicable en una gran variedad de formas y tamaños. El tratamiento por vibración no es tan efectivo en materiales laminados en frio, extruidos, endurecidos por deformación plástica, trabajados en frio y materiales endurecidos por solidificación de una fase. Este método no puede eliminar deformaciones debidas a los efectos del calor y no es capaz de enderezar piezas.

Para construcciones soldadas, el alivio de tensiones se puede realizar durante la soldadura, lo que es de gran ayuda en la prevención de la acumulación de esfuerzos. No olvidemos que las tensiones son acumulativas. Si aplicamos vibración después de soldar podemos eliminar del orden del 50% de las tensiones residuales. Este porcentaje se incrementa sensiblemente si aplicamos la vibración mientras soldamos o inmediatamente después del soldeo.

### Manejo del estabilizador de tensiones

La forma de trabajar con el estabilizador de tensiones es extremadamente sencilla. Simplemente hay que cumplir dos reglas: aislar perfectamente del suelo la pieza a distensionar y amarrar firmemente el motor vibrador a dicha pieza.





**Ilustración 53:** Aislamiento del suelo con goma como requisito para vibrar la pieza

Con el control de vibración de la consola controlaremos la frecuencia de vibración y con un acelerómetro que también se fija a la pieza, visualizaremos como esta vibrando esta. La impresora de la maquina registra el trabajo que hemos realizado. El acelerómetro nos puede ayudar a buscar el punto de resonancia de la pieza. La resonancia es el punto en que las moléculas metálicas se están agitando con mayor excitación. Es el punto óptimo para estabilizar. La búsqueda de la resonancia por medio del acelerómetro nos puede llevar de uno a dos minutos, pero de esta manera, reduciremos enormemente el tiempo de vibración al que vamos a someter a la pieza.





Pasos a seguir:

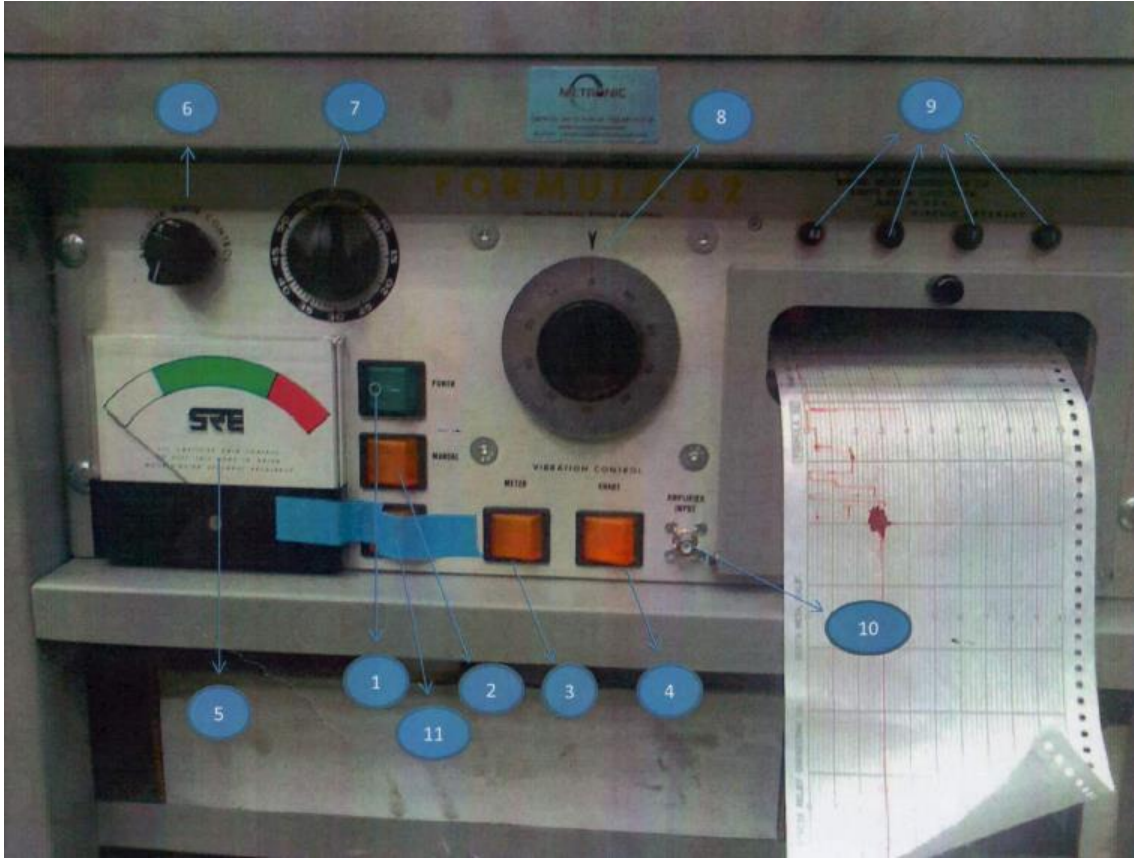


Ilustración 54: Imagen de la consola y sus controles

- 1) Interruptor de la unidad enciende o apaga la unidad.
- 2) Interruptor manual.
- 3) Interruptor del medidor. Enciende o apaga el amplificador.
- 4) Interruptor del cuadro de graficas. Enciende o apaga el grabador.
- 5) Medidor del indicador de resonancia.
- 6) Control del amplificador. Ajusta la capacidad del amplificador.
- 7) Indicador manual de tiempo transcurrido.
- 8) Control de vibración. Girando la rueda del control de vibración aumenta la velocidad del motor.
- 9) Fusibles. Protege la línea del suministro eléctrico del motor.
- 10) Entrada para el cable del acelerómetro.
- 11) Modo de funcionamiento en automático.



# Alivio de tensiones residuales: Tratamiento térmico vs. Vibración

Trabajo Fin de Máster en Ingeniería de Materiales y Fabricación

Gorka García Rodero

- A) Amarrar el motor con dos sargentos a la pieza a estabilizar.
- B) Conectar el cable del acelerómetro al equipo (10) y a la base del motor.
- C) Asegurarse de que el control del amplificador (6) está totalmente abierto girándolo en sentido de las agujas del reloj.
- D) La rueda del control de vibración (8) tiene que estar a "0".
- E) Conectar la máquina pulsando el interruptor (1).
- F) Modo manual (2).
- G) Conectar el interruptor del medidor de frecuencia (3).



- H) Girar la rueda de control de vibración (8) hasta que la aguja del indicador de resonancia (5) se sitúe al comienzo de la zona roja.



