

# “FORMULA 62”

## Equipo Vibrador para el Alivio de Esfuerzos Residuales

**El equipo vibratorio de “FORMULA 62” para alivio de esfuerzos residuales ofrece un número de ventajas sobre las antiguas técnicas térmicas para alivio de esfuerzos residuales:**

- **El equipo es compacto y portátil y puede moverse fácilmente a cualquier lugar en el piso de producción para el alivio de esfuerzos en el lugar actual de trabajo.**
- **Los costos de inversión, funcionamiento y mantenimiento son bajos.**
- **Breve tiempo de proceso, entre 15 y 30 minutos por ubicación, según el peso y configuración del componente o estructura fabricada.**
- **Fácil de usar y sin necesidad de extensas instrucciones para el operario**
- **Se puede usar en una amplia variedad de materiales:**
  - **componentes fabricados con materiales disímiles (no tratables térmicamente)**
  - **aleaciones no tratables térmicamente**
  - **materiales con acabado fino (esmerilado, pulido, etc.)**
- **No tiene efectos negativos en el(los) material(es) de la pieza:**
  - **no cambiará las propiedades mecánicas**
  - **no cambiará estructural ni químicamente la metalurgia**
  - **no cambiará la dureza**
  - **produce una superficie limpia y libre de decoloración, escorias y escamas**
- **Las tolerancias de las piezas puede mantenerse a límites imposibles o imprácticos de alcanzar con los métodos térmicos para alivio de esfuerzos residuales.**
- **Se puede usar durante el proceso de fabricación:**
  - **durante y después de labores de soldadura**
  - **entre las etapas de maquinado**

### DEFINICIÓN DE ESFUERZOS RESIDUALES

Uno de los principales problemas que enfrenta la industria del labrado de metales es la acumulación de esfuerzos que provocan la deformación y la pérdida de la estabilidad dimensional. Quien quiera que se encuentre entrañado en el labrado de metales, ya sean fabricantes de aceros, de máquinas herramientas o de matrices de fundición, puede experimentar problemas con la retención de tolerancias dimensionales en la producción de sus piezas.

La definición técnica de esfuerzos residuales es cualquier esfuerzo en un cuerpo elástico que se encuentre libre de fuerzas o restricciones externas y de cambios o gradientes de temperatura. Una causa común de los esfuerzos residuales es una incompatibilidad entre las regiones adyacentes del metal lo que puede deformar las regiones inmediatas.

Los esfuerzos, cuando no son iguales, pueden ocasionar deformaciones en los metales. Grandes esfuerzos por un lado de una pieza metálica provocarán movimiento o deformación. Si los esfuerzos son iguales a través de todo el metal, incluso los grandes esfuerzos no provocarán movimiento. Cuanto mayor sea el desequilibrio de los esfuerzos, mayor será el movimiento. Si el desequilibrio es lo suficientemente grande, los granos se deforman permanentemente y el alivio de los esfuerzos residuales no puede devolver la pieza que se está trabajando a su condición anterior.

En los esfuerzos residuales hay dos componentes: tensión y compresión. Las leyes de la Física y las Matemáticas exigen un equilibrio entre la magnitud de compresión y la de tensión. Desafortunadamente, el labrado de metales no produce un equilibrio uniforme.

En el campo del labrado de metales, la meta es producir un buen componente metálico o una estructura con bajos esfuerzos residuales. Esto por lo tanto requiere un programa para el alivio o la reducción de los esfuerzos residuales con el fin de evitarle daños al metal.

Una explicación más sencilla tiene relación con usted y su cuerpo durante las actividades deportivas. Si juega al tenis y sufre un calambre muy fuerte, o una distensión muscular en una pierna, esto es semejante a los esfuerzos residuales. Luego, si usted continúa jugando sin reducir el esfuerzo residual (el calambre o la distensión muscular), usted podría dañar su músculo en carácter agudo o permanente. Si por el contrario, usted se hiciera masajes en el músculo y permitiera su relajamiento, usted podría continuar jugando y terminar el partido. Éste es un ejemplo de un programa de alivio de esfuerzos residuales.

Los esfuerzos residuales se introducen en muchas estructuras y componentes metálicos durante su fabricación. Por ejemplo, esto ocurre en las piezas fundidas a través de las fuerzas de contracción establecidas dentro de la pieza fundida a medida que se solidifica; al conformar metales esto ocurre debido a

las características elásticas del metal; al cortar metales esto ocurre debido a la acción de corte que viene acompañada de una deformación; y el soldeo puede producir esfuerzos residuales especialmente agudos debidos a la expansión y contracción de los metales que resultan de los cambios de temperatura.

