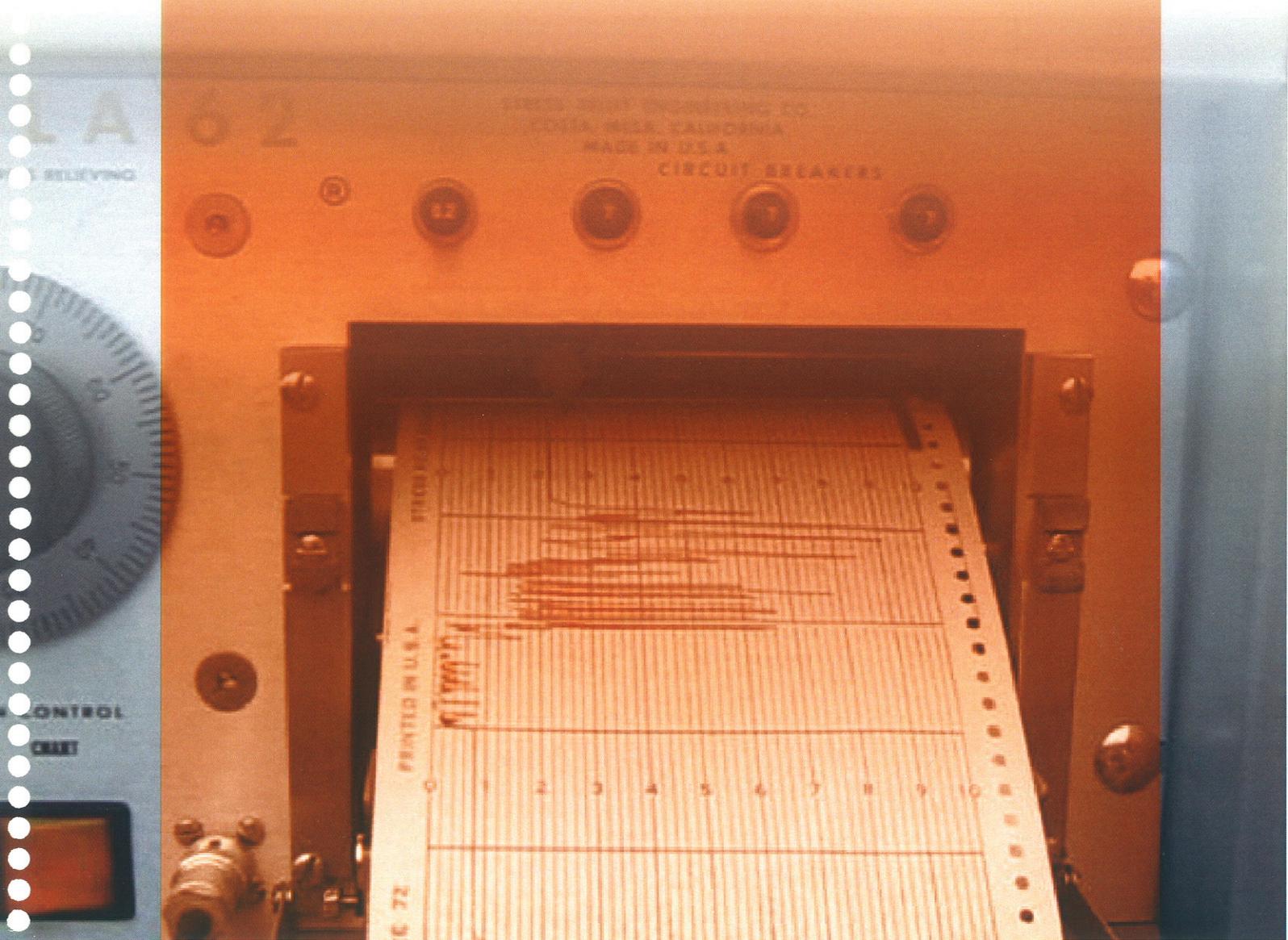


Ripool



Ripol

The logo for Ripol features the word "Ripol" in a bold, orange, sans-serif font. The letter "o" is replaced by a stylized gear with a blue-to-white gradient and a 3D effect. The letter "l" is a solid orange vertical bar.

DOSSIER TÉCNICO

“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.
- e Los costos de inversión, funcionamiento y mantenimiento son bajos.
- e 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
- e 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.)
- e 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

DEFINICIÓN DE ESFUERZOS RESIDUALES

Uno de los principales problemas que enfrenta la industria labrado de metales es la acumulación de esfuerzos que provocan la deformación y la pérdida de la estabilidad dimensional. Quien quiera que se encuentre entañado 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 temperatura. Una causa común de los esfuerzos residuales una incompatibilidad entre las regiones adyacentes del metal 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 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 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. ¿Quién 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 comparado 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 dañe 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 sopleo). 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 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" mayor compatibilidad con los procesos de soldadura SMA GMA y GTAW. Otras prácticas de soldadura pueden presentar formidables problemas de logística.

En vista de que la soldadura produce cambios de temperan en períodos de tiempo relativamente cortos, los esfuerzos residuales están activos en forma más dinámica en la pieza 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 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 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 basado

el pelo 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. 0, 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.

Rip  **L**

Medición de la relajación de tensiones inducida por vibraciones en la industria de estructuras soldadas de grandes dimensiones

REFERENCIA:

Ohol, R. D. Nagendra Kumar, B. V. & Noras, R. A.: "Measurement of Vibration-Induced Stress Relief in the Heavy Fabrication Industry," *Mechanical Relaxation of Residual Stresses. ASTM STP 993*. L. Mordfin, Ed. American Society of Testing and Materials. Philadelphia. 1988, pp. 45-57.

RESUMEN:

El uso de vibraciones mecánicas para relajar tensiones residuales en componentes de ingeniería está aumentando cada vez más, mientras que, por su parte, están apareciendo en el mercado varios sistemas de acondicionamiento por vibraciones. Cuando se tuvo en cuenta esta técnica para el tratamiento de estructuras soldadas en Larsen & Toubro Ltd., se efectuaron mediciones de las tensiones residuales con el fin de determinar la eficacia de dicho tratamiento. Se aplicaron vibraciones a una estructura de bancada mediante un equipo vibrador de frecuencia variable disponible en el mercado. Se midieron las tensiones residuales cerca de un área de soldadura en la estructura, antes y después de la aplicación de dicho tratamiento, detectándose una relajación de tensiones de entre un 30 a un 57%. Durante el tratamiento por vibraciones, se realizó un control de las deformaciones superficiales: en el caso de resonancia, la amplitud de la deformación superficial aplicada registró unos valores de aprox. 600 microesfuerzos. Tras el mecanizado, la bancada presentó una buena estabilidad en sus dimensiones. Por otro lado, se fabricó un conjunto en forma de cuba de acero inoxidable, con camisas de enfriamiento de acero al carbono. La cuba estaba formada por grandes estructuras soldadas que no podían someterse a relajación de tensiones por métodos térmicos antes de su mecanización. Se aplicaron vibraciones a la cuba, satisfaciéndose los estrictos requisitos de tolerancias. Ambos componentes han sido instalados en sus respectivas ubicaciones, manteniendo su estabilidad dimensional.

PALABRAS CLAVE: *juntas soldadas. tensiones residuales. vibraciones. acondicionamiento por vibraciones. relajación de tensiones. medición de tensiones*

INTRODUCCIÓN

A menudo, los procesos de fabricación como la fundición, la soldadura y el mecanizado conllevan una acumulación de tensiones residuales en los elementos sometidos a los mismos. Es necesario relajar estas tensiones residuales ya que se pueden sumar a las tensiones derivadas de las respectivas aplicaciones, y pueden producir un aumento en la susceptibilidad de los componentes con respecto a la rotura por fragilidad, a la corrosión acelerada o al agrietamiento por corrosión inducida por tensiones. Las tensiones residuales pueden causar una distorsión inaceptable en componentes estructurales como son bastidores y bancadas, registrándose, por ejemplo, casos de estructuras soldadas sin atirantar que se han visto sometidas a fuertes distorsiones debidas a contracciones en la soldadura [1]. El enfriamiento no uniforme de grandes piezas de fundición ha producido niveles elevados de tensiones residuales: cuando se sometieron a procesos de mecanizado, estos elementos de fundición a menudo experimentan variaciones en su forma, a medida que se elimina el material que presentaba tensiones.

Sin embargo, no se pueden encontrar fácilmente unas líneas de actuación claras con respecto a cuál es el nivel seguro y permisible de tensiones residuales. Se prevén dos tipos de condiciones externas de funcionamiento o requisitos:

Estabilidad dimensional durante periodos prolongados: Como se ha podido comprobar tras una serie de estudios sobre los efectos de la degradación a la intemperie de piezas de fundición gris, basta una reducción de aprox. 10% de las tensiones internas para asegurar la estabilidad de la forma externa [2].

Carga cíclica o corrosión: Las tensiones traccionales residuales deberían reducirse hasta alcanzar un nivel tan bajo como sea posible. En las estructuras soldadas, se considera aceptable una reducción mínima del 80% [3].

Generalmente, se someten los Componentes de ingeniería a procesos de relajación de tensiones por medios térmicos. Para que se reduzca su resistencia a la tracción hasta niveles muy bajos, solamente es necesario que se produzca incremento suficiente en la temperatura; y así, a temperaturas de aproximadamente 600 °C, la resistencia a la tracción de la mayoría de los aceros es de tan sólo 10 MPa, lo que supone aproximadamente un 5% de su resistencia a temperatura ambiente. Todas las tensiones internas que superen este bajo nivel se relajan por deformación plástica. Mantener de forma prolongada estas temperaturas de relajación de tensiones produce aún más reducción de las tensiones residuales debido a la cedencia en función del tiempo. En el caso de aceros, se elimina entre un 60 y un 85% de todas las tensiones al mantener las estructuras a temperaturas entre 510 y 570 °C (975-1083 °F) durante una hora [2], siendo necesario un enfriamiento lento a temperatura ambiente con el fin de evitar que se generen tensiones residuales debidas a la distribución no uniforme de temperaturas.

Relajación de tensiones por medios mecánicos

Se puede alcanzar el objetivo de la relajación de tensiones mediante deformación plástica a temperatura ambiente si se superpone una tensión aplicada externamente al campo de tensiones residuales. La tensión aplicada debe ser de tal magnitud que la suma algebraica de las dos tensiones combinadas supere la resistencia a la tracción a temperatura ambiente del material, con lo que se produce deformación plástica. Cuando se eliminan las tensiones aplicadas externamente, el nivel de tensiones residuales se reducirá. Este mecanismo es la base de la relajación de tensiones por vibraciones o procesos vibratorios de acondicionamiento.

Las estructuras de ingeniería reales presentan complejidad en los campos de tensiones internas. Es difícil aplicar cargas que sean lo suficientemente grandes como para crear tensiones efectivas de cara a una posible relajación de las mismas. Para ser efectivas, es necesario aplicar estas cargas en puntos elegidos de forma muy cuidadosa. Debido a que los grandes desplazamientos y deformaciones son la consecuencia de una estructura que presenta resonancia cuando se ve sometida a la influencia de una fuerza variable en el tiempo de pequeña magnitud, la vibración controlada se convierte en una solución correcta al problema de someter a cargas a estructuras con formas arbitrarias.

El acondicionamiento mediante vibraciones es un método eficaz en el tratamiento de estructuras fabricadas a partir de los siguientes materiales:

- Aceros inoxidables austeníticos: Aceros inoxidables en los que la precipitación de los carburos de cromo a las temperaturas del tratamiento térmico reduce su resistencia a la corrosión.
- = Metales desiguales: Distorsión debida a diferencias en los coeficientes de expansión térmica a temperaturas elevadas.
- = Aleaciones sometidas a cronoenvejecimiento: Aleaciones que pueden perder su resistencia a las temperaturas habituales de relajación de tensiones.

Conclusiones de las investigaciones

Muchos investigadores han estudiado el efecto de las vibraciones sobre las tensiones residuales en probetas de laboratorio así como en algunas estructuras soldadas. Las siguientes serían algunas consideraciones importantes que cabe tener en cuenta para una óptima aplicación de acondicionamiento por vibraciones:

- No es necesario eliminar por completo las tensiones residuales cuando lo más importante es el control de la distorsión [4,5].
- Es necesario visualizar las formas de modo de resonancia de la estructura para poder situar correctamente tanto los elementos de apoyo como el equipo de vibraciones. Se deberán excitar modos altos de vibración para general un campo de amplitud de deformación más uniforme [6].
- La amplitud de la deformación aplicada externamente debe superar un valor umbral para que se produzca relajación de tensiones [7,9,10]. Es posible obtener una gran reducción de las tensiones residuales [8,9].

Necesidad de efectuar mediciones de la relajación de tensiones residuales en las estructuras

Las conclusiones de las investigaciones demuestran la utilidad de los tratamientos que emplean vibraciones en el control de la distorsión en estructuras soldadas. En Larsen & Toubro Ltd., se fabrican varios tipos de componentes, desde maquinaria giratoria a recipientes a presión. En el caso de componentes pensados para su utilización como elementos rígidos y soportes, más que como recipientes de retención de presión, se considera que se puede tratar fácilmente, mediante métodos con vibraciones, la distorsión debida a la fabricación de grandes piezas y con metales desiguales.

El acondicionamiento por vibraciones utilizando equipos patentados está ganando aceptación tanto entre los diseñadores como entre los fabricantes. Aunque el tratamiento está pensado en un principio para la estabilización de la forma de las estructuras, a menudo se evalúa la eficacia de cualquier tratamiento midiendo el grado de relajación de tensiones obtenido y comparándolo con el que se obtiene por medios térmicos. Los siguientes apartados de este artículo versan sobre el programa puesto en marcha a este respecto por la empresa Larsen & Toubro Ltd., de Bombay.

Técnica de medición de tensiones residuales

Para la medición de las tensiones residuales, se eligió el método que emplea un extensímetro con perforación de orificios descrito en la norma ASTM E 837-85 (Método Estándar para la Determinación de Tensiones Residuales mediante Extensímetro con Perforación de Orificios). Las causas que condujeron a dicha elección fueron las siguientes:

- Facilidades en las mediciones *in-situ*.
- Disponibilidad de equipos precisos de extensímetros

Montados sobre la superficie del componente en cuestión, los extensímetros registran la re-alineación de la superficie cuando se elimina, mediante taladrado, un pequeño volumen (1,59 mm de diámetro por 1,59 de profundidad) del componente sometido a tensiones. El uso de una ⁹alga de roseta permitió la determinación de la orientación de los ejes de las tensiones principales así como su magnitud.

Antes de que se utilizara el método de extensímetro con perforación de orificios sobre una estructura de ingeniería, este método era empleado en la medición de tensiones en una probeta de ensayo (*Figura 1*). La fijación en el extremo partido del anillo permitía conocer los niveles de las tensiones a desarrollar. La probeta en forma de anillo estaba fabricada con chapa de acero de calidad estructural (IS:226) (Norma IS para Acero Estructural (Calidad Estándar) IS:226-75), con las siguientes propiedades:

- Contenido de carbono = 0.23 %. máximo
- Límite elástico = 255 MPa. mínimo
- Carga de rotura traccional = 410 – 530 MPa. y
- Elongación = 23 %, mínimo

Se montó una galga para medir tensiones residuales (Tipo EA-06-062RE-120 de fotoelastic Inc., USA) en el punto que aparece en la *figura 1*. Se efectuó una alineación de los elementos 1 y 3 de la galga de tal forma que fueran radial y tangencial, respectivamente, en relación con el centro del anillo. También se empleó un circuito trifilar de compensación de temperatura en la conexión de las galgas al equipo, tal y como viene determinado en la Norma ASTM E 837-85. Se comprobó el aislamiento de las galgas con respecto al suelo. Para efectuar la perforación de los orificios, se empleó una guía de fresado modelo RS-200 (Photoplastic Inc., USA), alineando con un microscopio el centro de la herramienta. Se practicó un agujero ciego de 1,59 mm de diámetro por 1,59 mm de profundidad con una fresa radial accionada por una máquina taladradora eléctrica de velocidad variable [11]. La proporción D/D_0

de, aproximadamente, 3. valor éste que está dentro del rango especificado en la Norma ASTM E 837-85, y, utilizando las ecuaciones que aparecen en dicha norma, se calcularon las tensiones principales a partir de la variación medida de la deformación.