# Alivio de tensiones residuales: Tratamiento térmico vs. Vibración

Trabajo Fin de Máster en Ingeniería de Materiales y Fabricación

Gorka García Rodero

- l) Ir cerrando el control del amplificador (6) en sentido contrario de las agujas del reloj hasta que la aguja del indicador de resonancia (5) se sitúe al final de la zona blanca.
- j) Repetir los pasos H e I hasta que la aguja del indicador de resonancia encuentre el punto óptimo, que será cuando la tendencia de la aguja al aumentar la vibración sea la de ir hacia la parte blanca del indicador en vez de a la verde.
- k) Dejar vibrando durante el tiempo marcado



(8)

Así pues, la secuencia básica de estabilizado de tensiones residuales mediante la vibración es tan simple como:

- Se busca la frecuencia de resonancia
- Se vibra en frecuencias cercanas
- Se controla la resonancia
- Si la frecuencia varía (se reduce) se vuelve a repetir el proceso
- Si la frecuencia no varía se da la pieza o estructura por estabilizada



## 8.1.GALERIA DE IMÁGENES



Ilustración 55: Aplicación de vibración a la materia prima previo a su procesamiento



## Alivio de tensiones residuales: Tratamiento térmico vs. Vibración

Trabajo Fin de Máster en Ingeniería de Materiales y Fabricación

Gorka García Rodero



Ilustración 56: Aplicación de vibración tras el mecanizado de desbaste y previo al mecanizado de acabado



## Alivio de tensiones residuales: Tratamiento térmico vs. Vibración

Trabajo Fin de Máster en Ingeniería de Materiales y Fabricación

Gorka García Rodero



Ilustración 57: Aplicación de vibración durante el proceso de soldadura



# Alivio de tensiones residuales: Tratamiento térmico vs. Vibración

Trabajo Fin de Máster en Ingeniería de Materiales y Fabricación

Gorka García Rodero



Ilustración 58: Aplicación de vibración a un carnero de máquina herramienta



## Alivio de tensiones residuales: Tratamiento térmico vs. Vibración

Trabajo Fin de Máster en Ingeniería de Materiales y Fabricación

Gorka García Rodero



Ilustración 59: Aplicación de vibración antes del proceso de mecanizado





## Alivio de tensiones residuales: Tratamiento térmico vs. Vibración

Trabajo Fin de Máster en Ingeniería de Materiales y Fabricación

Gorka García Rodero



Ilustración 60: Aplicación de vibración a una estructura soldada de aluminio



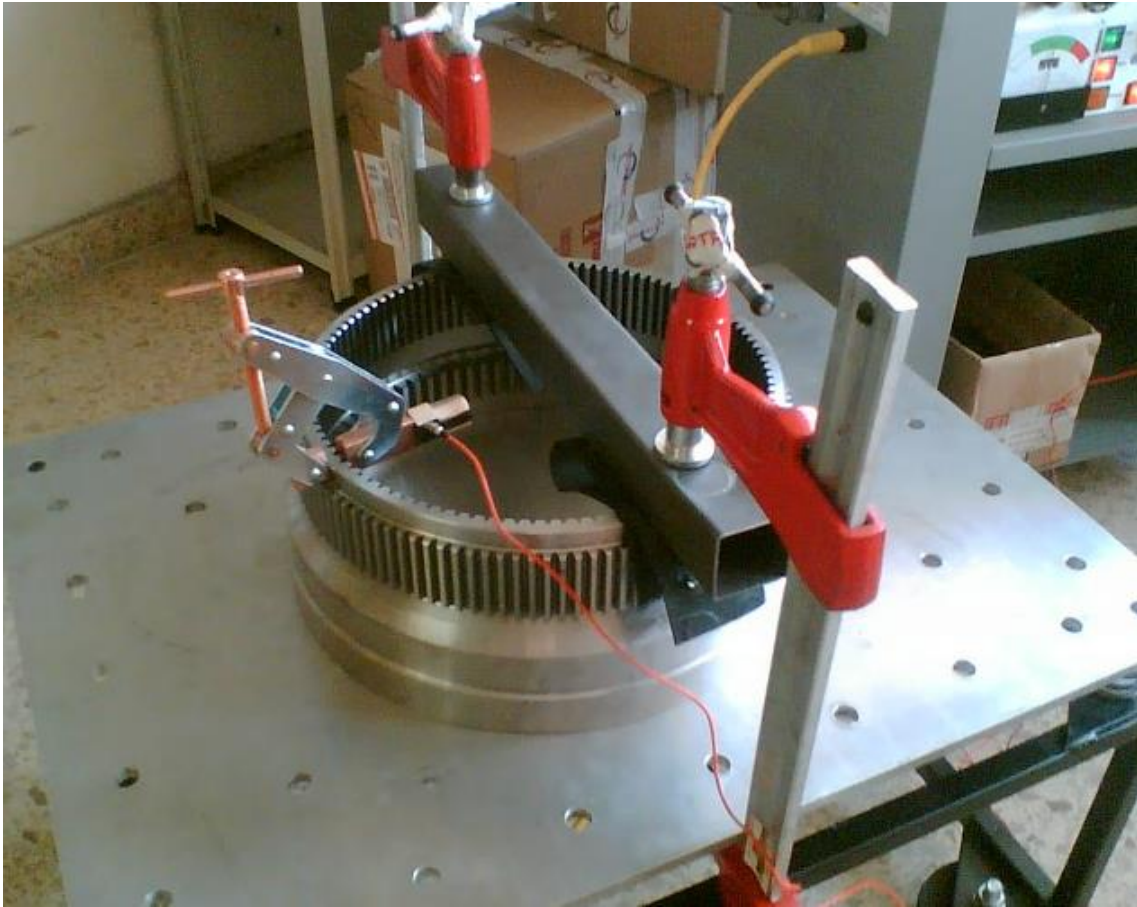


Ilustración 61: Aplicación de vibración a una corona

Seguidamente se adjunta un ejemplo de informe de un estabilizado de tensiones por vibración.





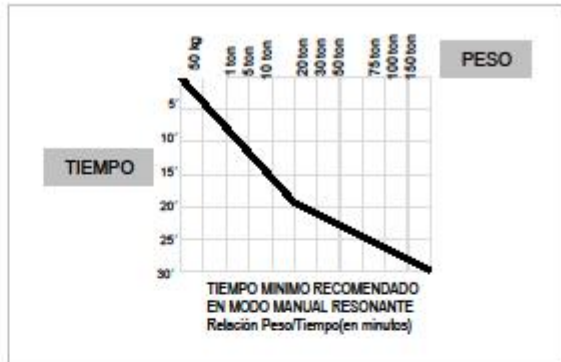
## ESTABILIZADO DE TENSIONES POR VIBRACION - Protocolo de Trabajo

Fecha: 09.04.2012  
 Hora: 9:00 h.

Descripción:  
 Referencia Pieza: 5383/1  
 N° Serie:

Material: AISI 904L  
 Peso: 4.000 kg. Aprox.

Operario: Mauricio Azpiazu  
 Lugar de Trabajo: ARROSPE



### PROTOCOLO DE TRABAJO

Modo de Trabajo	Tiempo Estimado*	N° de Aplicaciones del Motor Vibrador										Tiempo Empleado	Anotaciones sobre el trabajo
		TR: Tiempo real en minutos - CV: Control de Vibración											
Manual		Aplicación 1		Aplicación 2		Aplicación 3		Aplicación 4		Aplicación 5			
		TR	CV	TR	CV	TR	CV	TR	CV	TR	CV		
Manual Resonante Optimo	23 min.	Aplicación 1		Aplicación 2		Aplicación 3		Aplicación 4		Aplicación 5		30 min.	Resonancia optima. Resultado satisfactorio.
		TR	CV	TR	CV	TR	CV	TR	CV	TR	CV		
Automático		Aplicación 1		Aplicación 2		Aplicación 3		Aplicación 4		Aplicación 5			
		TR	CV	TR	CV	TR	CV	TR	CV	TR	CV		

TR: tiempo real de vibración

CV: control de vibración ajustando la excéntrica del motor.

(\*) El tiempo estimado se calcula a partir del peso y la geometría de la pieza. Se toma como referencia el gráfico peso / tiempo del fabricante.

### DOCUMENTACION SOBRE EL TRABAJO REALIZADO

Comentarios: La pieza se aísla mediante caballetes y tacos de goma. El punto de resonancia se fija sin ningún tipo de problema. Se realizan dos aplicaciones de motor en dos puntos simétricos.