Los esfuerzos residuales —a pesar de lo difíciles que son de calcular y medir— si se dejan sin tratamiento se pueden manifestar por sí mismos a través del tiempo en una variedad de formas indeseables, provocando frecuentemente la debilidad y el agrietamiento prematuro de las piezas, su deformación o torcedura y con frecuencia debilitando la integridad de las soldaduras clave. Esto conduce a una reducción en la duración útil de los componentes que, aparte de esto, han sido bien fabricados. Los estrictos requisitos de tolerancias actuales están haciendo cada vez más importante la necesidad de poseer un alivio de esfuerzos residuales, con el fin de lograr una estabilidad dimensional y una ausencia de deformaciones.

## **TRATAMIENTO DE LOS ESFUERZOS RESIDUALES**

Para tratar la estructura de la red cristalina, hay que introducir energía dentro del metal para permitir que los átomos se muevan de tal forma que puedan reducir estos esfuerzos. El método térmico de alivio de esfuerzos es de conocimiento general y no es el único capaz de reducir los esfuerzos residuales.

En el proceso térmico, las temperaturas altas producen bajos esfuerzos residuales. Este tipo de alivio de esfuerzos, aunque generalmente resulta 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, lo que puede ser ocasionado por el uso del medio de calentar erróneo, el mantenimiento de la temperatura y el enfriamiento final. Su uso también está limitado a estructuras homogéneas. El fabricante también puede experimentar otros gastos indirectos si el horno adecuado no está disponible en el lugar, con lo cual se añaden los consiguientes gastos de transporte y manipulación así como las pérdidas adicionales de tiempo.

Por añadidura, muchos dentro de la industria metalúrgica han expresado sus deseos de disponer de instalaciones para reducir los esfuerzos, según se necesiten, durante el proceso de fabricación. Esto puede ocasionar gastos prohibitivos y puede que sea lógicamente imposible de conseguir si se utiliza el proceso de alivio térmico de esfuerzos.

A una pieza se le pueden aliviar los esfuerzos dejándola en reposo al exterior para que alivie sus tensiones internas. De esta forma, la energía necesaria para realinear la estructura de la red cristalina se suministra a través de los pequeños movimientos naturales y las fluctuaciones normales de las temperaturas. Sin embargo, este proceso es incontrolable y resulta difícil determinar en que momento los esfuerzos han sido reducidos suficientemente como para que el trabajo progrese en forma satisfactoria. Además, en este proceso de envejecimiento el nivel de esfuerzos residuales se reduce más rápidamente durante los períodos de clima caluroso y menos durante los períodos de clima frío. ¿Quien puede esperar durante un año o más para que se disipen las tensiones?

El método vibratorio introduce energía dentro de la pieza que se está trabajando mediante vibraciones. Para la red de átomos con tensiones, no existe diferencia entre la energía térmica y la energía introducida mediante vibraciones. Esta energía

aplicada vuelve a poner en línea la red para aliviar los esfuerzos y estabilizar la pieza sin sufrir deformaciones.

Este proceso se puede usar para aliviar los esfuerzos residuales provocados por las labores de maquinado, fresado, rectificado, troquelado, escariado, estampado, perforado, cepillado, cizallamiento, forjadura y soldadura. Es particularmente útil para estructuras muy grandes donde sería muy costoso o prácticamente imposible el alivio térmico de los esfuerzos y para piezas maquinadas a precisión, para la eliminación de las deformaciones metálicas que pondrían poner en peligro la retención de las tolerancias críticas.

## **EQUIPO Y PROCESO VIBRATORIO PARA EL ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES DE LA "FORMULA 62"**

La compañía Stress Relief Engineering Company primeramente desarrolló y durante más de 35 años refinó el uso de un método de alivio vibratorio de los esfuerzos residuales —muy efectivo y sin calor— basado en la resonancia de vibraciones. La "FORMULA 62" se ha convertido ahora en una norma ampliamente aceptada por la industria, cuyo proceso, fácil de usar, hace posible mejorar el control dimensional y aumenta el límite elástico sin producir ninguna pérdida en la resistencia a la fatiga.

El proceso de la "FORMULA 62" introduce vibraciones de baja frecuencia y alta amplitud durante un breve período de tiempo basado en el peso de la pieza a trabajarse. Este proceso alivia los esfuerzos residuales en piezas de metal y piezas soldadas sin deformar o modificar la resistencia a la tracción, el límite elástico o la resistencia a la fatiga en la pieza del caso. Esto permite la reducción de los esfuerzos residuales hasta un nivel mucho menor, donde se restaura el equilibrio estático.