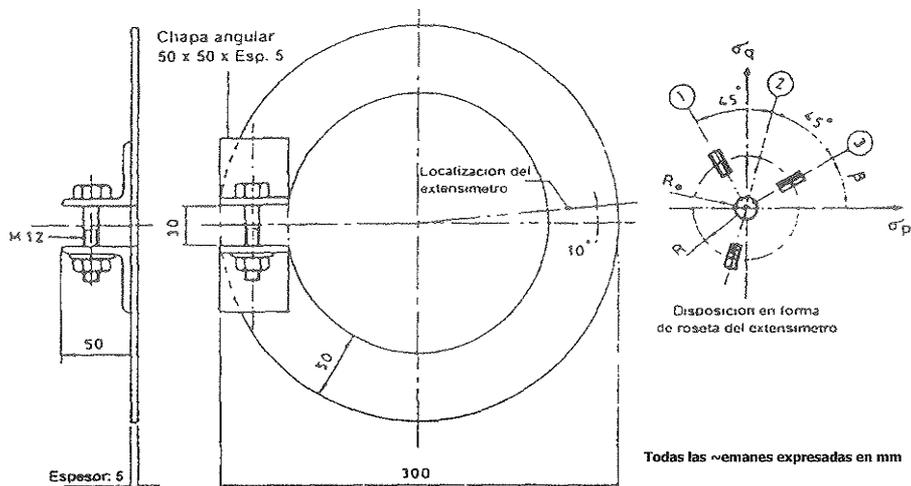


Figura 1: Anillo de prueba para técnica de evaluación con perforación de orificio.

Numero de elementos = 72
Numero de nodos = 185



Figura 2: Modelo de elementos finitos de la probeta en forma de anillo.

Asimismo, se determinó numéricamente la distribución de tensiones en el anillo mediante análisis por elementos finitos. Se

modeló la chapa utilizando elementos de tensión por planos tipo triángulo de deformaciones lineales (LST) de 6 nodos. En la *Figura 2* se puede observar el modelo FEM de

semi-simetría que incluye 72 elementos y 185 nodos. Como puede apreciarse en la *Figura 1*, el perno de carga está situado por encima del plano del anillo partido. En el análisis, no se tuvo en cuenta

cualquier posible efecto de combadura debido a esta disposición de carga.

En la *Figura 3*, aparecen los resultados del análisis, tanto los numéricos como los registrados por el extensímetro. La tensión tangencial medida se desvía en aproximadamente, un 10 % del resultado del análisis por elementos finitos. Se puede apreciar que la magnitud de las tensiones tangencial y radial es superior a los resultados numéricos. Dado que el extensímetro se situó en la región compresiva, es probable que la parasitación de los valores de tensión durante la operación de perforación haya producido estas imprecisiones.

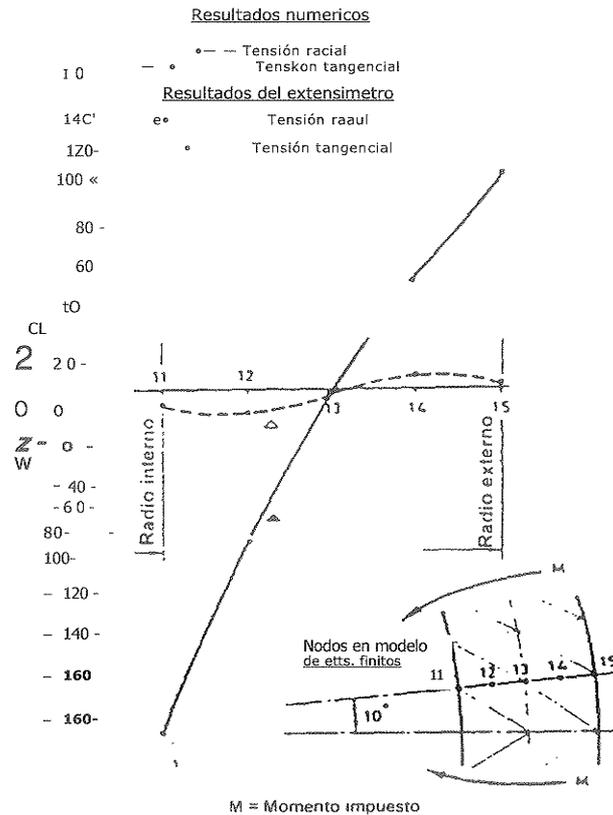


Figura 3: Tensiones previstas y medidas en el anillo de la prueba.

Medición de relajación de tensiones residuales sobre una estructura de ingeniería

Se construyó una bancada para una caja de engranajes de grandes dimensiones a instalar en un molino de una planta de cemento. Esta construcción se llevó a cabo soldando chapas en lugar de vigas de doble T y canales (*Figura 4*), de acero estructural soldable, según Norma IS sobre Aceros Estructurales Soldables IS:2062-69. Este tipo de acero tiene las siguientes propiedades:

- Composición:
C = 0.20 %. máximo
S, P = 0,055%, máximo
- Límite elástico = 235 MPa. mínimo
- Carga de rotura traccional = 410 – 530 MPa,
- Elongación = 23 %, mínimo
- Módulo elástico = 200 GPa. y
- Ratio de Poisson = 0.3

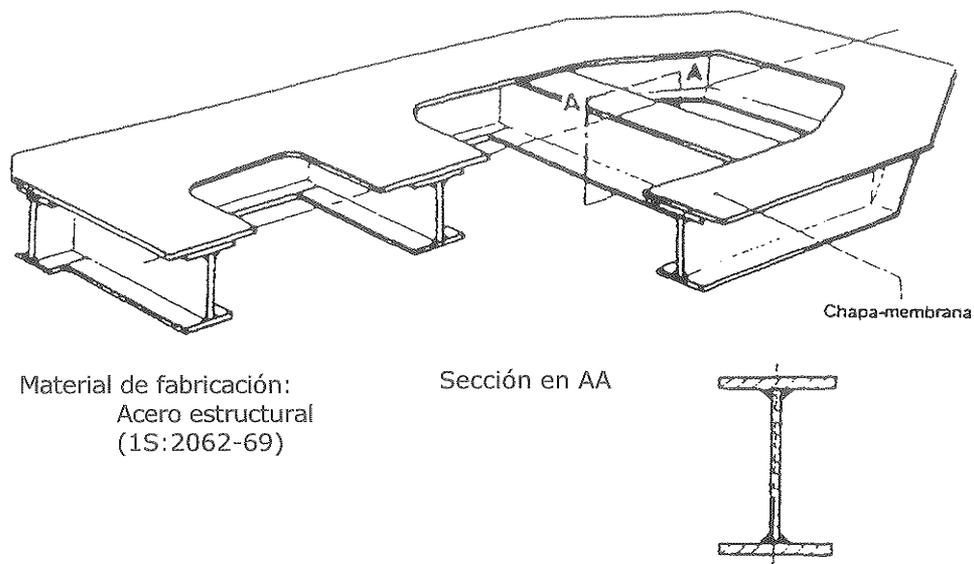


Figura 4: Estructura de bancada con vigas doble T soldadas

Se esperaba que la bancada experimentara distorsiones durante el mecanizado de la superficie de la cara superior. Aunque no era obligatorio, tanto las bancadas como otras grandes estructuras soldadas fabricadas por Larsen & Toubro habían sido sometidas a relajación de tensiones por medios térmicos, y, en este caso, se sugirió el acondicionamiento por vibraciones como una alternativa de menor coste.

DETALLES DE LOS EXPERIMENTOS REALIZADOS

Para verificar la eficacia de esta técnica, se estableció la realización de los siguientes experimentos:

1. Mediciones de las tensiones residuales antes del acondicionamiento por vibraciones.
2. Medición de deformaciones dinámicas durante el tratamiento utilizando un extensómetro separado conectado a los instrumentos del extensómetro dinámico.
3. Control de niveles de vibración durante el incremento monotónico a partir del estado de reposo de la frecuencia del vibrador, con el fin de poder identificar las frecuencias de resonancia.
4. Medición de tensiones residuales después del tratamiento de acondicionamiento por vibraciones.

La *Figura 5* representa una estructura de bancada en la que se puede ver la ubicación de los dos extensómetros para tensiones residuales (Serie EA-06-062RE-120 de Photoelastic Inc.) y la galga uniaxial, de 10 mm de longitud, empleados en la prueba. La experiencia previa, adquirida en la realización de mediciones de tensiones residuales en regiones sometidas a tensiones residuales de tipo compresivo, permitieron situar los extensómetros de tal forma que estuvieran emplazados en una región de tensiones de tipo traccional. Se eligió el miembro transversal no cubierto por la chapa de la membrana para emplazar las galgas. Los estudios sobre tensiones residuales en juntas en forma de T [2] hacían suponer que las tensiones en el punto elegido serían de tipo traccional.

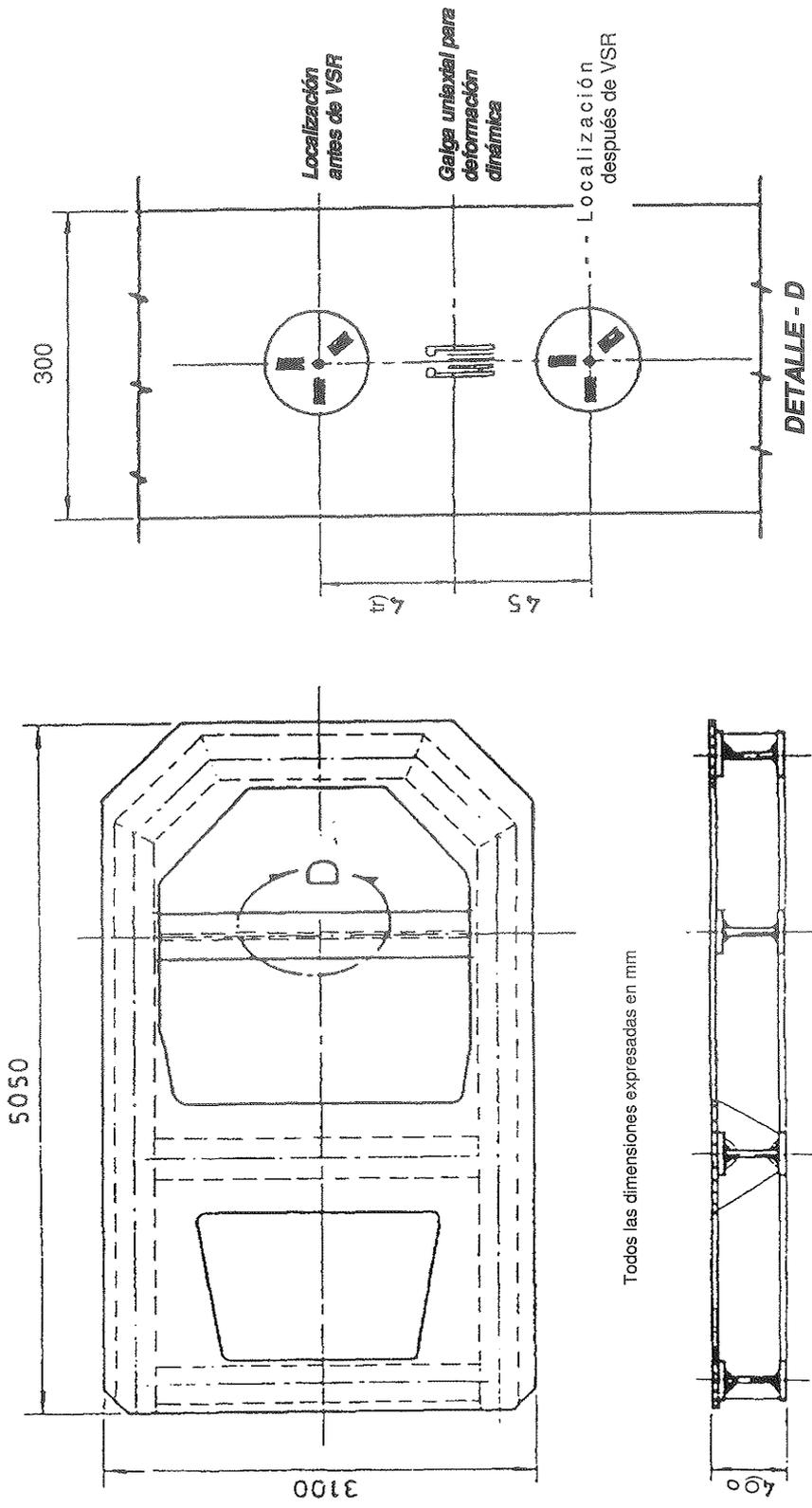


Figura 5 Localización de extensímetros en la bancada.

Para este tratamiento, se emplearon equipos de vibraciones disponibles en el mercado. El vibrador es un motor de corriente alterna con masas situadas excéntricamente con respecto de su eje. Existe cierta direccionalidad de la fuerza vibratoria en relación con el eje del motor del vibrador. Por consiguiente, se trató la estructura situando el vibrador tal y como aparece en la *Figura 6*. Se esperaba que la orientación del vibrador en el punto 1 produjera una excitación de los modos torsionales de vibración: que la orientación en el punto 2 excitara los modos de combadura de vibración de la bancada. La estructura se apoyaba sobre tacos de goma.

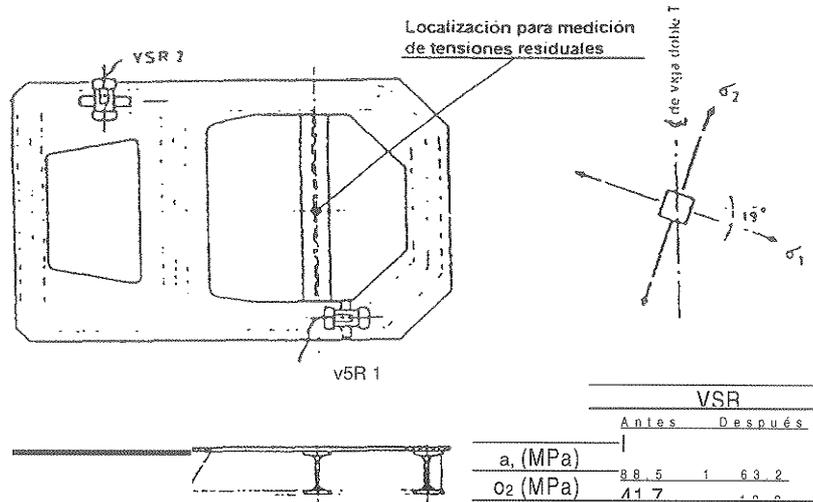


Figura 6: Tensiones residuales en la bancada.

Durante el tratamiento en el punto 1, la velocidad del vibrador varió continuamente, desde un estado de reposo hasta alcanzar 200 Hz. Se pudo apreciar (a partir del serrín sobre la estructura) que el vibrador se situaba próximo a un punto antinodo de la bancada sometida a vibraciones, y, consecuentemente, se desplazó el vibrador hasta una posición más próxima a un área nodal.

Se montó un acelerómetro sobre la bancada, lo que permitió determinar las frecuencias de resonancia. Con el vibrador situado sobre el punto 1, se observó que las frecuencias predominantes eran del orden de 90 Hz a 144 Hz. A cada una de estas frecuencias, se mantuvieron las vibraciones durante un periodo aproximado de 30 segundos. En el punto 2, las frecuencias para una vibración más extensa fueron de 112 y 164 Hz.

RESULTADOS

Se efectuaron las mediciones de las tensiones residuales antes y después del tratamiento con vibraciones. Se empleó una fresa radial de 1.59 mm de diámetro para practicar un agujero ciego con una profundidad de 1,59 mm. Una taladradora eléctrica accionó la fresa radial a baja velocidad, de tal forma que se minimizara el calentamiento en el punto en el que se situaba la galga. Tanto en la *Tabla 1* como en la *Figura 6*, aparecen los resultados obtenidos.