Foto 1: vista general



Foto 2: detalle segunda aplicación de motor

Metric S.A. – Barrena, 42-44 – 20600 Eibar - Tel: 943121400 - Fax: 943121750  
 E-mail: mauri@metricnet.com - Página Web: www.metricnet.com

### 8.2. ALIVIADO DE TENSIONES POR VIBRACION DE GRANDES ESTRUCTURAS MECANOSOLDADAS

En la actualidad existe un grueso de evidencias experimentales para mostrar que las grandes estructuras mecano soldadas pueden ser estabilizadas mediante la aplicación de de vibración resonante que induce bajos niveles de tensión (en el rango del 5-10% del límite elástico). La reducción en la tensión residual que es realizada por la vibración no puede ser explicada en este caso mediante la teoría de la plasticidad que ha sido desarrollada para explicar la operativa del VSR (vibration stress relief) en pequeñas muestras o especímenes.

En el caso de pequeñas muestras o especímenes está extendida la creencia de que las tensiones residuales existentes en el material y las cargas inducidas por la vibración se combinan de tal manera que causan zonas locales de plasticidad reduciendo así el estado global de tensión. Además se percibe la existencia de una especie de efecto umbral por debajo del cual no se observa ningún efecto de alivio de tensión alguno.

Pues bien, hay estudios que revisan la teoría de la plasticidad como base del fundamento del alivio de tensiones mediante vibración. De hecho hay estudios que defienden que esta teoría no es aplicable a piezas o estructuras de grandes dimensiones. Si bien, todo parece indicar que lo que realmente hace o provoca que la teoría base que explique el alivio de tensiones mediante la vibración es precisamente el origen de las tensiones residuales. De esta manera cuando las tensiones residuales provienen de un proceso de deformación en frío en los que tienen lugar el cizallamiento del material provocando deformaciones de los granos y nudos de dislocaciones, parece ser que la teoría de la plasticidad es el fundamento que explica el alivio de tensiones.

Sin embargo cuando estamos hablando de estructuras soldadas de grandes dimensiones...

Hay estudios que muestran como la reacción martensítica puede ser estabilizada de tal manera que pequeños granos de austenita puedan existir a la temperatura ambiente. Se ha propuesto una teoría revisada del VSR (vibration stress relief) basada en torno al concepto de que la vibración activa las dislocaciones móviles, de tal manera que estas se mueven a configuraciones que promueven la nucleación de martensita en los granos de austenita retenida, permitiendo a la austenita que se transforme.

Cuando la austenita se transforma en martensita, se somete a una transformación de cizallamiento que actuará para reducir la tensión residual local mediante la interacción con el campo tensional externo al que está sometido el grano de austenita. El uso del método VSR en grandes estructuras mecano soldadas puede verse que está asociado al bajo ritmo de enfriamiento de la estructura después de ser soldada, lo cual promueve la estabilización y retención de la austenita.

En especímenes de pequeño tamaño, del tipo usado en investigaciones de laboratorio, el ritmo de enfriamiento es bastante mayor por lo que el carbono no tiene tiempo suficiente para difundirse desde la fase ferrítica, lo cual es un paso necesario para la estabilización de los



granos de austenita. En especímenes en los que las tensiones residuales son inducidas por medio de trabajo en frío, no habrá austenita retenida para que el mecanismo explicado opere y por lo tanto estos especímenes se amoldan a la teoría de la plasticidad del VSR (vibration stress relief).

**(9)**



## 9. ALIVIO DE TENSIONES MEDIANTE TRATAMIENTO TERMICO

Seguidamente explicare el proceso de alivio de tensiones mediante tratamiento térmico en componentes de construcción soldada según el código ASME (American Society of Mechanical Engineers) y en particular en sus secciones VIII Div.1 y IX.

### *Equipo de tratamiento*

- El tratamiento será llevado a cabo en hornos cerrados, preferentemente de dimensiones suficientes para abarcar la totalidad del componente a tratar.
- Si fuera preciso efectuar un tratamiento por secciones, este se hará de modo que las partes que sobresalgan del horno se encuentren adecuadamente aisladas, al menos en una zona de 1.500 mm. La zona de transición no debe contener bridas o discontinuidades.

### *Normas generales*

- Previamente a la introducción en el horno, los componentes estarán libres de todo material inflamable como grasa, pintura, etc.
- Las piezas han de encontrarse bien soportadas, fuera del contacto con la llama y en zonas donde no existan gradientes de temperatura excesivos.
- Se establecerá un registro gráfico de todos los termopares desde la introducción a la extracción de la pieza en el horno.
- El papel de registro, llevara la indicación de escalas de tiempo y temperatura.
- La temperatura del horno no excederá de 400 °C en el momento de introducir la pieza.

### *Velocidad de calentamiento*

- La velocidad de calentamiento no excederá en ningún caso el valor de 200 °C/hora.
- El valor a aplicar a cada caso será igual al resultado de dividir el valor anterior por el máximo espesor representativo en pulgadas.
- Al efectuar la verificación de los registradores de temperatura se debe llevar a cabo una verificación de la distribución de la temperatura en diferentes zonas del horno.
- Una vez que se verifique que la fluctuación de la temperatura dentro del horno no excede de los 40 °C, se podrán usar los termopares de control del horno como indicadores de la temperatura de las piezas en tratamiento en lugar de termopares aplicados a las mismas.
- Durante el periodo de calentamiento no existirá una variación en temperatura a través del componente mayor que 139 °C cada 4,6 metros de longitud del componente. Esta velocidad será mantenida hasta alcanzar el valor de 620 °C.



### *Mantenimiento a la temperatura de distensionado*

- El tiempo de mantenimiento a la temperatura de  $620 \pm 10$  °C se obtendrá de acuerdo con lo indicado en la tabla UCS-56 de ASME VIII Div.1.

Para  $t \leq 2$  inch.  $\longrightarrow$   $T = 1$  hr / inch. ; 15 minutos min.

Para  $t \leq 2 \div 5$  inch.  $\longrightarrow$   $T = 2$  hr + 15 minutos por cada inch.adicional.

Para  $t > 5$  inch.  $\longrightarrow$   $T = 2$  hr + 15 minutos por cada inch.adicional.

### *Velocidad de enfriamiento*

- La velocidad de enfriamiento no superara en ningún caso el valor de 260 °C/hora.
- El valor a aplicar en cada caso será igual al resultado de dividir el valor anterior por el máximo espesor, en pulgadas, de la chapa a tratar.
- Una vez alcanzada la temperatura de 300 °C, la pieza puede ser extraída del horno y enfriada al aire en calma, evitando el contacto con la lluvia.

### *Verificación*

- Los instrumentos registradores de temperatura y sus accesorios deberán ser verificados periódicamente y llevar un registro de los diferentes certificados extendidos por la entidad certificada que realice dicha verificación.

### **(10)**

A continuación se muestra un certificado de calidad relativo a un tratamiento térmico de alivio de tensiones residuales de una estructura de calderería.