Se ha encontrado que las vibraciones resonantes son el método más efectivo para reducir los esfuerzos residuales por medio de vibraciones. El método de vibraciones de frecuencias resonantes produce una redistribución de esfuerzos más pronunciada comparada con los métodos de frecuencias subresonantes o subarmónicas. Las vibraciones de baja frecuencia son realmente las portadoras de energía de gran amplitud y son muy eficientes en la reducción significativa de los picos de esfuerzos residuales en las piezas fabricadas en metal y en las construcciones de componentes soldados.

## **APLICACIÓN DE LA "FORMULA 62"**

La "FORMULA 62" consta de un vibrador —para trabajo riguroso y de velocidad variable que se sujeta a la pieza del caso— y de una consola electrónica encajada dentro de un gabinete portátil que se puede rodar a cualquier parte del piso de producción.

Igualmente sujeto a la pieza del caso hay un acelerómetro que detecta las vibraciones y transmite una señal por medio de un cable, a un circuito electrónico que se encuentra dentro de la consola. El punto de resonancia de la pieza de trabajo queda entonces determinado y se exhibe en el instrumento medidor que está montado en un panel. En una unidad registradora de gráficas, se puede producir una gráfica mostrando el procedimiento de ajuste mientras se establece el punto de resonancia.

El punto de resonancia se puede determinar variando la velocidad del vibrador hasta alcanzar la amplitud deseada. Dos minutos es el tiempo promedio que se necesita para alcanzar la frecuencia de resonancia. Una vez alcanzada la frecuencia de resonancia, se vibra la pieza que se está trabajando por un período de tiempo basado en el peso de la pieza por cada aplicación. El tiempo de tratamiento puede variar entre 10 minutos y una hora, o más, según sea el tamaño de la pieza en cuestión. En estructuras muy grandes, muy largas, o del tipo de bastidor abierto al aire libre, puede que sea necesario aplicar la "FORMULA 62" en varios lugares, lo cual demanda mayor tiempo. Las piezas pueden vibrarse durante períodos de tiempo más largos sin que sufran daños por fatiga o pérdida de su resistencia a la tensión.

La "FORMULA 62" también se puede hacer funcionar en la modalidad automática en la cual la unidad vibradora trabajará durante 15 minutos en tres ciclos distintos de velocidad seleccionada, cada ciclo por cinco minutos. Esto es suficiente para estabilizar una pieza hasta de 10 toneladas de peso. Para piezas de peso mayor de 10 toneladas, se podrá usar dos períodos consecutivos de 15 minutos cada uno.

Dos reglas sencillas que deberán observarse en todas las aplicaciones son:

- ◆ aislar la pieza tanto como sea posible para dejarla en libertad de vibrar;
- ◆ la unidad vibradora debe estar directamente conectada a la pieza para poder transferir totalmente la energía de las vibraciones a la pieza del caso.

El proceso de la "FORMULA 62" se puede usar en una amplia variedad de metales ferrosos y no ferrosos, incluyendo aceros al carbono, aceros inoxidable, aluminio, hierro fundido, manganeso y en una amplia gama de formas. Los tamaños abarcan desde las pequeñas piezas fundidas, ejes y engranajes hasta grandes construcciones soldadas o maquinadas que por su tamaño resultan demasiado grandes para el tratamiento térmico.

Para piezas pequeñas, piezas de precisión y fundiciones de contornos irregulares y soldaduras, SRE suministra la Mesa vibradora "Loadmaster 2000". La mesa dispone de una suspensión neumática totalmente ajustable, que le ofrece un excelente aislamiento y que trabaja con el suministro de aire de cualquier taller. La mesa vibradora hace posible el alivio de esfuerzos residuales en moldes, juegos de matrices, pequeñas piezas diseñadas a precisión y para el tratamiento de numerosas piezas, todas de una vez.

### **LIMITACIONES DE LA "FORMULA 62"**

El proceso de vibraciones para alivios de esfuerzos residuales de la "FORMULA 62" tiene sus limitaciones, como cualquier proceso de labrado metálico. La "FORMULA 62" no tiene tanta efectividad en materiales laminados en frío, extruidos, endurecidos por deformación plástica, trabajados en frío y materiales endurecidos por solidificación de una fase. Artículos muy pequeños en grandes cantidades se podrían tratar térmicamente con mayor facilidad en lotes, a menos que el proceso térmico por sí mismo dañase las piezas del caso. El proceso vibratorio se usa únicamente para aliviar los esfuerzos residuales en metales y no recoce, normaliza, atempera ni reemplaza ningún otro tipo de tratamiento térmico (incluyendo el tratamiento térmico posterior al soldeo). El proceso de vibración no cambia las propiedades

mecánicas o metalúrgicas del material. Finalmente, la "FORMULA 62" no puede evitar o eliminar deformaciones, pandeos o combaduras debidos a los efectos del calor y no alisará ni enderezará materiales combados, deformados o pandeados.