Parámetro	Tiempo de la medición	
	Antes del tratamiento	Después del tratamiento
Variación en la deformación (en microesfuerzos):		
E 1	-82	-66
E 2	-74	-59
ϵ_3	-10	5
Radio del orificio (en mm)	0.84	0.86
$r = (D/Do)$	3,06	2.99
Tensiones residuales (en MPa)		
σ_1	88.5	63.2
	41,7	18.2
Ángulo, beta (en grados)	19,0	19.6

Tabla 1: Resultados de las pruebas

Se puede observar que las direcciones de las tensiones principales, antes y después del tratamiento, son prácticamente las mismas. Como cabía esperar a partir del modelo de tensiones residuales de las juntas en forma de T con soldadura con cordón [2], las tensiones principales σ_1 , σ_2 son de tipo traccional y están orientadas aproximadamente en posición normal y en paralelo, respectivamente, en relación con el eje de la viga. La tensión normal al eje es mayor que σ_2 , y refleja el efecto de combadura sobre el ala debido a contracción en los puntos de soldadura con cordón.

La tensión residual σ_1 se redujo aproximadamente un 30 %, mientras que σ_2 , menor que σ_1 , se redujo aprox. un 57%. Aunque no se ha efectuado un análisis dinámico detallado de la bancada, es evidente que la viga sobre la que se han medido las tensiones experimenta combadura principalmente a lo largo de su dirección longitudinal, con lo que contribuye a la reducción de σ_2 . La reducción de σ_1 puede tener lugar solamente si se produce una elevada vibración en plano del ala de la viga: la relajación de tensiones total parece deberse a la redistribución que sigue a la relajación de tensiones en la dirección apropiada. A continuación, se mecanizó la bancada, registrándose una buena estabilidad dimensional.

Durante la resonancia, la galga uniaxial indicaba amplitudes de deformaciones dinámicas de aprox. 600 microesfuerzos. Tal y como sugiere Dawson [9], la amplitud de deformaciones superficiales es de suma importancia a la hora de determinar si se produjo relajación de tensiones residuales superficiales (*Figura 7*). En el caso del acero empleado en estas pruebas, la proporción entre la amplitud de deformación superficial y la deformación hasta rotura es, aproximadamente, de 0.5. Como puede verse en la *Figura 7*, se indica una reducción de las tensiones residuales superficiales en el punto de medición.

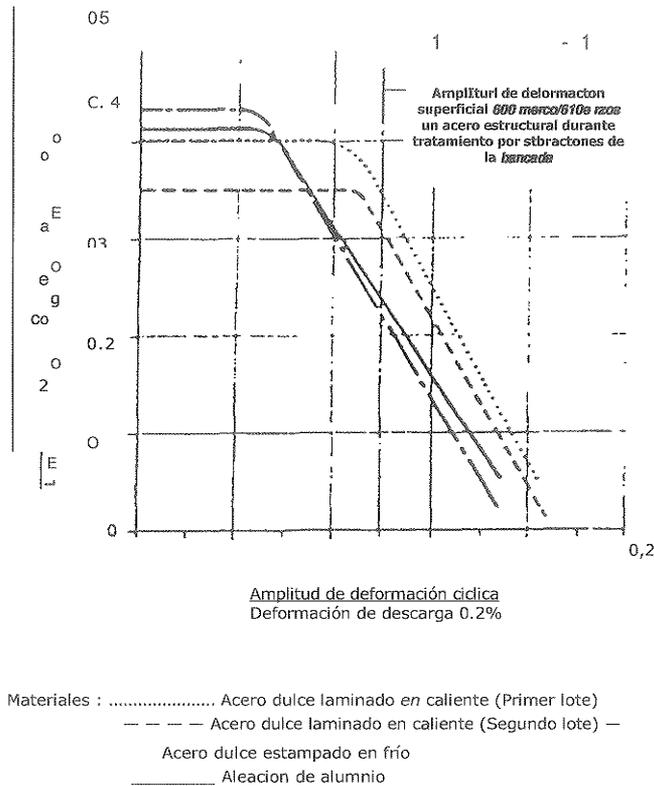


Figura 7: Curvas de reducción de tensiones residuales no dimensionalizadas

Tratamiento con vibraciones en una estructura de cuba

El conjunto estructural de cuba fabricado en las instalaciones de Larsen & Toubro está formado por una estructura soldada con camisa exterior (Figura 8). La cuba tiene una sección transversal circular, y tanto las paredes como el fondo estaban fabricados con chapa de acero inoxidable austenítico (Tipo 304). La pared presentaba varios elementos fijados de acero al carbono, como por ejemplo grandes bridas y orejetas para izar la cuba, y una camisa de refrigeración por agua. El fondo de la cuba estaba reforzado al haber sido apuntalado con barras de acero al carbono soldadas al mismo, y a una cabeza toriesférica, también de acero al carbono. Dado que en el interior de la cuba gira un agitador, era preciso que la cuba mantuviera unas tolerancias precisas en términos de circularidad. La composición variada de sus elementos imposibilitaba la aplicación de procesos de termorelajación de tensiones antes de proceder al mecanizado.

Se tomó la decisión de tratar la estructura fijándole un vibrador, primero a la pared y después a la base. La visualización de las formas ideales de modo de vibración de la pared indicaron que el vibrador debía orientarse en dos posiciones diferentes (Figura 9).

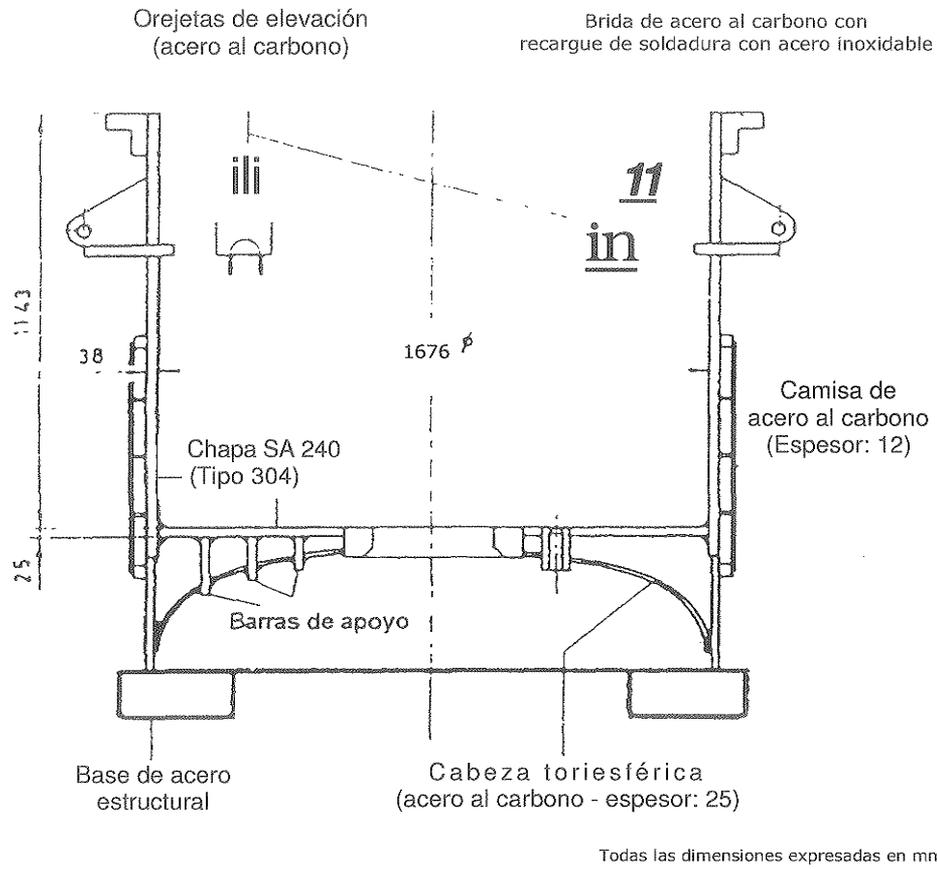


Figura 8: Conjunto de cuba formado por elementos fabricados con metales diversos.

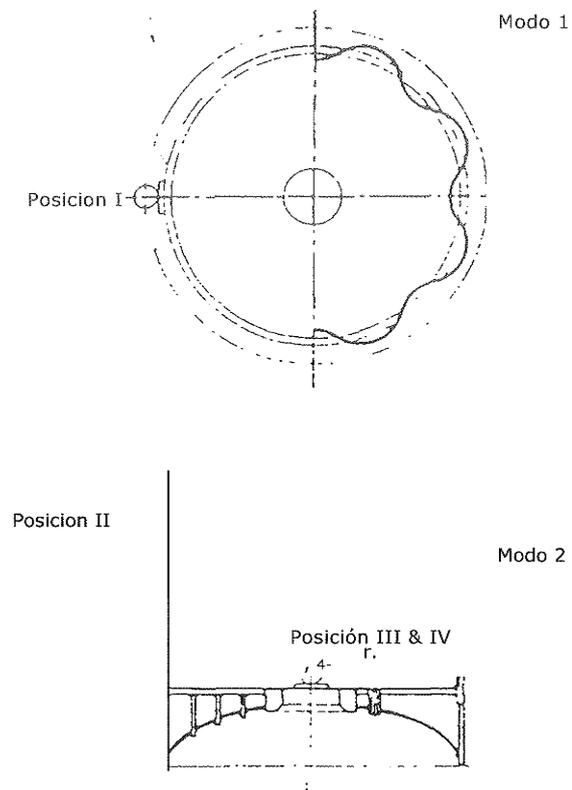


Figura 9: Localización del vibrador en el conjunto de cuba.

Fue posible soldar la brida y de las orejetas de izado de acero al carbono al apuntalar la pared por medio de arañas soldadas a su diámetro interno. La estructura fue sometida a vibraciones en dos ocasiones. esto es. antes y después de retirar las arañas. manteniendo las vibraciones durante 30 segundos a cada una de las frecuencias naturales de la cuba. tal y como determinaban los gráficos del nivel de vibraciones (aceleración) con respecto a la frecuencia del vibrador (Figura 10).

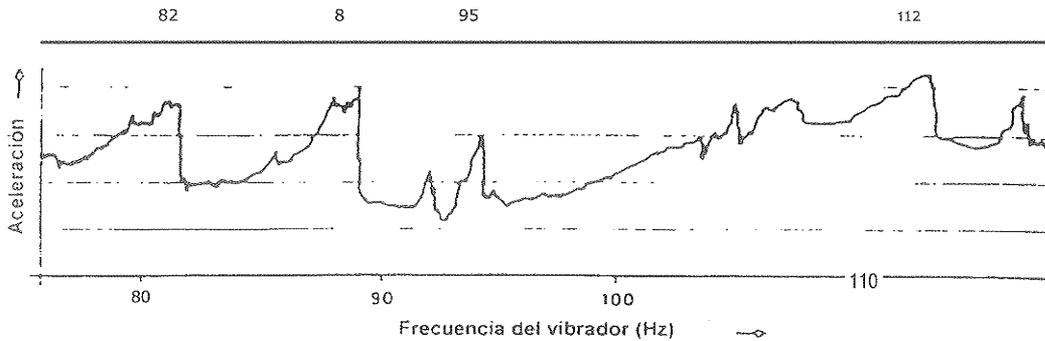
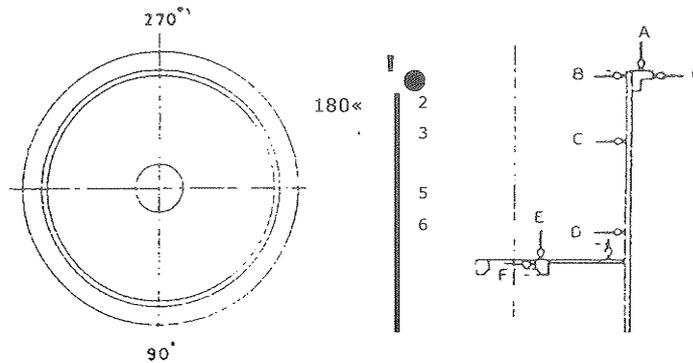


Figura 10: Espectro de aceleración típico durante el tratamiento con vibraciones del conjunto de cuba.

Tras la realización de los dos procesos de tratamiento por vibraciones, se mecanizó el conjunto hasta sus dimensiones finales. Las mediciones del diámetro, tomadas después del mecanizado final, permanecieron constantes en el tiempo. y cumplían el requisito mediante el cual se estipulaba que la ovalidad debería estar dentro de un margen de 0,25 mm sobre un diámetro de 1,7 m (Figura 11). Las cifras de desviación indican una variación en las lecturas de una galga de cuadrante fija cuando se hace girar la cuba sobre su eje una vuelta. Se instalaron dos de estas cubas en la planta. proporcionando resultados operativos satisfactorios.



Estacion	Máximo	Mínimo
•	1676.425	11676.400
	1676.500	1676.450
•	1676.550	11676.515
	1676.500	1676.475
•	1676.450	1676.425
	1676.465	1676.42.0

Descentrado en vanos puntos (mm)

Para todas las estaciones
 D: diámetro interno máximo 1676.559 mm
 Diámetro interno mínimo. 1576.400 mm
 - 9.40 -
 ...; diámetro interno recuento: 1676 -3.65 mm

Localización	A	E	1
Variación en la lectura de la calga de cuadrantes	3.01 ; 0.01 ; 0.03 ; 0.03 ; 0.05 ; 0.01 ; 0.21		
	0.025		
Altura =	143 -	000 mm	

Figura 11: Dimensiones del conjunto de cuba después del mecanizado final

CONCLUSIONES

En este artículo se presenta el trabajo realizado en Larsen & Toubro Ltd. tratando de establecer la eficacia de las técnicas de relajación de tensiones por vibraciones. Hasta hace pocos años. no se pudieron apreciar en India las ventajas de este tipo de técnicas. Aunque existe un volumen considerable de estudios similares relativos a la implementación de acondicionamiento por vibraciones, raramente se ha cuantificado la relajación de tensiones en el caso de componentes estructurales.

Se utilizó un extensómetro basado en la técnica de perforación de agujeros ciegos para medir las tensiones residuales de una estructura de chapas soldadas, tanto antes como después de la aplicación del tratamiento con vibraciones, detectándose unos valores de relajación de tensiones residuales del orden de 30-57 % en un punto sobre la estructura. Dado que la amplitud de la deformación durante la resonancia no es uniforme en toda la estructura, permanecerán niveles divergentes de tensiones residuales por toda la bancada. Es probable que la relajación de tensiones hubiera alcanzado sus máximos valores en las regiones en las que éstas se concentran. Esto también es aplicable a las superficies en las que se imponen las mayores amplitudes de deformación debido a vibración de la estructura de chapa en modos de combadura. La redistribución de tensiones residuales (como demuestra Dawson [9] en probetas de vigas acarteladas), producida por vibraciones, parece ser de gran ayuda en los casos en los que la cuestión de la estabilidad dimensional es importante.

Se midió la amplitud de la deformación superficial en el mismo punto durante la resonancia, registrándose valores de, aproximadamente, 600 microesfuerzos. El nivel de amplitud de la deformación parece haber sido lo suficientemente grande como para producir cierta cantidad de relajación de tensiones. Esta medición permite al ingeniero determinar si se producirá relajación de tensiones en un punto determinado y seleccionar la frecuencia y la fuerza del vibrador de tal forma que la amplitud de deformación necesaria se imponga sobre la estructura. Aunque la relajación de tensiones mediante vibraciones depende de las propiedades del material y del tratamiento térmico, la amplitud de la deformación pudiera servir como una cantidad física medible, análoga a la temperatura en el caso de procesos térmicos de relajación de tensiones. Los trabajos de Dawson [9] y Soto Raga [10] deben ser aplicados a estructuras con distribuciones de tensiones residuales multiaxiales, así como a la relajación de tensiones que se puede obtener debida a las amplitudes de las deformaciones superficiales impuestas durante la resonancia de estructuras con formas arbitrarias.