# Alivio de tensiones residuales: Tratamiento térmico vs. Vibración

Trabajo Fin de Máster en Ingeniería de Materiales y Fabricación

Gorka García Rodero





				<b>CERTIFICADO DE CALIDAD</b>	
<small>                 TRATAMIENTOS TERMICOS UTECH                  S.L.                  C/ ALBAZAN 110                  48940 ALBAZAN (VIZCAYA)                  T. 945 41 12 12 - 945 41 12 13                  F. 945 41 12 14             </small>				Revisión 11.11.99 Impreso N° 01A	
<b>CLIENTE</b> EGONDO. S.L.  <b>N° ALBARAN</b>  <b>S/PEDIDO N°</b> 436 REF. M TORRES			<b>INFORME:</b> 199888  <b>ORD FAB:</b> 7887  <b>FECHA:</b> 24.02.14		
<b>INFORME TRATAMIENTO SUPERFICIAL</b>					
<b>MATERIALES TRATADOS</b>					
* 2 PATA COLUMNA 9553301B * 2 PATA COLUMNA 9553302B					
<b>ESPECIFICACIONES</b>					
Humedad Relativa <u>..35%-70%..</u> Temperatura <u>...10°-25°..</u>  Granallado hasta Grado <u>.....SA 2 1/2.....</u> de la Norma <u>.....UNE 48302:1998.....</u>  Aplicación de <u>.....&gt;50.....</u> mc. de <u>.....Imp Epoxi Fosf. Zinc Ral 7005.....</u> Aplicación de <u>.....</u> mc. de <u>.....</u> Aplicación de <u>.....</u> mc. de <u>.....</u>					
<b>OBSERVACIONES</b>			<b>CONTROL DE CALIDAD</b>		
					

Ilustración 62: Certificado de calidad asociado a un tratamiento de alivio de tensiones mediante tratamiento térmico



# Alivio de tensiones residuales: Tratamiento térmico vs. Vibración

Trabajo Fin de Máster en Ingeniería de Materiales y Fabricación

Gorka García Rodero



DIVISION 2  
Of. Montserrat, nº 49  
ABADIANO 48220 (Bizkaia)  
Tel. 94 521 73 32 Fax: 94 621 73 33  
C.I.F. B-48565893

CERTIFICADO DE CALIDAD



**CERT. DE ESTABILIZADO**  
**EGONDO, S.L.**  
Albarán: N – 199888 Pdo: 436  
O.F.: 7887  
\* 2 PATA COLUMNA 9553301B  
\* 2 PATA COLUMNA 9553302B

Abadiano, 24.02.14



ACEPTADO 24.02.14 HORNADA K190214 HG-12

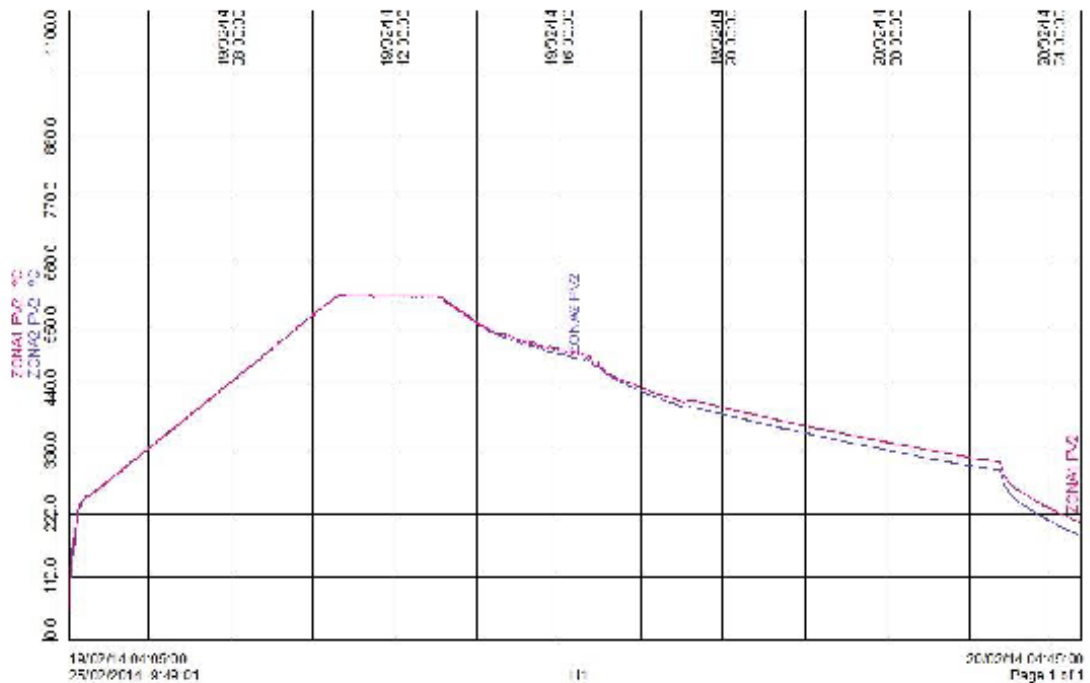


Ilustración 63: Rampas de subida y bajada de un tratamiento térmico de alivio de tensiones



## Alivio de tensiones residuales: Tratamiento térmico vs. Vibración

Trabajo Fin de Máster en Ingeniería de Materiales y Fabricación

Gorka García Rodero

---

El estabilizado por tratamiento térmico es el método más conocido. En el tratamiento por horno, las altas temperaturas reducen las tensiones en el material. Este tipo de alivio de esfuerzos, aunque generalmente resulte efectivo, tiene varios defectos y limitaciones. El costo es elevado, el proceso es de larga duración y frecuentemente da por resultado el deterioro de las propiedades de los materiales. Los gastos generados relativos al transporte son también importantes.



## 10. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE CADA METODO. COMPARATIVA ENTRE AMBOS.

Entre las ventajas del distensionado por vibración frente al aliviado de tensiones mediante tratamiento térmico se identifican las siguientes:

- El equipo es compacto y portátil, de este modo, puede moverse a cualquier parte de la planta de producción o incluso trasladarlo fácilmente a otras empresas.
- Los costes de inversión, funcionamiento y mantenimiento son bajos.
- El proceso dura entre 15 y 30 minutos por ubicación, según el peso y configuración del componente o estructura.
- Es fácil de usar y no requiere la necesidad de extensas instrucciones para el operario.
- Se puede usar en una amplia gama de materiales.
- No tiene efectos negativos sobre el material.
- Las tolerancias de las piezas pueden mantenerse en límites imposibles de alcanzar con el tratamiento térmico.
- Mejores resultados respecto a la estabilidad dimensional.
- La vibración es ventajosa en términos de costes especialmente cuando tratamos de estabilizar estructuras de grandes dimensiones.
- Posibilidad de aplicar la vibración en cualquier momento del proceso de fabricación de una estructura mecano soldada.
- Menor consumo de energía.
- Payback entre 6 y 9 meses.
- Ausencia de decoloración y cascarilla.
- Puede aplicarse a componentes bimetálicos.
- Las soldaduras en aceros inoxidables austeníticos que precisan una buena estabilidad dimensional son más eficazmente estabilizadas mediante la vibración que mediante el tratamiento térmico. (11)

Respecto a las ventajas del tratamiento térmico de alivio de tensiones frente al distensionado mediante vibración, se identifican las siguientes:

- El tratamiento térmico de alivio de tensiones continúa siendo un método más aceptado en general frente a la vibración, tanto por diseñadores, calculistas, fabricantes y demás interesados.
- El tratamiento térmico es más eficiente para grandes cantidades de piezas si además son fácilmente manipulables.
- La mayor parte de especialistas coinciden en aseverar que el tratamiento térmico es preferible al distensionado por vibración cuando la estructura va a estar sometida a fatiga.



## Alivio de tensiones residuales: Tratamiento térmico vs. Vibración

Trabajo Fin de Máster en Ingeniería de Materiales y Fabricación

Gorka García Rodero

- El distensionado por vibración no es capaz de producir transformaciones de fase así como transformaciones metalúrgicas tal y como lo hace el aliviado de tensiones mediante tratamiento térmico. Por lo tanto el efecto del tratamiento térmico sobre los cordones de soldadura y sobre la zona afectada por el calor no es alcanzable mediante el tratamiento por vibración.