Una de las ventajas más destacadas del uso de la "FORMULA 62", es la capacidad de aliviar los esfuerzos de las piezas en cualquier punto de su etapa de fabricación como por ejemplo después del desbastado, el perforado o el rectificado.

Para construcciones soldadas, el alivio de los esfuerzos se puede realizar durante la soldadura lo que es de gran ayuda en la prevención de la acumulación de esfuerzos residuales que pueden provocar la quebradura de la soldadura o la deformación de algunas secciones. La "FORMULA 62" tiene mayor compatibilidad con los procesos de soldadura SMAW, GMA y GTAW. Otras prácticas de soldadura pueden presentar formidables problemas de logística.

En vista de que la soldadura produce cambios de temperatura en períodos de tiempo relativamente cortos, los esfuerzos residuales están activos en forma más dinámica en la pieza lo que podría requerir el alivio de esfuerzos cuando se la está soldando o inmediatamente después de soldarla. En vista de que los esfuerzos de tracción residuales de gran magnitud pueden reducir la resistencia a la fatiga de las piezas soldadas, la "FORMULA 62" se puede usar fácilmente para aliviar los esfuerzos en estas piezas.

### **DETERMINACIÓN DEL ALIVIO DE ESFUERZOS**

Una pregunta básica surge con frecuencia sobre cómo se puede determinar cuándo se han reducido los esfuerzos. La evaluación de los campos de esfuerzos residuales después de tratamientos, bien sean por métodos térmicos o vibratorios, es igualmente difícil y costosa.

Uno de los mejores métodos para medir los esfuerzos residuales es el método de difracción de rayos-X, el cual generalmente se reserva para uso en laboratorios debido a los requisitos de alineamiento necesarios para obtener una medición precisa.

Los campos de esfuerzos residuales son complejos y abarcan un área bastante extensa. Dentro del área de observación, existen esfuerzos residuales tanto de tracción como de compresión, con variadas magnitudes. Un proceso de alivio de esfuerzos residuales produce una redistribución de estos niveles de esfuerzos con el fin de equilibrar la energía de los esfuerzos entre las zonas de tensión y compresión, restaurando el equilibrio a la región.

Por lo tanto, uno no puede medir solamente un punto en una estructura, observar un valor y declarar que la pieza está aliviada de esfuerzos residuales. Antes de que los resultados sean aceptados como obvios, se necesitaría hacer extensos mapas de un campo y realizar el promedio estadístico de los resultados. Por esta razón, no se hacen mediciones de puntos únicos o de otra índole en piezas aliviadas de esfuerzos residuales mediante los procesos térmicos o vibratorios antes o después del tratamiento.

Sencillamente, no existe una forma ni sencilla ni económica para medir esfuerzos después de ningún proceso de tratamiento. A lo más, uno solamente puede confiar en observar y seguir correctamente el tratamiento, bien sea a tantos grados por hora por pulgada de espesor como en el proceso térmico, o tantos minutos de vibraciones basados en

el peso de la pieza cuando se utilice el método de vibraciones. Los resultados del uso de cualquiera de los dos métodos serán satisfactorios cuando se siga correctamente el método.

En vista de que la estabilidad dimensional generalmente resulta ser el factor determinante para su aceptación, las piezas que retienen su estabilidad dimensional después del tratamiento se consideran que están satisfactoriamente aliviadas de esfuerzos residuales.

## **CLARIFICACIÓN DEL CÓDIGO PARA ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES POR LOS MÉTODOS TÉRMICOS Y DE VIBRACIONES**

En vista de que la temperatura alta puede dañar gravemente los metales, se necesita controlarla y aplicarla hasta el punto que se conoce como la temperatura crítica, donde se producen las transformaciones de fase y otros cambios metalúrgicos indeseables. Ésta es la base de la existencia de un código: ir suficientemente al máximo pero —regulando la temperatura aplicada— sin ocasionar daños. Distintos materiales requieren distintas temperaturas. Diferentes espesores requieren diferentes períodos de saturación térmica. En el fondo, la receta se manipula de forma de no dañar los artículos.