En Larsen & Toubro Ltd.. se aplicaron procesos de acondicionamiento por vibraciones a varios tipos de estructuras de piezas soldadas. En todos los casos. se mantuvo la estabilidad dimensional y los diferentes componentes han estado en funcionamiento. obteniéndose resultados satisfactorios.

Las mediciones de tensiones residuales utilizando métodos basados en extensímetros tienen un coste elevado y son tediosas a la hora de llevarlas a cabo: la estabilidad de dimensiones debería ser utilizada como una prueba de la eficacia de los tratamientos de acondicionamiento por vibraciones. Finalmente, se han presentado en este contexto las observaciones de conjuntos para cubas. formados por piezas soldadas. realizadas durante la aplicación de estos tratamientos.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Masubuchi. K.: *Analysis of Welded Structures*, Pergamon, 1980.
- [2] *Cast Metals Handbook*, American Foundrymen's Society, 1957.
- [3] Caubo. M.: "Determination of the Conditions of Stress Relieving of Welded Assembly." *Welding Journal*, Vol 42, no. 6, pp. 282s-288s.
- [4] Adoyan, G.A., et al.: "The Vibratory Stress Relieving of Castings," *Machines and Tooling*, Vol. 38. no. 8. 1967, pp. 18-22.
- [5] Claxton. R.A.: "Vibratory Stress Relieving – Part 1: Theory." *Verifact*. Vol. 10, no. 1, February, 1983.
- [6] Weiss, S., Baker. G. S. & Dasgupto, R. D.: "Vibrational Residual Stress Relief in a Plain Carbon Steel Weldment," *Welding Journal*, February 1976, pp. 47s-54s.
- [7] Wozney, G.P. & Crawmer, G.R.: "An Investigation of Vibrational Residual Stress Relief in Steel," *Welding Journal*, Vol. 47, no. 9, September 1968, pp. 411s-418s.
- [8] Zubchenko, O. I., Gruzd, A. A., Torekhov, G. & Sostin, A. G.: "Vibrating Loads used for Relieving the Residual Stresses in Welded Frames." *Automatic Welding*, Vol. 27, no. 9, 1974, pp. 59-62.
- [9] Dawson, R.: "Residual Stress Relief by Vibration," Ph. D. Thesis. Liverpool Unverisity, December, 1975.
- [10] Soto Raga, A. R.: "An analysis of the Mechanism of Reduction of Residual Stresses by Vibration," Ph. D. Thesis, Georgia Institute of Technology, April, 1983.
- [11] "Measurement of Residual Stresses by the Blind Hole Drilling Method," Technical Data Bulletin, T-403, Photolastic Inc., Measurements Group, Wendell, NC, USA.

RIPOL



0000

Relajación de tensiones por vibración en piezas soldadas

REFERENCIA: Bouhelier, C., Babarin, P., Deville J. P. & Miege, B.: "Vibratory Stress Relief of Welded Parts." *Mechanical Relaxation of Residual Stresses, ASTM STP 993*, L. Mordfin, Ed. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1988. 58-71.

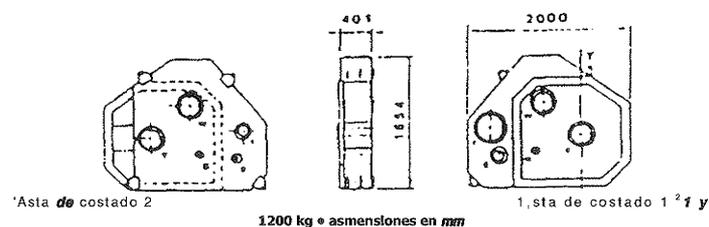
RESUMEN: ¿Cuál es la eficacia de la relajación de tensiones residuales mediante vibración mecánica? Para este trabajo, se realizaron una serie de estudios en dos reductores primarios soldados y un peso de 1200 Kg. cada uno de ellos, sometidos a procesos de atenuación de tensiones por medios térmicos (en el caso del reductor A) y mecánicos (reductor B). En ambos casos, se realizaron mediciones de tensiones mediante rayos X antes y después de los procesos de relajación. También se realizaron mediciones de tipo dimensional en el reductor B. Durante el tratamiento mecánico, se hizo un seguimiento del comportamiento dinámico del reductor, mediante la recogida de datos relativos a la aceleración y con la realización de pruebas de tipo extensométrico, con el fin de calcular la magnitud de las tensiones inducidas por las vibraciones así como para detectar la presencia eventual de una nueva deformación permanente. En el caso de la relajación por método térmico, la reducción de las tensiones residuales es del orden de 70 al 100%. En el caso de la relajación por métodos mecánicos, la reducción se sitúa entre un 45 y un 100% para las tensiones de tipo traccional, mientras que, en el caso de tensiones compresivas, solamente se obtienen valores entre un 0 y un 45%. Por otro lado, se realizaron algunas pruebas en piezas soldadas de un componente de unidad de bomba, obteniéndose resultados similares.

PALABRAS CLAVE: relajación de tensiones por vibraciones, acero al carbono, pieza soldada, medición de relajación de tensiones con rayos X, tensión residual

PRUEBAS REALIZADAS EN LA CARCASA DE UN REDUCTOR

Definición de las pruebas

Las pruebas fueron realizadas en dos carcasas de reductor, de 1200 kg. de peso respectivamente, de construcción normal y fabricados por Brissoneau- Lotz Marine con acero de grado E-26-4 (*Figura 1*). Estas piezas fueron sometidas a dos tipos de procesos de relajación de tensiones: tratamiento térmico (carcasa A) y vibraciones (carcasa B).



*Figura 1: Carcasa del reductor primario de tipo B.
La carcasa del modelo A es simétrica a θ en relación al eje YY .*

Normalmente, se produce relajación de tensiones en piezas soldadas utilizando un tratamiento térmico, y, así, se utilizaron como referencia las mediciones realizadas en carcasa A. Mediante rayos X, se comprobó la eficacia de la relajación de tensiones, tanto antes como después de la aplicación de este tipo de tratamientos. Durante el proceso con vibraciones, se efectuaron mediciones de la aceleración para determinar el comportamiento dinámico de la estructura. Se detectó la existencia de una frecuencia resonante y se describió la deformación de la pieza.

También, se llevaron a cabo mediciones de tipo extensométrico para definir el alcance de las tensiones inducidas en el transcurso de los procesos vibratorios, así como para detectar cualquier nueva deformación permanente tras la finalización del proceso. Las mediciones, efectuadas antes y después de la relajación de tensiones, hicieron posible mantener un control sobre las variaciones de las dimensiones generales y de la planitud superficial de las piezas. En la *Tabla 1* aparecen las diferentes medidas recogidas.

Mediciones	Marca en la carcasa	Comprobación metrológica	Comprobación extensométrica y análisis vibracional	Mediciones de las tensiones mediante rayos X
Antes de relajación de tensiones	A			
Durante la relajación de tensiones por vibraciones	B	X		
Después de la relajación de tensiones por vibraciones	B	X		I X
Después de la relajación por tratamiento térmico	A		1	fX
Transcurrido un año después del primer proceso de relajación de tensiones por vibraciones	B	X		

Tabla 1: Definición de las pruebas

Parámetros operativos de la relajación de tensiones por vibraciones

La *Figura 2* muestra la pieza durante el proceso de relajación de tensiones por vibraciones utilizando el equipo *Fórmula 62* de la firma Stress Relief Engineering Company. Este equipo consta de un motor desequilibrado y de velocidad de rotación variable, que se fija a la pieza mediante unas abrazaderas. Un acelerómetro fijado a la pieza posibilita, en teoría, la detección de la frecuencia primaria de la pieza. La pieza soldada mecánicamente se sitúa sobre cuatro bases de goma para la absorción de choques. La *Tabla 2* enumera las condiciones bajo las cuales se realizó la relajación de tensiones por vibraciones

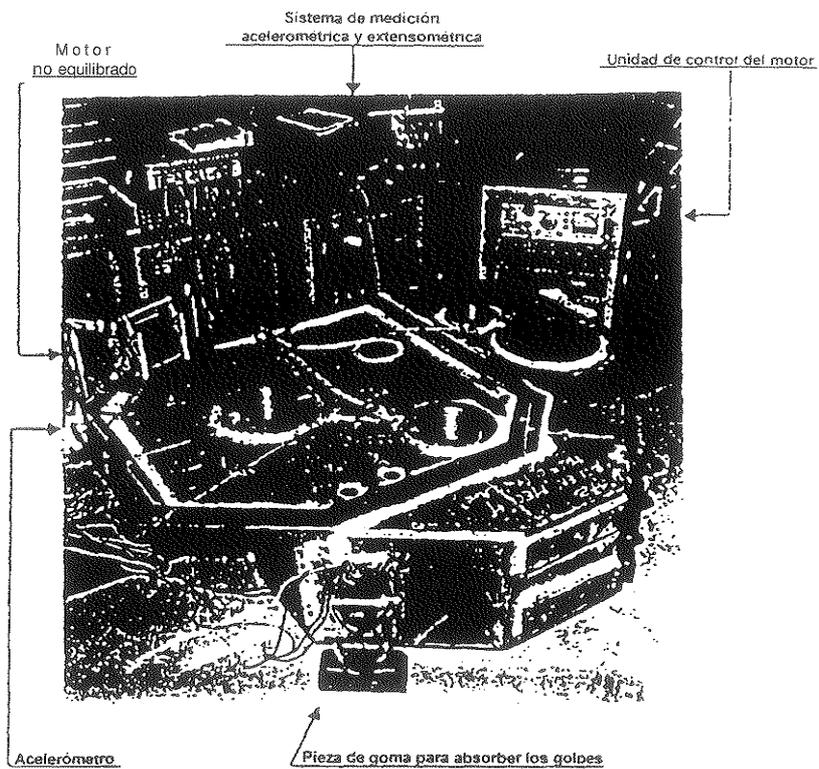


Figura 2: Carcasa durante la relajación de tensiones por vibraciones

Proceso de relajación de tensiones	Frecuencia indicada por el equipo "Fórmula,62", en Hz	Frecuencia medida por el equipo CETIM, en Hz	Duración de las vibraciones, en min	Posición del motor desequilibrado (Figura 3)
Primero	33.6	30	15	posición 1
Primero	33.6	30	15	posición 2
Segundo	...	44	10	posición 1
Segundo	automático	33	5	posición 1
	cíclico	51,8	5	
		39,8	5	

Tabla 2: Condiciones de relajación de tensiones por vibraciones

Parámetros del tratamiento térmico

Las condiciones del termotratamiento fueron las siguientes:

Tiempo del incremento de temperatura: 3 horas

- Se mantuvo a 620 °C durante 1 hora

Enfriamiento en el horno

Parámetros operativos de las mediciones de tensiones utilizando rayos X

Las mediciones de tensiones llevadas a cabo mediante rayos X se basan en las variaciones en el espaciamiento reticular del material registradas en varias direcciones ψ , $1,1$ [5,6]. Para todas las mediciones que se presentan en este trabajo se empleó un equipo portátil formado por dispositivos de nuestro laboratorio y con las mismas características que un difractómetro convencional. Dicho equipo ha estado siendo utilizado en el CETIM durante varios años (Figuras 4 y 5).

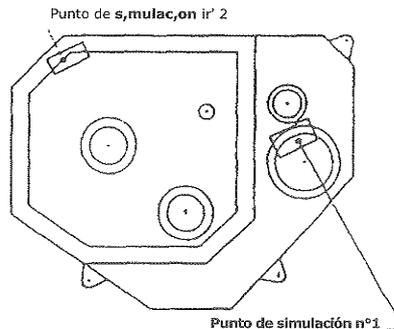


Figura 3: Posición de los puntos de simulación

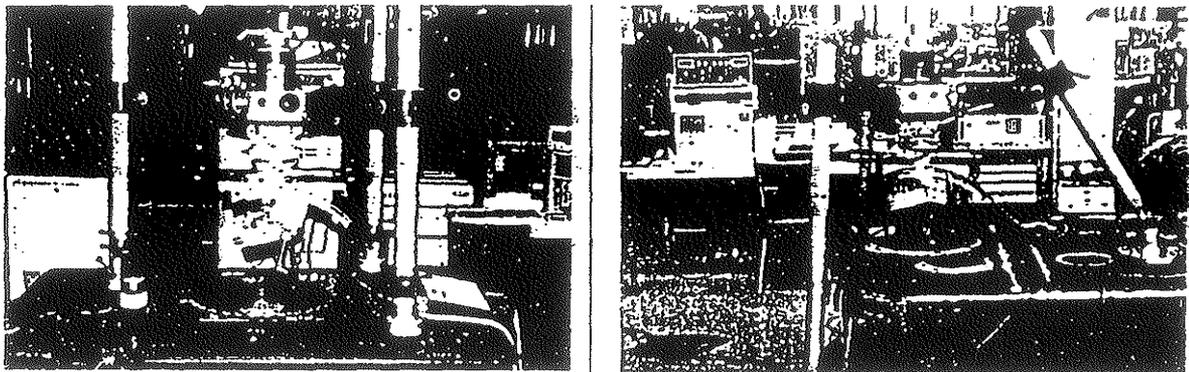


Figura 4: Dispositivo de medición de tensiones / Figura 5: Medición de tensiones por rayos X en un reductor.

La radiación K_{Cr} del cromo producida con rayos X, sometida a difracción por los (211) planos del acero, fue recogida en un detector sensible a la posición durante varias exposiciones t en cualquier dirección ψ . Se localizaron los perfiles de difracción mediante un nuevo método centroidal y se obtuvieron las tensiones mediante regresión lineal general. En este caso, la relación 2θ frente a $\sin \psi$ fue muy lineal, con lo que solamente fue necesario tener en cuenta un estado biaxial.

Se realizaron varias exposiciones ψ en tres direcciones θ . En tales condiciones, la precisión de las mediciones depende básicamente del error estadístico, siendo, en este caso, la desviación estándar de, aproximadamente, ± 110 MPa (95%).

Resultados

Comprobaciones metrológicas

Las comprobaciones de las dimensiones realizadas antes y después de los procesos, primero y segundo, de relajación de tensiones por vibraciones muestran variaciones de una magnitud dentro de la precisión de las mediciones (Tabla 3. Figura 6a). No se registró una divergencia significativa en la planitud superficial (Tabla 4. Figura 6b). La relajación de tensiones por vibraciones no produce una variación significativa ni de las dimensiones generales ni de la planitud superficial de la pieza. La eficacia de la relajación de tensiones no puede, por tanto, ser detectada con mediciones de tipo metrológico.