Seguidamente muestro una tabla comparativa entre ambos métodos en la que se comparan diferentes aspectos vinculados a ambos procesos.

	TRATAMIENTO TERMICO	TRATAMIENTO POR VIBRACION
forma de energia introducida en el material	termica	mecanica mediante vibracion
coste proceso		10% del tratamiento termico
coste de operación y mantenimiento	100.000 €/año	10.000 €/año
coste inversion	500.000 €	21.500 €
espacio necesario	grande	pequeño, equipo compacto
duracion	24 horas	10-60 minutos
afecciones sobre el material	deformaciones dimensionales disminucion de la resistencia a la tension aumento elongacion disminucion de la dureza	disminucion de la dureza
grado dificultad aplicación	medio	bajo
portabilidad	NO (poca o ninguna)	SI (equipo movil)
afeccion por exceso de tratamiento	SI (posible cambio de las propiedades de los materiales)	NO
aplicación a lo largo del proceso	en momentos puntuales	en cualquier momento
materiales con baja efectividad		materiales laminados en frio materiales extruidos materiales endurecidos por deformacion plastica materiales trabajados en frio materiales endurecidos por precipitacion de 1 fase
efectos medioambientales	alto	bajo (el consumo de energia es del orden de un 95% menor)
automatizacion	alto grado	potencialmente alto

84

Ilustración 64: Tabla comparativa de ambos tratamientos de alivio de tensiones



## Alivio de tensiones residuales: Tratamiento térmico vs. Vibración

Trabajo Fin de Máster en Ingeniería de Materiales y Fabricación

Gorka García Rodero

Comparisons of Metal Stress Relief Processes							
			Bonal Tech (Meta-Lax®)	Heat Treat (Thermal)	Cryogenics	Other VSR Processes	NO Stress Relief
	Benefits	Operating Principles	SUB-Harmonic Vibration	High Temp Heat	Deep Freeze & Low Heat	Resonant Vibration	Nothing
1	Effective (Compared to Thermal)		○	○	○	○	●
2	Consistent (Compared to Thermal)		○	○	◐	◐	●
3	Documentation/Certification		○	◐	◐	○	-
4	Can be Applied During Welding		○	◐	●	●	-
5	Can be Applied to Finished, Assembled, or Hardened Parts		○	●	◐	◐	-
6	Can Stress Relieve Cold Worked Material		●	○	○	●	-
7	Can Soften Hardened Surfaces		●	○	●	●	-
8	No Size or Weight Limitations		○	○	◐	◐	-
9	No Adverse Side Effects (changing mechanical properties, soften, distortion, discoloration)		○	○	○	○	-
10	Time (Speed of Process)		○	○	◐	○	-
11	No Fatiguing		○	◐	○	○	-
12	Engineering & Laboratory Support		◐	○	◐	◐	-
Key	○=Excellent   ◐=Good   ○=Average   ◐=Poor   ●=Avoid						
SUB-Harmonic Vibration Stress Relief is a <b>PATENTED</b> process available only from Bonal Technologies, Inc.							

Ilustración 65: Tabla comparativa de ambos tratamientos de alivio de tensiones



## 11. ENCUESTA ACERCA DEL CONOCIMIENTO Y USO DEL ALIVIO DE TENSIONES RESIDUALES MEDIANTE VIBRACION

Durante todo este tiempo (más de un año), he ido preguntando a diversos fabricantes, fundamentalmente caldereros, mecanizadores y tratamentistas, acerca de su conocimiento y uso del alivio de tensiones residuales mediante vibración, pudiendo haber conversado con más de veinte empresas.

En primer lugar cabe destacar que no hay un conocimiento extendido acerca de la existencia de este método como una alternativa en unos casos o como un complemento en otros al tratamiento térmico de alivio de tensiones residuales.

Entre los que lo conocen destacan aquellos fabricantes que trabajan para el sector de la máquina herramienta, aeronáutica y ferrocarril. El método de alivio de tensiones por vibración es utilizado fundamentalmente por mecanizadores de alta precisión o bien con maquinaria para mecanizar piezas de grandes dimensiones con ciertos requerimientos exigentes en cuanto a tolerancias dimensionales y geométricas. Asimismo, es muy utilizado por tratamentistas que lo ofrecen como un servicio complementario al del tratamiento térmico, granallado e imprimado que habitualmente realizan. Por el contrario es bastante menos utilizado por caldereros o talleres de soldadura en general.

Entre aquellos que lo utilizan, el motivo principal para su uso consistía en la consecución de una estabilidad dimensional de la estructura, principalmente en el proceso de mecanizado, de ahí su utilización de manera más extensa entre los talleres mecánicos o mecanizadores y sobre todo entre aquellos especializados en la obtención de tolerancias muy estrechas. Otra motivación muy importante a la hora de utilizar el aliviado de tensiones mediante vibración, lo constituye las dimensiones de la estructura a estabilizar. Aquellas estructuras de grandes dimensiones y que supone un riesgo alto su manipulación están entre las que tienen muchas papeletas para ser vibradas. Desde el punto de vista de la soldadura, no hay duda que el tratamiento térmico tiene un mayor efecto así como más duradero sobre los cordones de soldadura y las zonas afectadas térmicamente frente a la vibración. No obstante en estos casos, en primer lugar, debe hacerse un análisis para determinar la necesidad siquiera de aliviar la estructura de tensiones residuales ya que quizás no sea necesario. A partir de aquí el tratamiento de alivio de tensiones por vibración no debe verse nunca como un método alternativo al tratamiento térmico sino como un método complementario.

Además seguidamente muestro el resultado de una encuesta entre usuarios del método de alivio de tensiones por vibración localizados en Estados Unidos en la que se entrevén diversas analogías y paralelismos con lo expuesto anteriormente en base a los resultados de las encuestas realizadas por mí entre compañías locales fundamentalmente del País Vasco y Navarra.



## Appendix 1: Survey of Users of Vibratory Stress Relief

### Types of business:

Machine tool builders:	4
Job shops:	4
Fab shops:	2
Industrial saw builders:	2
Cement making machinery:	1
Steel and aluminum mill equipment:	1
Plunger pumps, 3 and 5 cylinder:	1
Aerospace tooling:	1
Hydraulic cylinders:	1
Mining, quarry and pit equipment:	1
Bolster plates, mold bases:	1

### Departments:

Design:	8
Plant management:	6
Welding:	3
Assembly:	1
Machining:	1
Quality Assurance:	1

Workpiece weight varied from as low as 20 – 100 lbs., to as much as 100,000 lbs., the most common workpieces was in the 4,000 lbs to 40,000 lbs range.

Workpiece size varied from 2 to 3-feet long for the smallest, to as much as 60-feet long, with 8 to 24-foot long parts being common.