Como los tratamientos térmicos pueden ser a veces arbitrarios y caprichosos, no es inusual que algunos tratamientos térmicos se conduzcan a la mitad ó 3/4 partes de la temperatura real indicada debido al temor de dañar la pieza. Además, como es habitualmente el caso, el tratamiento térmico se especifica solamente una vez durante la cadena de eventos de fabricación lo que no toma en cuenta la acumulación de esfuerzos que se producen durante la fabricación, lo cual acontece mucho antes de llevar a cabo el tratamiento térmico.

Por lo tanto, los tratamientos térmicos para alivio de esfuerzos residuales controlados por un código no tienen una característica absoluta que se pudiera utilizar para realizar comparaciones con otros métodos de alivio de esfuerzos. El detalle que se ofrece realmente en los manuales de especificaciones del código es vago y llega hasta el punto de no recomendar calor para ciertos tipos y grados de materiales. Por ejemplo: AWS D1.1 no recomienda el tratamiento térmico de A514, A517, A709 o material del Grado 100. Otros aceros al carbono o de baja aleación pueden sufrir cambios indeseables en su microestructura provocando una deformación de las propiedades mecánicas, agrietamiento o ambos. Se deben tener en consideración en forma adicional la posible deformación, oxidación, pérdida de la resistencia a la corrosión o el agrietamiento intergranular.

En muchas ocasiones, los alivios de esfuerzos por vibraciones se pueden usar como sustitución económicamente de mayor efectividad con respecto al método térmico cuando el proceso térmico solamente se utiliza para promover la estabilidad dimensional de la pieza para fines de alineamiento, integridad de superficie o condiciones de servicio.

Debido a la cantidad de factores involucrados, el alivio vibratorio y no térmico de los esfuerzos residuales de la "FORMULA 62", no está diseñado para ser un sustituto general de los requisitos del código. Antes de que uno pueda decidir si el alivio de esfuerzos residuales por el método de vibraciones se puede emplear en sustitución del tratamiento térmico para alivio de esfuerzos, se deberán tomar en consideración los aspectos siguientes:

1. Si el uso del proceso térmico es necesario o no para reducir los esfuerzos residuales a su menor nivel posible y para homogenizar el metal de base y del metal de la soldadura.
2. Si el proceso térmico fue seleccionado o no por ninguna otra razón fuera del hecho de que ¡así es como siempre se ha hecho!
3. O, no se hacen alivios de esfuerzos residuales debido al temor de dañar potencialmente el material o las condiciones de su superficie lo cual sería el caso del proceso térmico.

Las dos últimas situaciones ofrecen una clara oportunidad para el uso del método vibratorio en lugar del calor. Este método proporcionaría una solución más económica al comparar sus costos con los costos directos e indirectos del proceso térmico.

En los EE.UU. se está haciendo actualmente más común el encontrar varias recomendaciones relativas al uso de un método para el alivio de esfuerzos. En las especificaciones redactadas por algunas agencias gubernamentales de los EE.UU., se encontrarán referencias para aliviar esfuerzos de algunos componentes según la Sección VIII, A.W.S. D.1.1 de la A.S.M.E (Asociación de Ingenieros Mecánicos de EE.UU.) y otros a ser tratados específicamente con la "FORMULA 62". Algunas especificaciones contienen realmente el nombre de marca del producto "FORMULA 62" y el nombre de la compañía Stress Relief Engineering Co. como su fuente. Ejemplo: las especificaciones del Ministerio del Interior de los EE.UU. (U.S. Department of the Interior) para compuertas de represas y otros componentes.

En conclusión, "FORMULA 62" no está diseñado para ser un sustituto en todas las prácticas térmicas de "alivio de esfuerzos", aunque frecuentemente está aprobado para sustituir el método térmico a elección por parte del fabricante de la pieza. En algunos casos, se recomienda encarecidamente el uso del método térmico y la compañía Stress Relief Engineering Company recomienda enfáticamente el uso del método térmico para el caso de aplicaciones nucleares, recipientes a presión, generación de energía y aplicaciones petroquímicas. En estos casos, los beneficios sobrepasan a los costos. Sin embargo, en los códigos no hay nada que impida que un fabricante haga uso del método vibratorio para alivio de esfuerzos cuando la estabilidad dimensional es un aspecto importante siempre que las prescripciones del código sean observadas y ejecutadas debidamente.



STRESS RELIEF ENGINEERING COMPANY

Exclusive Export Manager:

**Dreyfus**  
GLOBAL TRADE, LLC.

Dreyfus Global Trade, LLC  
521 Fifth Avenue, Suite 2130  
New York, NY 10175 USA  
Telephone: +1 212 867 7700  
Telefax: +1 212 867 7820  
Email: [info@dreyfusglobal.com](mailto:info@dreyfusglobal.com)