Punto de referencia medido	Lectura tomada antes de la relajación de tensiones. en mm	Lecturas tomadas después de la relajación de tensiones. en mm	
		Primero	Segundo
Longitud:			
A	1998,42	1998,36	1998,35
Ancho:			
B	1640,12	1640,13	1640,10
Distancia central entre ejes			
C	897,64	897,65	897,65
	697,82	697,84	697,82
E	399,44	399,44	399,46

Tabla 3: Comprobación de las dimensiones antes y después de la relajación de tensiones (la precisión de la medición es igual a $21 \cdot 0,02$ mm/m) – Figura 6a

Punto de referencia medido	Divergencias registradas antes de la relajación de tensiones. en mm	Divergencias registradas después de la relajación de tensiones. en mm	
		Primero	Segundo
	0	0	0
2	- 0,02	+ 0,02	0
3	0	+0,01	0
	+0,02	+0,01	0
---	+0,03	0	0
	0	0	0
-	+ 0,01	- 0,03	-0,01
	0	0	0
	- 0,01	- 0,03	- 0,04
1 c	0	- 0,02	- 0,04
	- 0,02	- 0,01	- 0,02
	Divergencia de	Divergencia de	: = 0,04
	= 0,05 mm (antes)	= 0,05 mm (después)	

Tabla 4: Divergencias en la planitud superficial antes y después de la relajación de tensiones (incertidumbre de medición puntual: 0,05 mm) – Figura 6b

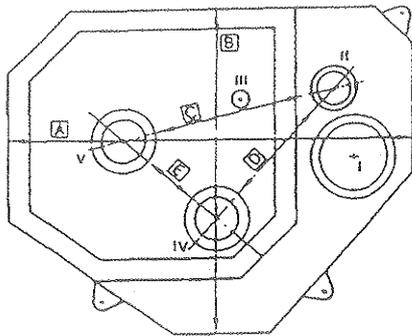


Figura 6a: Carcasa modelo B — comprobación de dimensiones antes y después del proceso de relajación de tensiones por vibraciones

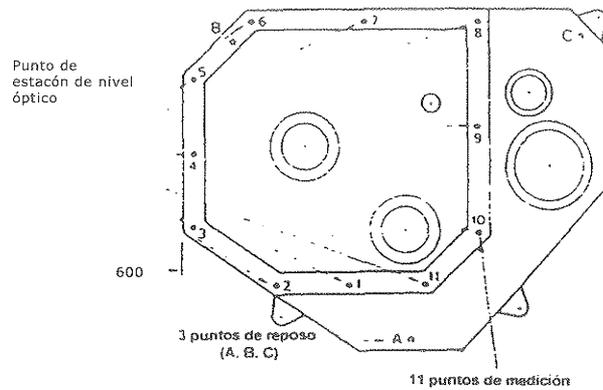


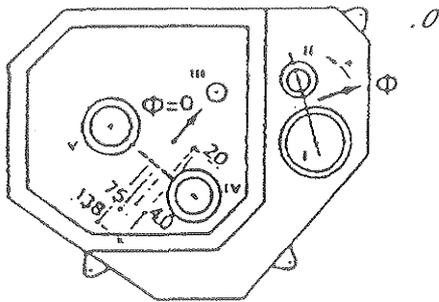
Figura 6b: Carcasa modelo B: divergencias en la planitud superficial antes y después del proceso de relajación de tensiones por vibraciones

Medición de tensiones residuales

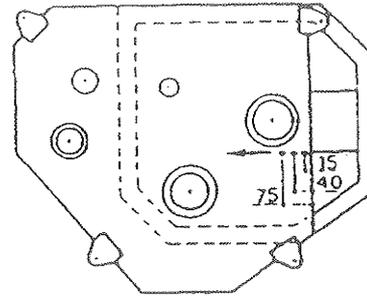
En las figuras 7, 8, 9 y 10, se definen las localizaciones de los puntos de medición. La reducción de las tensiones residuales mediante tratamiento térmico va desde un 70 a un 100% (Figuras 11 y 12). Después de que se produzca la relajación, las tensiones residuales máximas son casi de ± 30 MPa. Estos resultados confirman la eficacia del ciclo del tratamiento térmico. La reducción de las tensiones residuales, después de un primer tratamiento con vibraciones, osciló entre un 45 a un 100% para las tensiones de tipo traccional, y entre un 0 a un 45% para las tensiones de tipo compresivo (Figuras 13 y 14). Después de una primera relajación de tensiones, las tensiones residuales máximas fueron -200 MPa en compresión y $+60$ MPa en tracción. El segundo tratamiento con vibraciones no produjo mayor variación detectable en las tensiones residuales (Figuras 13 y 14).

Análisis extensiométricos y por vibraciones

El primer tratamiento por vibraciones se realizó a una frecuencia de 30 Hz, la cual no corresponde con ninguna frecuencia natural de la pieza. Las tensiones dinámicas inducidas por vibración y medidas con tres extensímetros situados en la zona de medición de tensiones residuales (Figura 7 lado 1: a lo largo de ejes I y II, a lo largo de ejes IV y V) presentan un valor máximo de 1.5 MPa. Se efectuó el segundo tratamiento por vibraciones a la primera frecuencia natural de la estructura (44 Hz). Se registró un nivel de tensiones dinámicas entre 100 y 200 veces superior al obtenido en el primer proceso de relajación de tensiones.



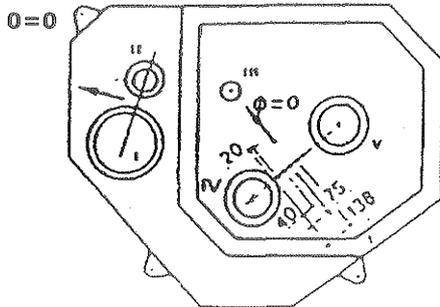
Loc. punto de medición de tensiones residuales
Dirección del ángulo (1)=0



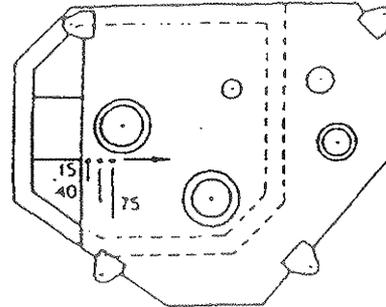
Loc. punto de medición de tensiones residuales
Dirección del ángulo cD=0

*Figura 7: Carcasa modelo B. lado 1
(para la relajación de tensiones por vibraciones)*

*Figura 8: Carcasa modelo B. lado 2
(para la relajación de tensiones por vibraciones)*



Loc. punto de medición de tensiones residuales
Dirección del ángulo cD=0



Loc. punto de medición de tensiones residuales
Dirección del ángulo (1)=0

*Figura 9: Carcasa modelo A. lado 1
(para la relajación de tensiones mediante tratamiento térmico)*

(para la relajación de tensiones mediante tratamiento térmico)

Figura 10: Carcasa modelo A. lado 2

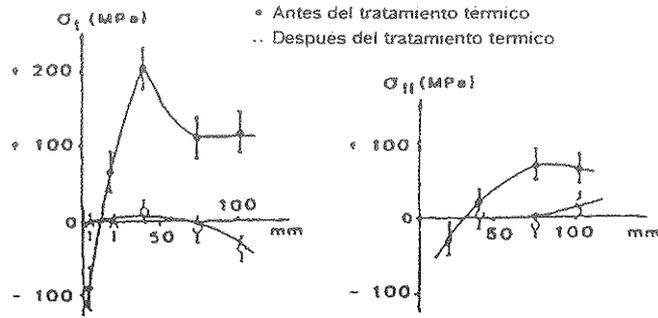


Figura 11: Carcasa modelo A, lado 1 – variación de las tensiones principales σ_I y σ_{II} medidas a lo largo de los ejes IV y V

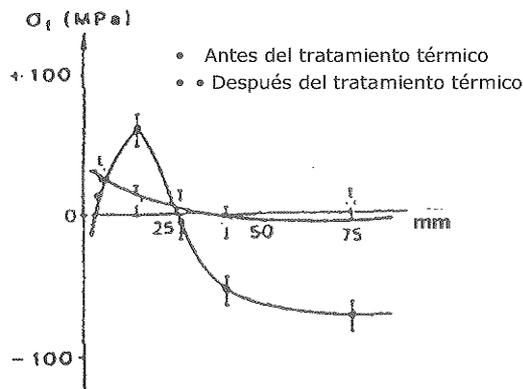


Figura 12: Carcasa modelo A, lado 2 – variación de las tensiones principales σ_I , (puntos de medición como los de la figura 10)

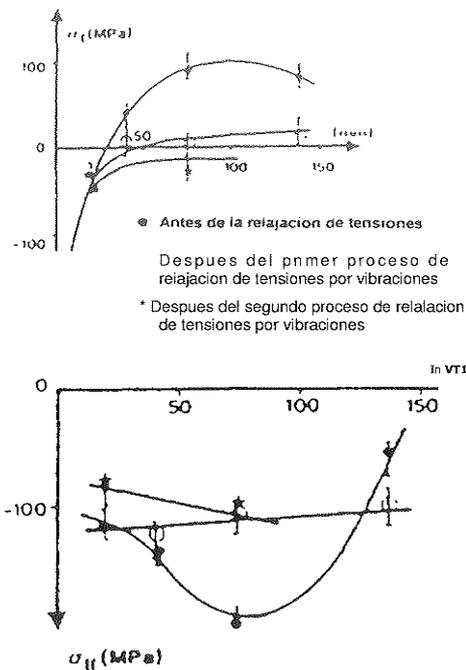


Figura 13: Cercase modelo 8, lado 1 – variación de las tensiones principales σ_I y σ_{II} , medidas a lo largo de los ejes IV y V

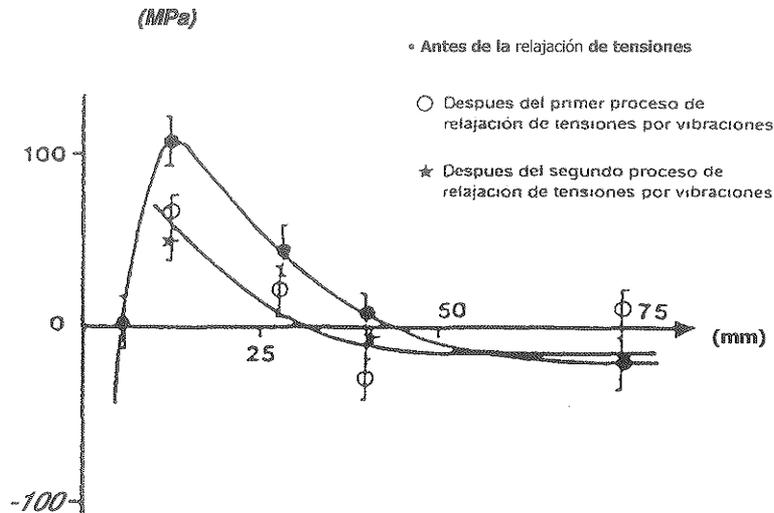


Figura 14: Carcasa modelo B, lado 2 – variación de las tensiones principales σ_1 (puntos de medición como los de la figura 8)

PRUEBAS DEL COMPONENTE DE UNIDAD DE BOMBA

Se realizaron varias pruebas sobre piezas soldadas de un componente de unidad de bomba, fabricado de acero grado E24 (diámetro externo = 1400 mm, diámetro interno = 900 mm, peso = 270 kg.). Se realizó una relajación de tensiones por vibraciones con el mismo equipo descrito anteriormente. Durante este tratamiento, la pieza estaba suspendida verticalmente mediante eslingas, y no se registraron las condiciones de vibraciones.

Igual que sucedía en el caso anterior, se comprobó la eficacia de la relajación de tensiones utilizando mediciones de tensiones por rayos X, antes y después del proceso de relajación de tensiones. En la figura 15, se puede ver la localización de los puntos de medición de las tensiones residuales, y en la tabla 5 se presentan los resultados de estas mediciones.

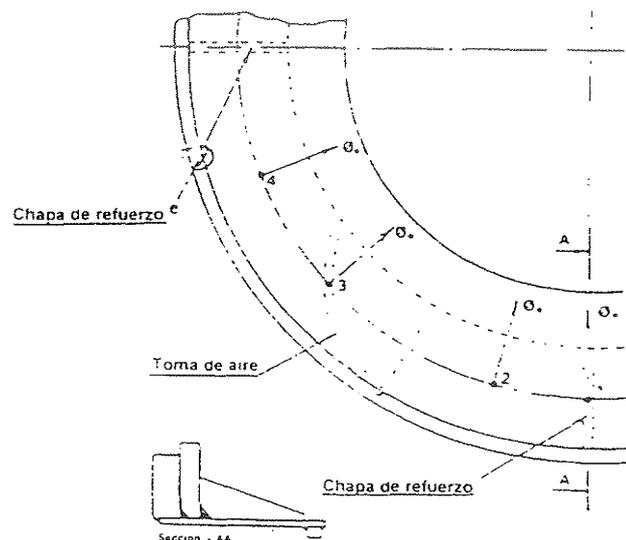


Figura 15: Componente de unidad de bomba, localización de los puntos de medición de las tensiones residuales

Referencia de la pieza	Punto de medición	Antes de la relajación de tensiones		Después de la relajación de tensiones			MPa	MPa	, 10, grad	
		n _i , MPa	MPa	(1) _n ,/(1) _n , grad.	n _{ii} , MPa					(1) _n ,/(1) _n , grad.
X1	1	56	99	-32	33	60	-23	-28	-39	+4
X1	2	-59	55	-5	-83	30	-24	-9	-25	-14
X1		-49	-16	-9	-52	-21		-5		+14
X1		-12	84		-25	85	-13	-10	1	-12
v _i	1	146	93	2	106	48	-40	21	-45	0
v ₁	2	65	114		1	76	-64	-26	-38	-17
v ₁	3	132	244	-8	90	191	-42	-11	-53	-3
v ₁	4	35	75		14	57	-21	-11	-18	

o_i = tensiones principales

n_i = tensiones principales, y

(1)_n,/(1)_n = ángulo entre n_i y dirección de referencia ⁽¹⁾⁰

Tabla 5 Tensiones residuales antes y después del proceso de relajación de tensiones por vibraciones en dos componentes de unidades de bombas.

Los valores A_a muestran, sin ningún género de dudas, la eficacia relativa de este tipo de tratamientos aplicados a las piezas soldadas sometidas a las pruebas. Con la excepción de punto 4 en la pieza X1, todos los valores de tensiones de tipo traccional disminuyeron con ratios variables. Las variaciones en las direcciones principales de las tensiones no eran significativas. Los puntos 2, 3 y 4 de la pieza X1 muestran un incremento en las tensiones residuales de tipo compresivo tras la relajación de tensiones por vibraciones. No podemos proporcionar una explicación a tal fenómeno, pero, quizás, el proceso por vibraciones induce a una redistribución de las tensiones residuales en la escala de las estructuras soldadas.

INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

El proceso de relajación de tensiones por vibraciones sí es efectivo. Las tensiones residuales de tipo traccional se reducen con mayor facilidad que en el caso de tensiones residuales de tipo compresivo. Otros ingenieros, en experimentos llevados a cabo utilizando un equipo de relajación de tensiones similar al usado trabajo (*Figura 16*), han obtenido resultados similares. Aparentemente, la frecuencia de vibración de la estructura no influye en la eficacia de la relajación de tensiones. No es necesario atenuar tensiones utilizando la frecuencia de resonancia de la pieza. La magnitud de las tensiones dinámicas que provocaron relajación de tensiones es del orden de 1.5 MPa para la carcasa del reductor. Este resultado contradice la mayoría de los análisis [1] y [2], que atribúan la relajación de tensiones mediante vibraciones a las deformaciones plásticas localizadas de carácter cíclico.

Partiendo del hecho de que, bajo carga cíclica, el límite elástico de algunos metales se reduce de forma significativa (*Figura 17*), las tensiones dinámicas por debajo del límite elástico estático pueden causar deformación plástica localizada y producir la reducción de tensiones residuales. Este tipo de argumento parte del supuesto de que las tensiones ($a_R + a_{apbc}$) son, como mínimo, iguales al límite elástico cíclico del material; esto no puede explicar que la relajación de tensiones obtenida en el caso de tensiones dinámicas aplicadas sea igual o inferior a 1.5 MPa. La relajación de tensiones parcial se debe, quizás, a movimientos y a reorganización de anomalías en el nivel atómico (desplazamiento de dislocaciones, movimientos de átomos en los intersticios, fricción interna): esta hipótesis aún está por confirmar.

Al carecer de explicación de tipo físico para este fenómeno, no es aconsejable extrapolar los resultados a otras estructuras y metales.