### Material:

Mild steel:	16, including 1010, 1018, 1020, and A36
Cast:	2, including C135 grey iron
Stainless steel:	5, including 304, 304L, 316, 316L, 410
Low-Carbon, High-Strength Steel:	4, including HY80, ASTM 514
Alloy Steels:	4, 1045, 4140, 4340

### Criteria for type of stress relief:

Size of workpiece:	8
Avoiding distortion from PWHT:	4
Avoiding scaling from PWHT:	2
Customer requirements:	4

### Problems solved by using vibratory stress relief:

Dimensional instability:	19
Machinability:	14
Reduced cracking in finished product:	6
Surface finish:	4

### Manufacturer of vibratory stress relief equipment:

Airmatic Inc., VSR Technology Group:	11
Bonal Technologies:	5
Stress Relief Engineering:	3
Aaronson:	1

(11)



### 12. APLICACIÓN A UN CASO REAL

En un proyecto de fabricación de una máquina para el corte de apilados de fibra de carbono mediante ultrasonidos, la estructura principal sobre la que se disponen los apilados de fibra de carbono para ser cortados, consiste en una hilera de mesas que por medio de vacío sujetan los apilados mientras estos son cortados con una cuchilla. Estas mesas de vacío nos son más que estructuras mecano soldadas que hacen las veces de mesa guiada sobre la que se desplaza el puente que lleva el cabezal de corte. A estas mesas se les exige unas tolerancias dimensionales y geométricas muy exigentes tales como una planitud en el entorno de la décima para una tabla de 5000x2500 mm, mientras que en la zona de los guidos se exigen tolerancias geométricas de paralelismo y perpendicularidad de 2 centésimas. Es más que obvio que estas tolerancias únicamente pueden alcanzarse con un proceso de mecanizado tras el proceso de soldadura o calderería.



Ilustración 66: Máquina de aplicación de fibra de carbono y corte mediante ultrasonidos







Ilustración 67: Máquina de aplicación de fibra de carbono y corte mediante ultrasonidos

Como consecuencia del proceso de soldadura tal y como explicado en puntos anteriores, se generan tensiones residuales que deben ser aliviadas para fundamentalmente:

- Conseguir una buena estabilidad dimensional durante el proceso de mecanizado
- Evitar fracturas en los cordones de soldadura

Con este objetivo se plantea el método de alivio de tensiones óptimo para esta estructura. En un principio ingeniería opta por el tratamiento térmico de alivio de tensiones como método elegido. De esta manera el proceso de fabricación consistiría en un flujo de trabajo como el que se detalla a continuación:



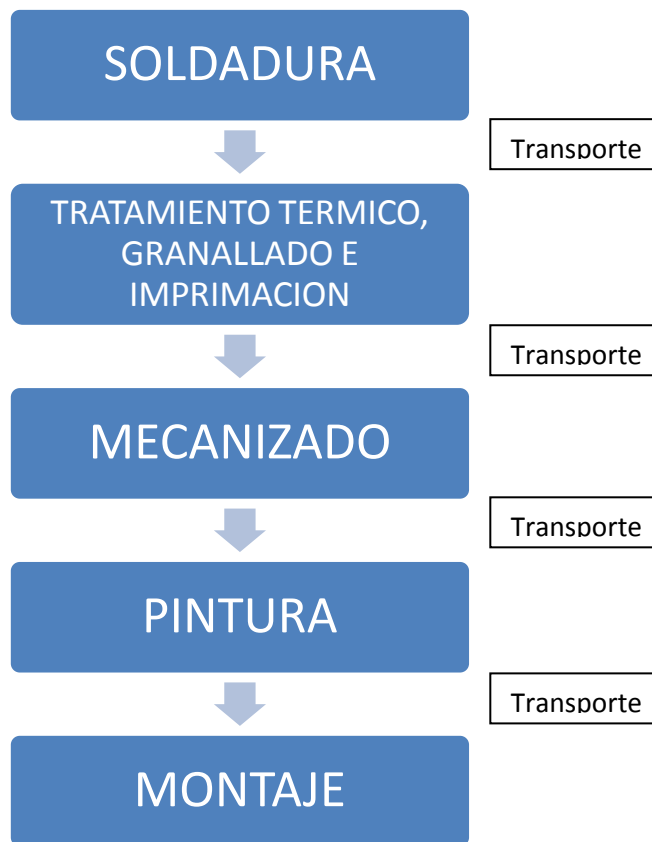


Ilustración 68: Secuencia de procesos asociados a la fabricación de una estructura mecano soldada aliviada mediante tratamiento térmico

Con este planteamiento preliminar, en la revisión de diseño se percibió el problema que podía suponer el hecho de que se desprendiese cualquier partícula que pudiese acabar en la bomba de vacío con la consiguiente avería que esto podría originar en la bomba de vacío. Ante este hecho se trataba entonces de evitar los procesos del tratamiento térmico y de granallado posterior. El tratamiento térmico debido a que durante el calentamiento que sufre el material se genera una capa superficial “quemada” que precisa ser eliminada mediante granallado con el objetivo de preparar la superficie para que la capa de imprimación se ancle al sustrato.

No obstante nos encontrábamos con el problema de que había zonas ocultas de sombra en las que iba a ser altamente complicado llegar con la granalla para eliminar la cascarilla generada en el tratamiento térmico. Además la propia granalla suponía un riesgo en sí misma. Esto se debe a que los perdigones de granalla se alojan en los lugares más insospechados de la estructura. Posteriormente durante la imprimación estos perdigones quedan adheridos con el consiguiente riesgo de que se desprendan más tarde durante la puesta en servicio de la máquina, lo cual conduciría a la rotura de la bomba de vacío. Así pues se trataba de evitar a toda costa los procesos de tratamiento térmico y de granallado. Esto se podía conseguir mediante la introducción del tratamiento de alivio de tensiones por vibración. Para eliminar el



## Alivio de tensiones residuales: Tratamiento térmico vs. Vibración

Trabajo Fin de Máster en Ingeniería de Materiales y Fabricación

Gorka García Rodero

proceso de granallado intermedio, se decidió pre granallar la materia prima para de esta forma soldar materiales ya granallados y evitar de esta manera el granallado preparatorio de la superficie para la pintura final de acabado.

De esta forma el flujo del proceso de fabricación queda de la siguiente manera:

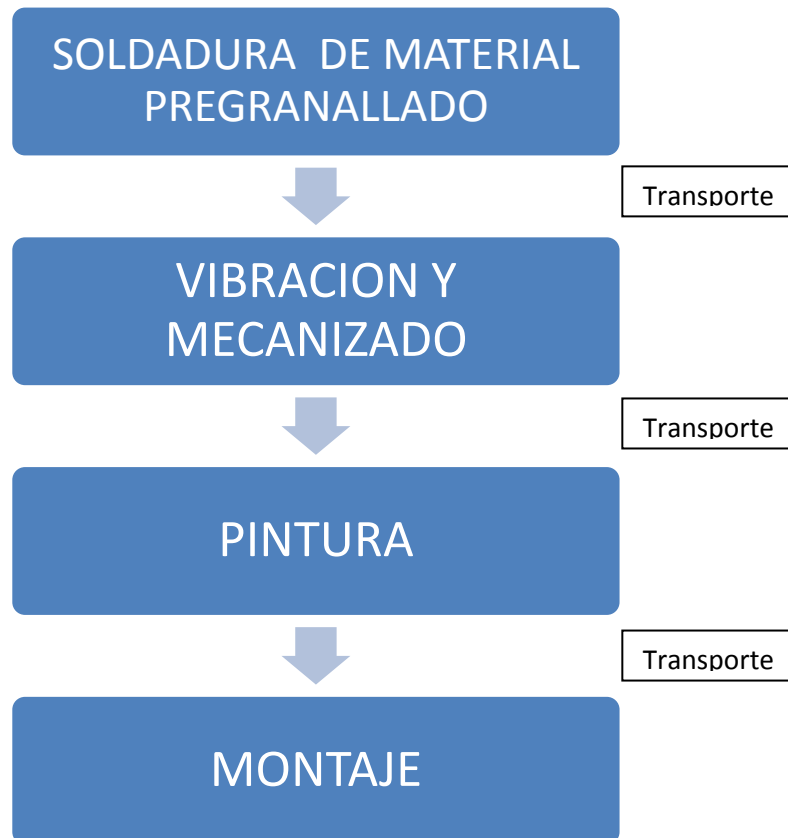


Ilustración 69: Secuencia de procesos asociados a la fabricación de una estructura mecano soldada aliviada mediante vibración

A continuación vamos a explicar las diferencias fundamentales entre ambos flujos de fabricación para finalmente hacer un análisis económico en el que calcularemos el ahorro económico obtenido con el segundo planteamiento.

La portabilidad del equipo utilizado para el alivado de tensiones residuales por vibración hace que esta servicio pueda subcontratarse con gran facilidad, pudiendo hacerse el tratamiento por vibración tanto en las instalaciones de la calderería durante y tras el proceso de soldadura como en las instalaciones del taller de mecanizado antes de comenzar el desbaste y tras la finalización del desbaste y justo antes del mecanizado de afino. Además es ya bastante habitual que las caldererías y mecanizadores dispongan de estos equipos debido a la pequeña

inversión que estos suponen y la facilidad en su manejo principalmente. Sin embargo son muy pocos los talleres que integran el tratamiento térmico en forma de hornos en sus instalaciones debido a que estos precisan de un esfuerzo inversor más importante además del espacio físico que se necesita para operar en condiciones. Este hecho implica que el tratamiento térmico de alivio de tensiones conlleva en la gran mayoría de ocasiones una tanda mas de portes de las estructuras sometidas a tal tratamiento, sin olvidar la manipulación asociada a este porte como son la carga y la descarga que en el caso de grandes estructuras implican un alto riesgo. En definitiva con el tratamiento de alivio de tensiones por vibración frente al tratamiento térmico nos estamos ahorrando la diferencia de coste entre ambos tratamientos a lo que hay que sumar el coste del transporte de enviar las estructuras desde la calderería a las instalaciones del tratamentista.

En el ejemplo concreto que nos ocupa de trataba de 14 módulos de mesas. Cada mesa pesaba alrededor de 7000 kg. Teniendo en cuenta sus dimensiones, el transporte que nos ahorramos implicaba 7 camiones en caso de no remontar las mesas o 5 camiones en caso de remontar una mesa sobre otras dos para aprovechar de esta forma la capacidad máxima de carga de los camiones. Considerando un coste de camión unitario de 300 €, en esta tanda de transportes entre la calderería y el tratamentista nos ahorramos un importe que oscila entre los 1500 y los 2100 € en función del aprovechamiento de cada camión. A este importe debemos añadir la diferencia de coste entre ambos procesos de distensionado. Para este tipo de estructuras el coste del tratamiento térmico ronda los 0,15 €/kg. Esto significa que el coste del tratamiento térmico para un modulo de mesa es de aproximadamente 1000 € mientras que el coste del tratamiento de aliviado de tensiones mediante vibración es de aproximadamente 300 € por modulo. En definitiva en este caso concreto nos estamos ahorrando alrededor de 700 € por cada modulo. Teniendo en cuenta que la mesa completa está formada por 14 módulos, el ahorro total asciende a 9800 € a lo cual debemos sumar el ahorro en el transporte que habíamos calculado entre 1500 y 2100 €. Esto quiere decir que el ahorro total obtenido entre el tratamiento y la eliminación de un porte oscila entre 11300 y 11900 € lo cual representa un ahorro del 3,5% sobre el coste de fabricación total de la mesa.



## 13. CONCLUSIONES

Seguidamente procedo a enumerar las conclusiones a las que he llegado tras leer una buena cantidad de documentación y fundamentalmente escuchar a muchísimas personas de diferentes ámbitos pero con gran experiencia en el alivio de tensiones residuales. Mi objetivo en este punto es esbozar unas pocas conclusiones pero de gran significado y calado.

- El alivio de tensiones residuales por vibración no puede presentarse como un método sustitutivo al tratamiento térmico en cualquier caso.
- El alivio de tensiones residuales por vibración es un método alternativo e incluso sustitutivo al tratamiento térmico en algunos casos pudiendo ser también un método complementario.
- La eficacia del alivio de tensiones por vibración es incontestable cuando el objetivo del tratamiento es la estabilidad dimensional durante el proceso de mecanizado.
- El alivio de tensiones que se consigue no es total sino que es parcial tanto con el tratamiento térmico como con la vibración.
- El alivio de tensiones residuales por vibración debe descartarse como método sustitutivo del tratamiento térmico cuando este se aplica por razones metalúrgicas o cuando el tratamiento térmico es obligatorio como parte del proceso indicado en las normas de fabricación.
- El proceso de soldadura introduce variables importantísimas muy a tener en cuenta a la hora de elegir el método de alivio de tensiones residuales.



## 14. BIBLIOGRAFIA

- (1) Seminario de Jesús Ruiz del Departamento de Ciencia de Materiales de la UPM celebrado el 15 de Noviembre de 2010.
- (2) Curso de formación de ingenieros internacionales de soldadura. Módulo 2. Tema 2.7 Estructura de las uniones soldadas. Actualizado por Antonio Portolés García.
- (3) Tensiones y deformaciones de soldeo. Asociación Española de soldadura y tecnologías de la unión, CESOL. Curso de formación de ingeniero internacional de soldadura.
- (4) E magazine Metalmecánica de la revista especializada Interempresas. Aproximación al alivio de tensiones mediante vibración (VSR) por Elkin Martínez Díaz de la Unidad de nuevos procesos de fabricación de Aimme.
- (5) Curso de formación de ingenieros internacionales de soldadura. Módulo 3. Tema 3.7 Comportamiento de estructuras soldadas sometidas a cargas dinámicas. Actualizado por Manuel López Aenlle.
- (6) Asociación española de soldadura y tecnologías de unión. Tema 2.6 Tratamientos térmicos de los metales base y de las uniones soldadas. Actualizado por Rosana Romero Camacho.
- (7) Pagina web de Tratamientos Térmicos Iurreta.
- (8) Presentación general estabilizado de tensiones por vibración de Metronic, División Soldadura.
- (9) A theoretical review of the operation of vibratory stress relief with particular reference to the stabilization of large-scale fabrications. C. Walker. Department of Mechanical Engineering University of Strathclyde, Glasgow.
- (10) Procedimiento del tratamiento térmico de eliminación de tensiones en componentes de construcción soldada realizadas bajo el Código ASME y en particular en sus secciones VIII Div.1 y IX.
- (11) Productive applications of mechanical vibrations. Published by American Society of Materials in 2005.
- (12) Apuntes A. Rivera. Departamento de Ingeniería en Metalurgia de la Universidad de Atacama (Chile).  
<http://www.metalurgia.uda.cl/apuntes/arivera/clases/Metalurgia%20Mecanica/Apuntes%20Metalurgia%20-%20Fisica.pdf>
- (13) [www.metal-lax.com](http://www.metal-lax.com). Metal-Lax Stress Relief and Weld Conditioning. Bonal Technologies, Inc.
- (14) [www.stressreliefengr.com](http://www.stressreliefengr.com). Stress Relief Engineering Company. Resonant Vibration Method.