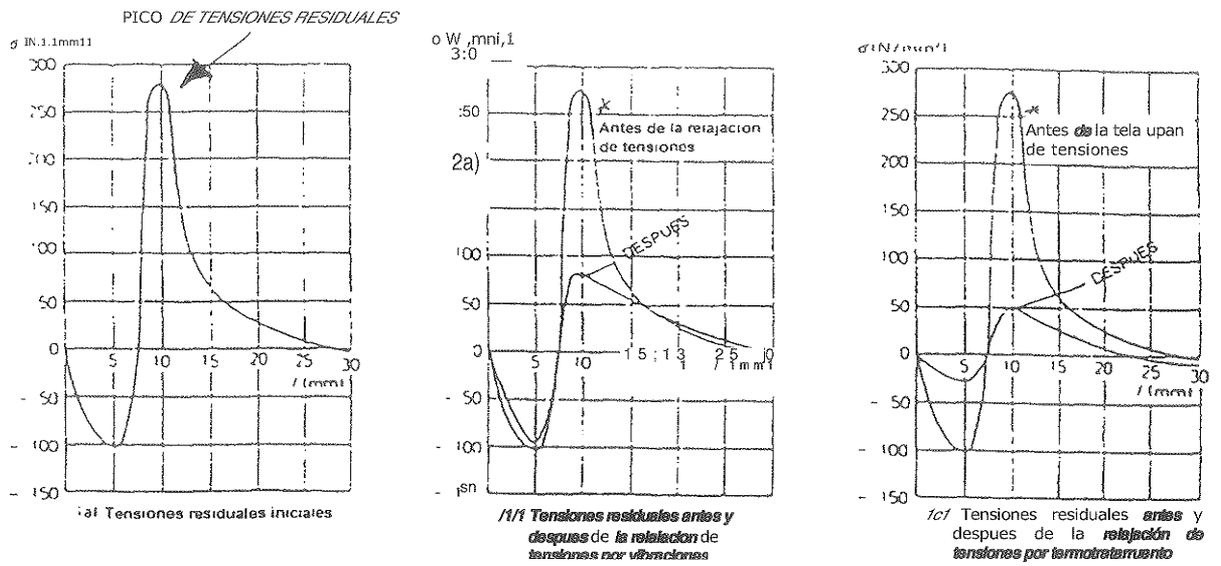


Figura 16: Ejemplo de relajación de tensiones (según [8]). Chapa de acero sin aleaciones, de 25 x 150 x 500 mm. Soldadura en dirección longitudinal en la superficie de la pieza. Las tensiones residuales son del orden del tamaño del límite de elasticidad.

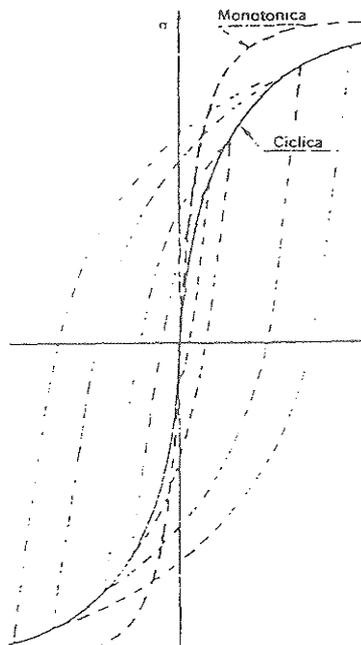
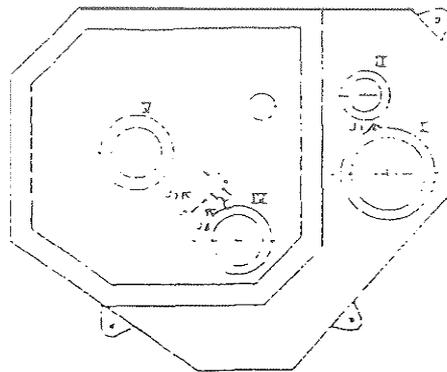


Figura 17: Representación de la curva cíclica (en línea de trazo continuo) y de la curva monotónica (línea punteada)



2

Figura 18. Pcs;c:ón Ce los extensímetros

CONCLUSIONES

Se puede utilizar un proceso de relajación de tensiones por vibraciones para la estabilización de las dimensiones antes de la mecanización de piezas soldadas. Es necesario efectuar una prueba preliminar para valorar el grado de eficacia del proceso con respecto a cualquier elemento. Si el tratamiento resulta suficiente, las variaciones de tamaño en el momento de realizar el mecanizado son insignificantes. Este tipo de relajación de tensiones ya se utiliza en aplicaciones industriales.

Asimismo, se puede aplicar este proceso para la relajación de tensiones de piezas a las que no es posible aplicar tratamientos térmicos de relajación de tensiones. Sin embargo, se debería de tener en cuenta que la relajación de tensiones tiene solamente un carácter parcial.

Resulta obvio que se debería desechar por completo la relajación de tensiones por vibraciones como proceso sustitutivo del tratamiento térmico cuando éste se aplica por motivos de tipo metalúrgico o cuando el tratamiento térmico es obligatorio en el cumplimiento de ciertas normas de fabricación.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Dawson, R. & Moffat, D.G.: "Vibratory Stress Relief: a Fundamental Study of its Effectiveness", *Journal of Engineering Materials and Technology*, vol. 102, April 1980, pp. 169-176.
- [2] Weiss, S., Baker, G. S. & Das Gupta, R. D.: "Vibration Residual Stress Relief in a Plain Carbon Steel Weldment", *Welding Research Supplement*, Feb, 1976, pp. 47s-51s.
- [3] Zuschenko, O. I., Grazd, Á. A., Orckhow, G. I. & Sostin. A. G.: "Vibrating Loads Used for Relieving the Residual Stresses in Welded Frames", *Avtomaticheskaja Svarka*, n° 9, 1974. pp. 64-65 (Traducción en *Automatic Welding (URSS)*, VOL. 27, N° 9, PP. 59-62).
- [4] Hebel, A. G. Jr.: "Subresonant Vibrations Relieve Residual Stress" *Metal Progress*. Nov. 1985. pp. 51-55.
- [5] Lecroisey. F., Mie⁹e. B. & Saint Etienne. A.: La Mesure des Contraintes Résiduelles par Rayons X". *Mémoire Technique du CETIM*. n° 33. Mar. 1978.
- [6] Miege, B., Barbarin. P. & Convert, F.: "La Mesure des Contraintes par Rayons X". a publicar por el *CETIM*.
- [7] Convert, F.: Groupement Français pour l'Analyse des Contraintes par Diffractométrie X". *ENSAM*. Aix en Provence, 1982.
- [8] Prohaszka. J., Midas'. B. & Varda. L.: "Vibration Induced Internal Stress Relief". *Periodica Polytechnica*, vol. 29, n° 1. 1975. pp. 69-78.

UNA MUESTRA DE LAS MUCHAS EMPRESAS QUE UTILIZAN "FÓRMULA 62"

Alcoa Aluminum
Boeing
Canron Ltd.
Aramco
Chem Tex Fibers
Firestone Tire & Rubber
Crenio Mfg.
Dayton Rogers Mfg.
Di-Arco Inc.
Decatur Mold General
Motors Avco Systems
Emerson Electric
Cameron Iron Works
Allis-Chaimers
Northrop Corp.
Ameron Corp.
Browne & Sharpe
States Engr. Co.
Onan Corp.
Avco Lycoming FMC
Corp. Kennecott
Copper Eastman
Kodak San Juan
Coal Martin Marietta
Ingersoll-Rand Co.
Thiokoi Corp.
Excello
Cessna Aircraft
Pioneer Astro Ind.
Waukesha Bearing
Aeroquip - Aerospace Div.
Delaval Separator Co. Stone
Safety Corp.
Mitsui - *Japón*
Ferio Del Pacifico - *Perú*
Delco Remy
Holstein-Kappert - *Brasil*
Hydraulic Research
Borg-Warner Fuor
Ocean Services Aerojet-
General Corp. General
Electric LTV Vought
Systems Cincinnati
Milacron Ingersoll Milling
Machine G i e a s o n
W o r k s Minster Machine
Combustion Engineering
Cellier S.A. - *Francia*.iones
& Lampson V o e s t -
A l p i n e National Electric
Coil United States Army
Johnston Pump Storm-
Vulcan. Inc. Lockheed
Aircraft

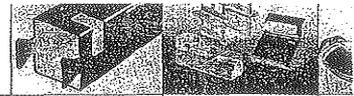
Link Belt Co.

McNally Bharat - *India*
Yale Industrial Products
Oscar Mayer & Co.
Mold-Matic Co.
Reliance Electric
Dae Woo - *Corea*
Teledyne-Ryan
Southern Railway Co.
Walt Disney World Ent.
Ball Helicopter
Gates Rubber
IRD Mechanalysis
Cambell Grinder
U.S. Army Corps of Engineers
Hyundai Shipbuilding - *Corea*
Lawrence Livermore Labs.
Mitsubishi Motors - *Japón*
Rockwell Internacional
Superior Steei Prod. Corp.
Bullard Co.
Taiwan Power Co. - *Taiwan*
Teledyne Casting Service
Massie Tool & Mold
Uddeholm Steel - *Suecia*
Gates Learjet
Marathon LeToumeau
Gould Pump
Brown & Root, Inc.
Dow Chemical Co.
Dake Corporation
American Hoist Company
Mixing Equipment Co.
Great Northern Paper
Wean United
Accurate Mold - *Canadá*
Whitaker Corp.
Xerox Corp.
Burlington Northern R.R.
Jetline Engineering
Le Blond Makino
Marine Industrias Foresteel Div.
- *Canadá*
Ecolaire Canada, Ltd.
Citroen - *Francia*
Hydraudyne - *Holanda*
Avibras-Industria
Aerospacial S.A. - *Brazil*
Eaton Corp.
Chrysler Corp.
Gallmeyer & Livingston
American Can Co.
Thompson Metal Fab.
McDermott Dubai - *Arabia Saudí*
Michelin Tire. Ltd. - *Canadá*
Industrias Roma - *Brasil*
Maschinenfabrik - *Alemania*
Metka S.A. - *Grecia*
Project Engineering Co.. Ltd. -
Suráfrica

Engel - *Canadá*
Toyo Food Co. - *Japón*
Oxford Foundry & Machine -
Canadá
Harris Economy, Ltd. - *Inglaterra*
A.P.V Mitchell (Dryers), Ltd. -
Inglaterra
Bharat Earth Movers - *India*
Johns-Manville Co.. Ltd. -
Canadá
Yang Iron Works - *Taiwan*
Chittaranjan Locomotive Works -
India
Fundicion Monclova S.A. -
México
Pohang Iron & Steel - *Corea*
Dillingham Corp. - *Canadá*
Constantino Barari - *Argentina*
Construcoes Metalomecanicas -
Portugal
Elecon Engineering Co., Ltd. -
India
Quenton Steel. Ltd. - *Canadá*
Westinghouse Elect. Corp. Paul
Munroe **Hydraulics American
Grinding & Machine
Tool Co.**
Stork VMF - Holanda
Moore Special Tool Co.
White Farm Equipment
IBM
Bridgeport Machine
Coming Glass
Illinois Central Gulf R.R.
Barre Welding - *Canadá* Murata
Machinery. Ltd - *Japón*
Caterpillar Tractor
Emii Jeager - *Alemania*
Aerospatale - *Francia*
John Deere
U.S. Electrical Motors
Howmet Ccrr.

Ripool

2000



Resumen

El alivio de tensiones por vibración se está convirtiendo en una alternativa real y efectiva al tratamiento térmico por horno. El equipo Fórmula 62, de tecnología estadounidense, se está utilizando en España con resultados plenamente satisfactorios. Aplicable a una gran variedad de materiales, no tiene efectos negativos en las piezas a estabilizar. Las tolerancias de las piezas se mantienen

Palabras clave

Alivio de tensiones por vibración, esfuerzo residual, Formula 62

Abstract

The lightening of tensions by vibration stress relief is becoming a real and effective alternative to the heat treatment by furnace. The equipment Formula 62, of American technology, is being used in Spain with totally satisfactory results. Applicable to a great variety of materials, it does not have negative effects and keeps the tolerances in the pieces to stabilize.

Keywords

Vibration stress relief, residual stress, Formula 62

Estabilizado de piezas por vibración: la manera más sencilla de aliviar tensiones residuales en el material

Las tensiones residuales se generan por diferentes motivos: en fundiciones, mediante las fuerzas de contracción que surgen a medida que la pieza se solidifica; en la elaboración de metales, debido a las características elásticas del material; al cortar metal, por la acción cortante que va siempre acompañada de deformación; al soldar, debido a la expansión y contracción del material; al mecanizar, etc.

Frecuentemente, estas tensiones son de tal magnitud que es preciso atenuarlas para prevenir la excesiva distorsión o agrietamiento de la pieza.

En la mayoría de los casos, las tensiones residuales en los metales son causadas por la deformación de partes de la estructura cristalina interna del propio material. Para restaurar esta red interna, es necesaria la introducción de energía a la pieza.

El Fórmula 62 (F62) introduce esta energía en la pieza mediante la aplicación de vibraciones de baja frecuencia que atenúan las tensiones internas del material en cuestión.

Definición de esfuerzos residuales Uno de los principales problemas a los que se enfrenta el mundo del metal es la acumulación de esfuerzos o tensiones que provocan la deformación y la pérdida de la estabilidad dimensional. Fabricantes de aceros, de máquina herramienta, matriceros, caldererías, fundiciones, empresas de mecanizado, etc., pueden experimentar problemas con la retención de tolerancias dimensionales en la producción de sus piezas.

Podemos definir las tensiones residuales como cualquier esfuerzo en un cuerpo elástico que se encuentre libre de fuerzas o restricciones externas y de cambios o gradientes de temperatura.

Los esfuerzos, cuando no son iguales, pueden ocasionar deformaciones del material. Grandes esfuerzos en un lado de la pieza provocan movimiento o deformación. Si los esfuerzos son iguales a lo largo de toda la pieza, se compensan y no hay deformación. Si el desequilibrio es demasiado grande, la pieza jamás volverá a su condición anterior.

En los esfuerzos residuales hay dos componentes a tener en cuenta: tensión y compresión. Las leyes de la física y las matemáticas exigen un equilibrio entre la magnitud de compresión y la de tensión. Desafortunadamente, en el trabajo con el metal, no hay un equilibrio uniforme. meta es producir un buen componente metálico o una estructura con bajos esfuerzos residuales. Esto requiere un programa para el alivio o la reducción de estas tensiones con el fin de evitar futuros daños en el material.

En el mundo del deporte encontramos un ejemplo muy clarificador: si un deportista sufre un calambre o una distensión muscular, el primer tratamiento recomendado es un masaje; si no se lleva a cabo, ese tirón muscular puede convertirse en una fisura o rotura de fibras en un plazo más o menos corto. Con el metal sucede lo mismo: las deformaciones internas del material pueden transformarse en microfisuras que con el paso del tiempo se traducirán en grietas en el exterior de la pieza.

Tratamiento de los esfuerzos residuales

Para tratar de devolver a la estructura metálica interna su forma ideal, hay que introducir energía dentro del metal. El estabilizado por tratamiento térmico es el método más conocido, pero no el único.

En el tratamiento por horno, las temperaturas altas 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 en cuanto a transporte también son importantes.

Muchas empresas de la industria metalúrgica han expresado sus deseos de disponer de instalaciones para reducir los esfuerzos residuales durante el proceso de fabricación. Esto origina gastos prohibitivos y muchas veces es logísticamente imposible de conseguir si se utiliza el proceso de tratamiento térmico.

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.