## 15. RELACION DE ILUSTRACIONES

ILUSTRACION	EXPLICACION
1	Ejemplos gráficos de tensiones residuales
2	Perfil de las tensiones residuales
3	Efecto de las tensiones residuales en productos laminados
4	Origen de las tensiones residuales
5	Tipos de tensiones residuales
6	Aporte térmico del proceso de soldeo
7	Isotermas de soldeo
8	Origen de las tensiones transversales y longitudinales
9	Distribución de tensiones en dos chapas unidas a tope
10	Tensiones residuales en una unión a tope
11	Limitación de deformación por rigidez externa
12	Limitación de deformación por rigidez interna por material adyacente al cordón
13	Limitación de deformación por rigidez interna por acumulación de cordones de soldadura
14	Aparición de grietas por tensiones residuales
15	Relación entre deformación y tensión residual
16	Relación entre la restricción de la deformación y las tensiones residuales de soldadura
17	Motivos conducentes a un exceso de deformación o de tensión residual
18	Técnicas de medida de tensiones residuales
19	Técnica de perforación de placas
20	Método de seccionado en sólidos tridimensionales
21	Método de capa frágil, configuraciones típicas
22	Método de difracción de rayos X
23	Secuencia de soldeo para reducir las tensiones residuales en uniones soldadas
24	Secuencia de soldeo para reducir las tensiones residuales en uniones soldadas
25	Secuencia de soldeo para reducir las tensiones residuales en uniones soldadas
26	Tratamiento térmico post soldadura para alivio de tensiones
27	Corrección de la deformación mediante enderezado en frío
28	Corrección de la deformación mediante enderezado por llama
29	Sentido del enderezado mediante el método por llama
30	Métodos de alivio de tensiones residuales
31	Equipo de martilleado o needle peening
32	Efecto del needle peening sobre el cordón de soldadura
33	Efecto del needle peening sobre el cordón de soldadura
34	Efecto del granallado o shot peening
35	Rampas típicas de un recocido de estabilización
36	Hornos para tratamiento térmico
37	Piezas tras el tratamiento térmico
38	Esquema de zonas altamente deformadas por trabajo en frío
39	Energía interna de los átomos
40	Celosías de acero
41	Pieza mecano soldada de acero
42	Formatos típicos de materia prima
43	Proceso de granallado

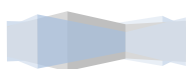


# Alivio de tensiones residuales: Tratamiento térmico vs. Vibración

Trabajo Fin de Máster en Ingeniería de Materiales y Fabricación

Gorka García Rodero

44	Proceso de pintura
45	Proceso de aplicación de pintura
46	Esquema de alivio de tensiones por vibración
47	Frecuencia y amplitud en el alivio de tensiones mediante vibración sub armónica
48	Frecuencia y amplitud en el alivio de tensiones mediante vibración sub armónica
49	Nueva curva indicativa del estado de aliviado de tensiones de la pieza
50	Estabilización de la curva armónica a consecuencia del alivio de tensiones de la pieza
51	Estabilización de la curva armónica a consecuencia del alivio de tensiones de la pieza
52	Tiempo de vibrado en función del peso de la pieza
53	Aislamiento del suelo con goma como requisito para vibrar la pieza
54	Imagen de la consola y sus controles
55	Aplicación de vibración a la materia prima previo a su procesamiento
56	Aplicación de vibración tras el mecanizado de desbaste y previo al mecanizado de acabado
57	Aplicación de vibración durante el proceso de soldadura
58	Aplicación de vibración a un carnero de máquina herramienta
59	Aplicación de vibración antes del proceso de mecanizado
60	Aplicación de vibración a una estructura soldada de aluminio
61	Aplicación de vibración a una corona
62	Certificado de calidad asociado a un tratamiento de alivio de tensiones mediante tratamiento térmico
63	Rampas de subida y bajada de un tratamiento térmico de alivio de tensiones
64	Tabla comparativa de ambos tratamientos de alivio de tensiones
65	Tabla comparativa de ambos tratamientos de alivio de tensiones
66	Maquina de aplicación de fibra de carbono y corte mediante ultrasonidos
67	Maquina de aplicación de fibra de carbono y corte mediante ultrasonidos
68	Secuencia de procesos asociados a la fabricación de una estructura mecano soldada aliviada mediante tratamiento térmico
69	Secuencia de procesos asociados a la fabricación de una estructura mecano soldada aliviada mediante vibración





## 16. ANEXOS

### ANEXO 1

TÜV Rheinland Industrie Service GmbH  
Conformity of pressure devices



#### Shell Contour Base Structure - No Stress Relief Annealing

Report no. FB: 973/ 10709542-11

---

Manufacturer: M.TORRES DISEÑOS INDUSTRIALES S.A,  
Sociedad Unipersonal  
Carretera Pamplona - Huesca, Km. 9.  
31119 Torres de Elorz (Navarra) – Spain

Person in charge: Dipl.-Ing. SFI Werner Stoppeikamp

Test period: September 2011

Norms and standards used:

DIN 18800, DIN 15018, DIN EN ISO 3834, DIN EN ISO 5817,  
DIN 4112, DIN EN 10025.

Sonderfertigungsmittelanweisung [specific operational facilities  
instruction] Airbus 81-T-05-6001 – manufacturing, stress relief  
annealing



## 1. Introduction

A base platform was assembled and welded from sheets, profiles and rectangular tubes made of steel for the transport of thin-walled components for the aircraft industry.

Carriers and pillars are screwed to this base structure which hold the mounts and fixings for the aircraft components to be transported.

This base platform was manufactured in accordance with the technical drawing: 73638182 01 01 000 Rev.D including the identification: Shell Contour Carrier Base Structure.

The dimensions of the base structure are 17128 x 3409 x 469.

The materials specified in the parts list are S235JR and S355J2 pursuant to DIN EN 10025-2.

The certification in accordance with DIN EN 729-2, now DIN EN ISO 3834-2 was required as welding quality standard in the manufacturing shop.

The drawing does not specify any welding tolerances, e.g. DIN EN ISO 13920.

The evaluated group for seam welding is indicated in accordance with DIN EN ISO 5817 – C.

## 2. Description of the Base Platform

Stress relief annealing or similar procedures are aimed at minimising residual stresses induced into a component during the manufacturing process.

The welding process induces heat into the component.

The welded components expand and shrink during the annealing process. Depending on the rigidity of the structure, stresses in the welding structure will be caused if shrinkage is not possible.

The base platform is statically stressed.

There is no frequent swelling or changing stress amplitude with leeways exceeding  $2 \times 10^4$  in the mode of operation used.



page 3 / 3  
Report no. 10049770/09



The required general tolerances are indicated in the drawing in accordance with DIN ISO 2768 part 1 – m and DIN ISO 2768 part 2 – K.

The surface details are indicated in the drawing in accordance with DIN 6784-D2.

These tolerances and the values indicated in the drawing, i.e.  $\pm 0,5$ , can be achieved by adequate automated production using the dimensions of the base platform.

Mechanic processing has been specified for the support sheets (  $\sim 250 \times 200 \times 15$  ) which are welded to the base frame which has been set up from rectangular tubes.

Mechanic processing of these contact areas will not give rise to any stresses and will thus not cause any deformations.

## 2. Evaluation

Stress relief annealing is not useful and not necessary for the base platform.

It is no complicated structure with multiaxial stress states and multi-stressed welding knots.

The processing accuracies are executable in terms of manufacturing.

The present wall thicknesses are less  $t < 25$ .

The stress is static.

Travel in the manufacturing shop does not cause any sudden impact or thrust movements at the component.

The component is no hoist and is not used for lifting. The speed used in the process is slow.

Cologne, 9. September 2011.

Dipl.-Ing., SFI Werner Stoppelkamp