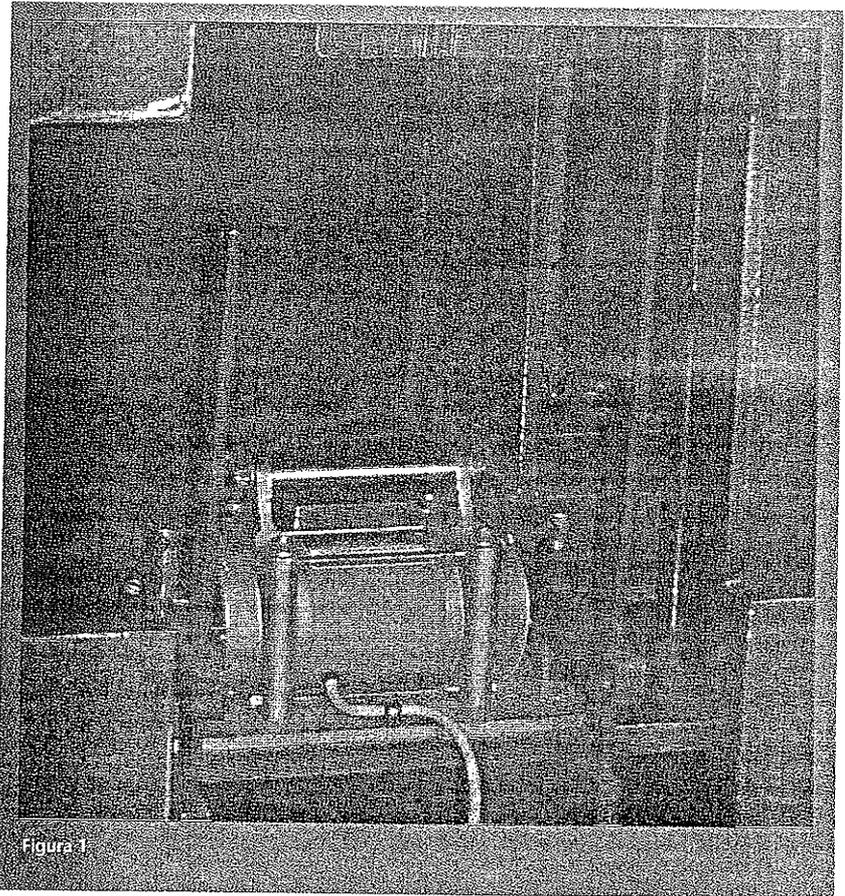


Figura 1

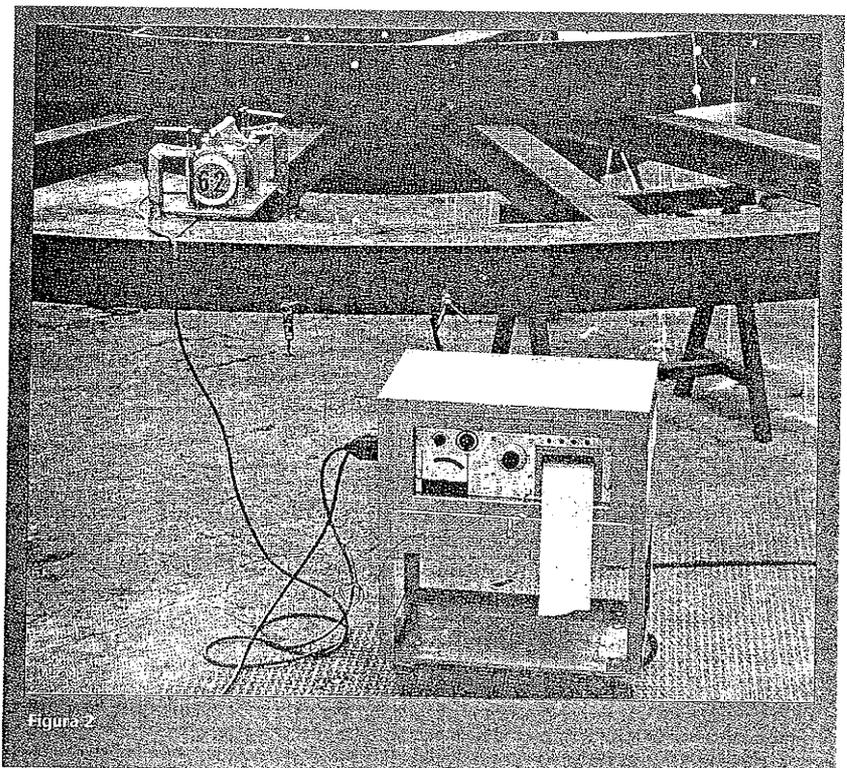


Figura 2

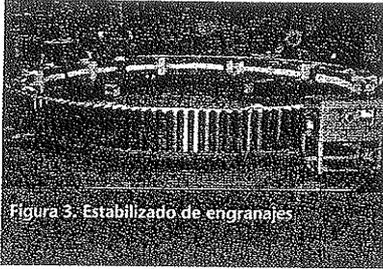


Figura 3. Estabilizado de engranajes

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

Estabilizador de tensiones F62

La compañía Stress Relief Engineering Company de Costa Mesa (California, Estados Unidos) desarrolló durante más de 35 años el uso de un método de alivio vibratorio de tensiones (muy efectivo y sin calor) basado en la resonancia de vibraciones. La Fórmula 62 se ha convertido ahora en un proceso ampliamente aceptado por la industria, cuyo proceso, fácil de usar, hace posible mejorar el control dimensional y aumenta el límite elástico de la pieza sin producir ninguna pérdida en la resistencia a la fatiga.

El método se basa en la introducción de vibraciones de baja frecuencia y alta amplitud durante un breve período de tiempo basado en el peso de la pieza a estabilizar. 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 de esfuerzos más pronunciada en comparación con los métodos con frecuencias subresonantes o subarmónicas.

Las vibraciones de baja frecuencia proporcionan energía de gran amplitud y son

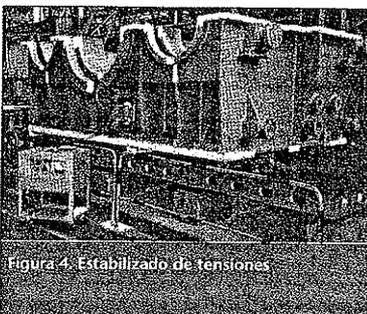


Figura 4. Estabilizado de tensiones

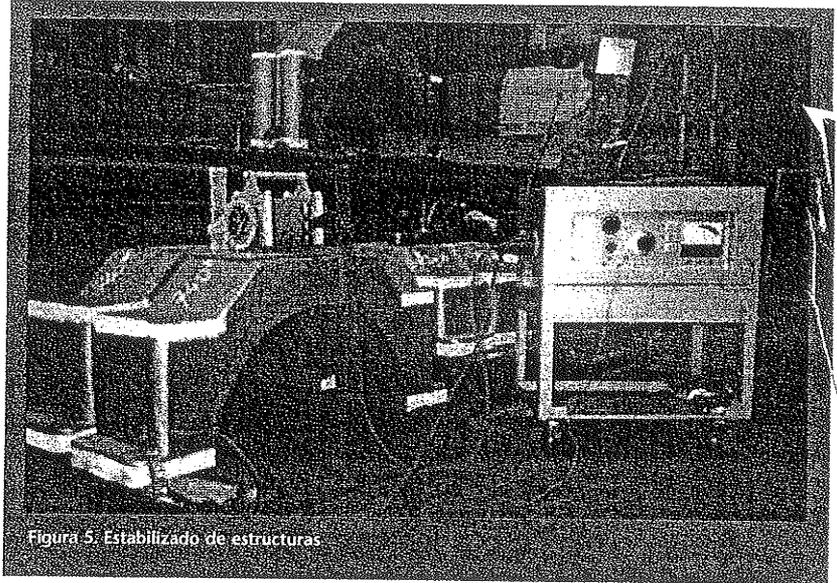


Figura 5. Estabilizado de estructuras

muy eficientes en la reducción de los picos de esfuerzos residuales en las piezas metálicas y estructuras de componentes soldados.

Aplicación de la Fórmula 62

El equipo F62 consta de un vibrador de velocidad variable que se aplica a la pieza y de una consola electrónica encajada dentro de un gabinete portátil que se puede desplazar a cualquier parte 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

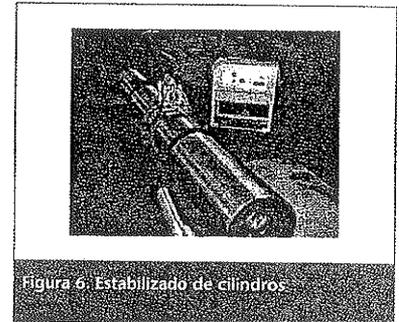


Figura 6. Estabilizado de cilindros

medio de un cable coaxial. Se determina el punto de resonancia de la pieza, cuya búsqueda

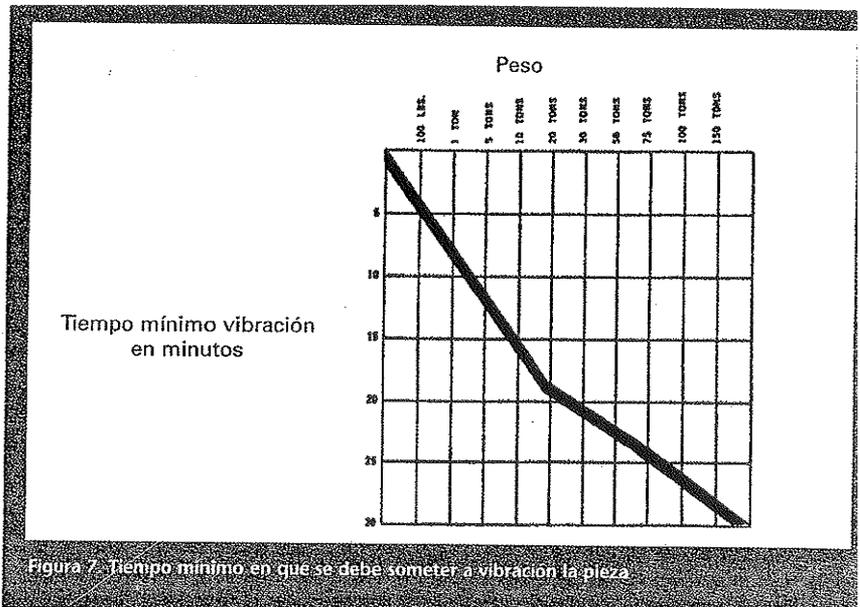


Figura 7. Tiempo mínimo en que se debe someter a vibración la pieza



Figura 8. Estabilizado de piezas soldadas

queda plasmada por medio de una graticas 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 (figura 7). El tiempo de trabajo puede variar entre diez minutos y una hora dependiendo del tamaño de la pieza. Si se trata de una pieza muy grande,

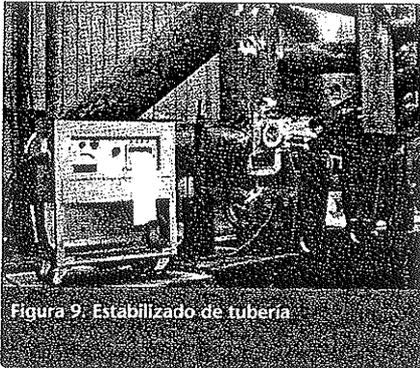


Figura 9. Estabilizado de tubería

será necesario aplicar el equipo en varios puntos diferentes.

El gráfico de la figura 7 representa el tiempo mínimo al que debemos someter a vibración a la pieza; 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 F62 puede trabajar también en modo automático. La máquina trabajará durante 15 minutos en tres ciclos distintos de velocidad. Esto es suficiente para



Figura 10. Estabilizado de eje sobre mesa vibratoria

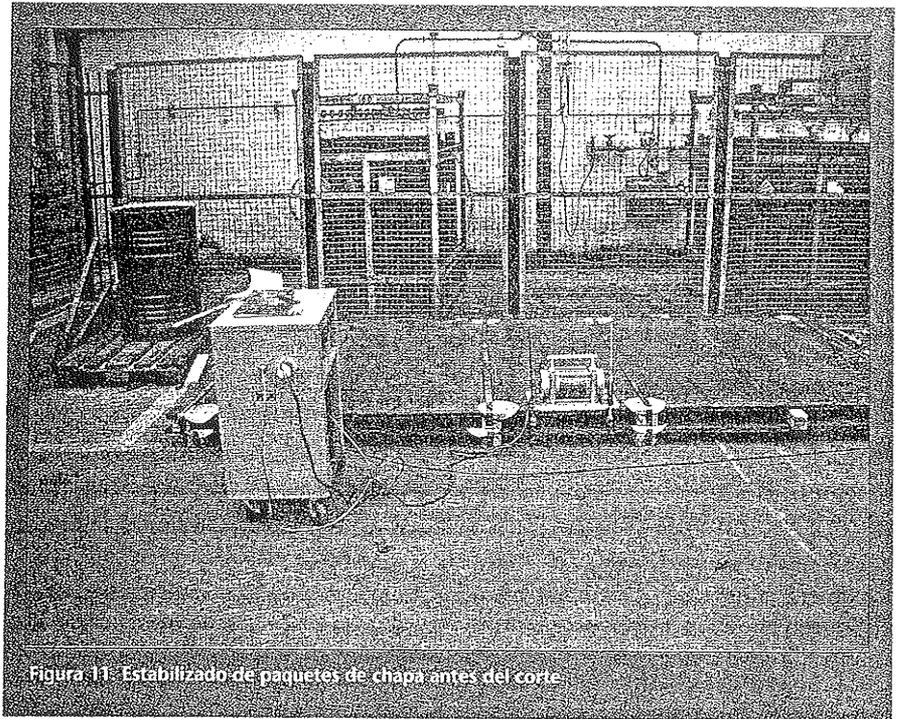


Figura 11. Estabilizado de paquetes de chapa antes del corte

estabilizar una pieza de hasta 10 toneladas de peso. Para piezas mayores se emplearán dos períodos 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 y aplicar de manera

firme el vibrador a la pieza mediante sargentos de apriete, tornillos, etc.

Para piezas pequeñas, de precisión, de fundición y pequeños conjuntos soldados, el F62 incorpora como accesorio, la mesa vibradora Loadmaster 2000. Dispone de una suspensión neumática totalmente

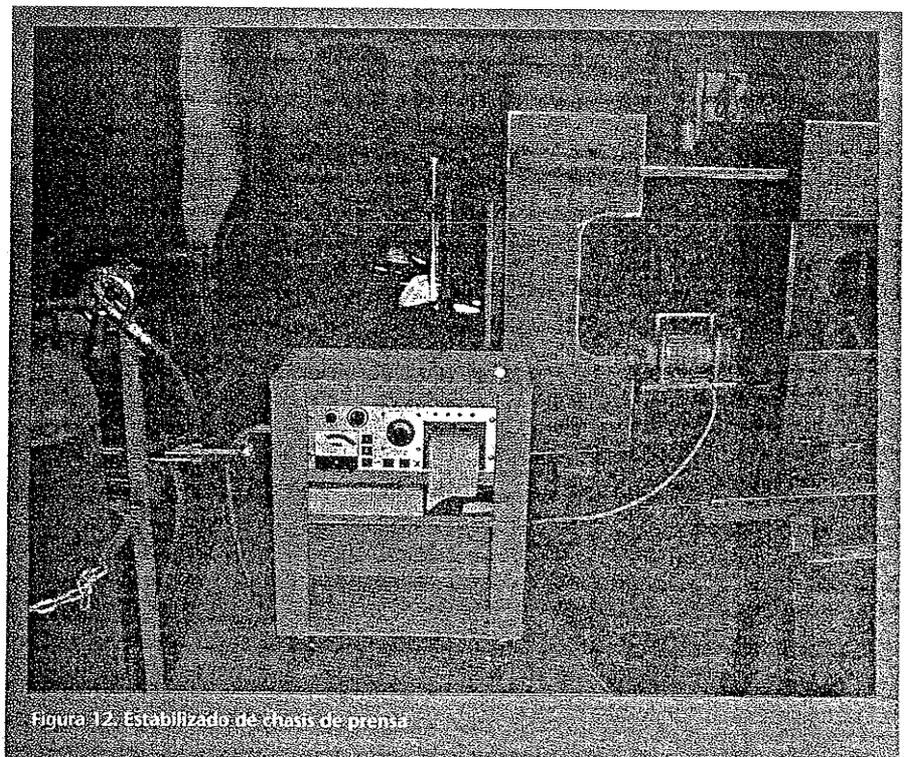


Figura 12. Estabilizado de chasis de prensa

ajustable que le ofrece un excelente aislamiento y que trabaja con el suministro de aire de cualquier taller. El motor se aplica por debajo de la mesa y esta transmite la vibración. La mesa vibradora hace posible el alivio de esfuerzos residuales en moldes, juegos de matrices, pequeños ejes, etc., pudiéndose amarrar varias piezas a la vez durante el mismo tratamiento.

Prestaciones y limitaciones del F62

El proceso de la Fórmula 62 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 frío, extrudidos, endurecidos por deformación plástica, trabajados en frío y materiales endurecidos por solidificación de una fase.

El F62 no puede evitar o eliminar deformaciones o combaduras debidas a los efectos del calor y no alisará ni enderezará piezas. Una de las ventajas más destacadas del estabilizado por vibración es su capacidad para aliviar tensiones en cualquier momento de la etapa de fabricación, como por ejemplo, después del desbastado, el perforado o el rectificado. En la **figura 11** podemos ver la aplicación de vibración a un paquete de chapa recién recepcionado de cara a reducir torsiones tras pasar por la línea de corte.

Para construcciones soldadas, el alivio de esfuerzos se puede realizar durante la soldadura, lo que es de gran ayuda en la

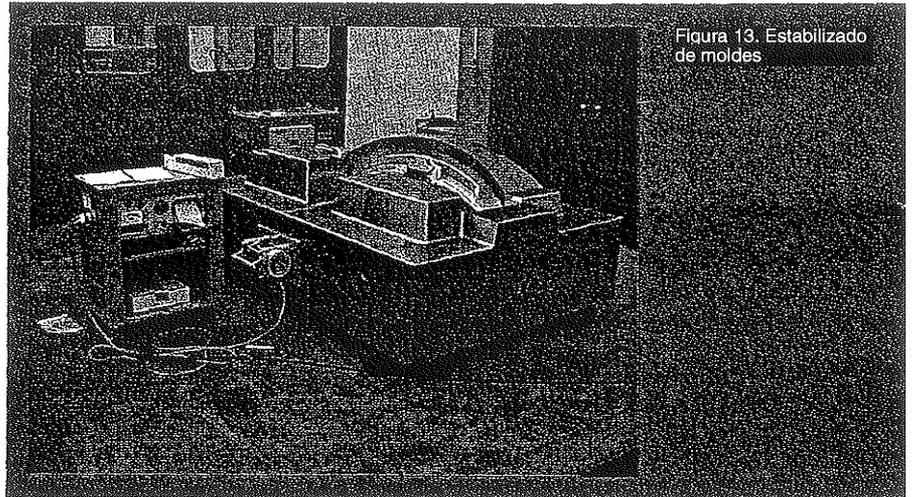


Figura 13. Estabilizado de moldes

prevención de la acumulación de esfuerzos que podrían provocar la quebradura o deformación de algunas secciones. La soldadura produce grandes cambios de temperatura en poco tiempo; si aplicamos vibración mientras soldamos o inmediatamente después del soldeo, atenúamos enormemente las tensiones generadas.

Una alternativa en el alivio de esfuerzos

Ninguno de los tratamientos que existen informa en relación con las tensiones que se han eliminado.

El equipo F62 es un estabilizador de tensiones, una herramienta más del taller; no nos permite el medir tensiones iniciales y tensiones finales. Para medir esfuerzos residuales, hay una serie de métodos más o menos costosos como los rayos-X, por ejemplo.

Tenemos que considerar al F62 como una alternativa al resto de tratamientos pero con una serie de ventajas clave: controlamos el proceso en nuestro propio taller, lo podemos llevar a cabo en cualquier momento del proceso de fabricación y mantenemos las propiedades del material y la pieza dentro de tolerancias.

Si el fabricante sigue llevando las piezas a horno porque siempre se ha hecho así, es necesario un cambio de mentalidad. El ahorro en gastos de transporte va a ser total y el acabado de las piezas va a ser el mi

RIP@L

© 2000

**ABS**

(XX CONSOLDA — Congresso Nacional de Soldagem
De 13 á 15 de setembro de 2004 Rio de Janeiro – RJ

Associação Brasileira de Soldagem

STRESS RELIEF OF WELDS BY HEAT TREATMENT AND VIBRATION: A COMPARISON BETWEEN THE TWO METHODS.

Giovanni S. Crisi (1)

Danila Pedrogan Mendonga (2)

ABSTRACT

Although not yet accepted officially by the American pressure vessels and piping design and construction codes, which continue to require that stress relief of welds be done by heating, the stress relief by vibration has gained considerable popularity over the last years.

The scope of this paper is to make a description of the vibration method, the theoretical principles upon which it is based, its operational procedures and the present "state of the art"

The paper is complemented by an experimental section. Three pieces of pipe were welded, one of which was left "as welded", the second was stress relieved by heating and the third one was stress relieved by vibration. Several coupons were cut off the pipes, to be submitted to tensile, impact and hardness tests and metallurgical analysis.

Finally, the results of the tests are presented, a comparison is made among them and the authors' conclusion is discussed.

Key words: residual stress, stress relief, heat treatment, vibration method

1) Chemical Engineer. Professor at the Mackenzie School of Engineering, Sao Paulo, Brazil

gscrisi@mackenzie.com.br

(2) Materials Engineer. Curitiba, Brazil

1. INTRODUCTION

The existing methods for relieving residual stress from welds are: mechanical, heat and electromagnetic.

The mechanical method may be performed by hammering or vibration. The heat method consist in heating the whole welded piece or each weld, one by one. The electromagnetic method uses the electromagnetic hammer technique.

In the heat treatment the part is heated until the yield point is reduced to less than the residual stress, which in turn causes local plastic distortion, decrease of the residual stress intensity and reduction of hardness.

The vibration method introduces energy into the part by means of vibrations. For the stressed atomic structure there is no difference between the energy introduced through heat and the energy introduced through vibrations. The applied energy reorganizes the crystalline structure, relieving stress and stabilizing the piece, without distortion.

This process is especially useful for stress relieving of big structures, for which the cost of treatment by electrical means would be high, and for parts with severe dimensional tolerances, in which thermal treatment could cause distortions that would exceed them. The vibrators generally used have a frequency band of 0 to 100 Hz. They are connected to the structure, which should be supported on rubber blocks. Frequency is gradually increased until the first resonance is reached. This resonance is maintained for a specific period of time and then the frequency is increased again until the second resonance is reached and so on.

2. SOURCES OF RESIDUAL STRESS

Residual stress in welds is produced by localized metal tensions occurring immediately after welding, which are:

- a) Contraction stress. This is the main source of residual stress. It takes place during the cooling of the welded areas, which have undergone non uniform heating.
- b) Stress due to higher surface cooling. When a weld cools down, the surface cools faster than the inside, even if this cooling occurs in still air. The greater the thickness, the more stress is generated.
- c) Stress due to phase transformation. It occurs due to the transformation of austenite (face centered cube, fcc) to ferrite (body centered cube, bcc), that causes an increase in volume to which the base metal opposes.

The three types of residual stress usually take place at the same time. Experience proves that the individual effects of each one can be linearly superposed.¹

3. EFFECTS OF RESIDUAL STRESS ON WELDS

Among others, the effects of residual stress on welded parts are the following:

- a) Residual stress is added to the load the weld has been designed to support, with can lead to the collapse of the material.

¹ Silveira. José Paulo et. al: Tensões residuais e deformações em soldagem, page 2.15

**ABS**

XXX CONSOLDA — Congresso Nacional de Soldagem
De 13 á 15 de setembro de 2004 Rio de Janeiro – RJ

Associação Brasileira de Soldagem

- b) Reduction of stress corrosion resistance. The regions submitted to elastic tensile stress may suffer localized corrosion in aggressive environments.
- c) Risk of cracks. All cracking mechanisms are affected by residual stress and distortion caused by localized heating. .

4. STRESS RELIEF BY HEAT TREATMENT

Depending on the shape and size of the piece, heat treatment for residual stress relief can be carried out heating the entire piece, or parts of it, in a furnace; or transforming it in a combustion chamber by installing a temporary burner into it, or treating the welds one by one by means of electric resistances. Heating by exothermic kits, which enjoyed some popularity in the sixties and seventies, was abandoned because it did not produce the expected results.

5. STRESS RELIEF BY VIBRATION (VSR)

Based on the weight of the piece, the VSR method introduces into it high amplitude and low frequency vibrations for a given period of time. This relieves residual stress without distortion or alteration of tensile strength, yield point or resistance to fatigue, and the static equilibrium is restored.

The most efficient vibrations are the resonant ones, because in the resonance frequency vibrations redistributes better the stress, if compared with sub-resonant frequency. Low frequency vibrations carry high amplitude energy and are very efficient in the significant decrease of peak residual stress in metallic parts and welds. The equipment usually employed consists of a sturdy vibrator of variable speed which is attached to the piece and an electronic control panel. Both are mounted into a portable cabinet that can be moved around.

Also attached to the piece is an accelerometer that detects vibrations and transmits a signal to the control panel. The resonance point is then determined and displayed on a dial. If the vibrator is equipped with a recorder, a chart can also be obtained.

The point of resonance is attained by varying the frequency of the vibrator until the proper one is reached. Two minutes is the average time required to reach the resonance frequency. At this point, vibration is maintained for a given time, depending on the weight of the piece and its intended application. This time may range from ten minutes to an hour or more, but if it is exceeded, the piece will not suffer any damage due to fatigue or loss of tensile strength.

If structures are very big, long or have open spaces, it may be necessary to apply the procedure in several points.

Some equipment carry out the vibration process automatically. Vibration is maintained for 15 minutes, in a sequence of three different selected frequencies, each lasting five minutes. This setting is efficient to treat pieces weighing up to ten tons. For pieces weighing more than ten tons two consecutive 15 minute periods can be used, without the piece suffering any harm.

Two simple rules should be followed for all applications:

**ABS**

Associação Brasileira de Soldagem

(XX CONSOLDA — Congresso Nacional de Soldagem
De 13 á 15 de setembro de 2004 Rio de Janeiro – RJ

- a) Support the piece in the best possible manner, isolating it from the floor or rigid structures, thus leaving it free to vibrate.
- b) The vibrator should be directly connected to the piece, in order to transfer the whole vibratory energy generated.

The method can be used on a wide range of ferrous and nonferrous metals, including carbon and stainless steel, cast iron, aluminum, titanium etc., in a large variety of shapes. Sizes can vary from small welded parts, shafts and gears, to large welded and machined steel structures. However, it presents some limitations: it is not efficient for extruded, cold worked and precipitation hardened materials.

One of the most important benefits of the use of the VSR method is its capacity to relieve stress at any point of the manufacturing process, such as after machining, snagging, drilling or grinding. In welded parts, stress relief can be performed during welding, which is very useful to prevent concentration of residual stress that may cause warpage of the piece. The method is especially compatible with SMAW, GMAW and GTAW welding processes, popularly known as stick electrode, MIG and TIG. With the other welding processes some logistic problems may arise.

6. MEASURING THE EXTENT OF STRESS RELIEF

Until recently there was no reliable method for the precise measurement of residual stress, not only that originated from welding, but also from forging, cold drawing and other types of metal working. Now, with the use of diffractometry with x-rays, the problem has been solved.

In those days, the only way of checking if residual stress had been reduced to an acceptable level was by analogy with hardness. It is a well known fact that materials get hard when submitted to stress. Experience acquired over the years, upon which the applicable standards are still based, demonstrated that if the hardness measured after stress relief had been performed was lower than a given empiric value, the treatment had been successful.

This condition was especially important if the weld was to be in contact with corrosive environments, as in the chemical industry, for example. It is well known that, depending on the environment, metals show less corrosion resistance if submitted to residual stress.²

This fact is taken into account in ASME/ANSI B 31 Code for Pressure Piping. Section 31.3, used in process industries, among them oil refineries and chemical plants, states the maximum allowable hardness in welds after stress relief, a requirement that does not exist in Section B 31.1, used in power plants, where the possibility of corrosion is much less.

Until very recently, diffractometry by x-rays presented a serious operational problem. The equipment was big enough so that it could not be taken to the point of use, and in many cases the weld could not be taken to the equipment. This situation has been overcome by the development of equipment sufficiently small to be displaced from one place to another.

² Silveira, José Paulo et al.: Op. cit., page 4.13

The applicable codes, however, continue to consider Hardness as the parameter ruling the approval of stress relief, and this is why we have adopted it in the Experimental Section.

7. EXPERIMENTAL SECTION

The experimental part of this study consisted in comparing the results of stress relief performed by heating and by vibration on welds made on the same material, ASTM A 106 grade B carbon steel, whose chemical composition is shown on Table 1. Three 4 inch diameter, schedule 40 pieces of pipe were welded, with the weld located in the middle. The first piece was not submitted to any type of treatment, the second was submitted to heat treatment and the third to VSR. The electrode used was E-6010 for the first pass and E-7018 for the rest. After the welding and before treatment, the pipes were machined to eliminate the weld reinforcement, i.e., to have a flush outer pipe surface.

Table 1: Chemical composition of ASTM A-106 grade B steel

Elements	
Carbon	0,30 max
Manganese	0,29 - 1,06
Phosphorus	0,035 max
Sulfur	0,035 max
Silicon	0,10 max

7.1. Heat Treatment

The heat treatment was carried out in the oven of the Metallurgical Laboratory of Mackenzie School of Engineering, according to Standard ASME / ANSI B 31.3. The heating took place at a maximum speed of 315 °C / h until the soak temperature of 650 °C was reached, at which the pipe was kept for 30 additional minutes. Then, the oven was switched off and allowed to cool with the pipe into it.

7.2. Vibration Stress Relief

A company in the city of Sao Paulo that owns equipment for VSR kindly offered its help, performing the treatment on the sample pipe. The treatment was made according to the equipment's Instructions Manual. The pipe was firmly secured and the frequency of vibration was gradually increased until resonance was reached and maintained for ten minutes. Then, the vibrator was switched off.

7.3. Tensile test

All tests were carried out according to Standard API 1104. Three specimens were cut, one from each pipe, having the dimensions indicated in Table 2. The specimens were clamped in the Amsler machine of the Material Testing Laboratory of Mackenzie School of Engineering, taking them to rupture. The loading rate was 600 N/s (-60 kgf/s). In all cases rupture occurred in the base metal and not in the welds or HAZ. Table 3 shows the information resulting from the tests.

**ABS**XXX CONSOLDA - Congresso Nacional de Soldagem
De 13 á 15 de setembro de 2004 Rio de Janeiro - RJ

Associação Brasileira de Soldagem

Table 2: Dimensions of specimens before tests.

Dimensions	No treatment	VSR	Heat treatment
Width, mm	25,3	25,3	25,3
Length, mm	225,0	225,0	225,0
Thickness, mm	6,25	6,25	6,40
Gage length (Lo), mm	125,0	125,0	125,0

Table 3: Tests results

Measurements	No treatment	VSR	Heat treatment
Yield load kN (kgf)	52,0 (5300)	52,0 (5300)	44,9 (4580)
Maximum load, kN (kgf)	74,7 (7620)	75,9 (7746)	68,6 (7000)
Rupture load kN (kgf)	60,2 (6140)	61,8 (6300)	53,9 (5500)
Gage length (Lf), mm	148,4	148,4	153,9

The tensile tests calculations are shown on Table 4

Table 4: Tensile tests calculations

Parameter	No treatment	VSR	Heat treatment
Yield point MPa (kgf/cm ²)	328,7 (3352)	328,7 (3352)	277,4 (2829)
Maximum stress MPa (kgf/cm ²)	472,6 (4819)	480,4 (4899)	423,9 (4323)
Ultimate tensile stress MPa (kgf/cm ²)	380,8 (3883)	390,7 (3984)	333,1 (3397)
Elongation (%)	18,76	18,74	23,12

7.4 Impact Test

The specimens for the impact test had the same dimensions than those for the tensile test with the addition of two lateral notches on the welding bead, as required by Standard API 1104. The three specimens were submitted to impact test in the Charpy machine, at room temperature, with a 30 kg hammer. None of the specimens broke. Results are shown in Table 5.

Table 5: Impact Test

	No treatment	VSR	Heat treatment
Energy absorbed kJ (kgf.m)	284,4 (29)	285,4 (29,1)	285,2 (29,08)

7.5 Brinell Hardness

Brinell hardness was measured on the three coupons, with a 10 mm diameter ball and a load of 3.000 kgf (30.000 kN). The sizes of the impressions and their corresponding hardness are shown on Table 6.



Table 6: Brinell Hardness

	No treatment	VSR	Heat treatment
Indentation diameter, mm	4,10	4,53	4,45
BHN hardness	217	178	183

7.6. Metallography

After being polished, the specimens were attacked with nital for nearly 5 seconds and their microstructures observed in the metallographic microscope. The results are outlined below.

As expected, the micrographs of the original base metal show an alignment of grains, indicating that the material was manufactured by hot rolling.

The weld is basically constituted by ferrite with a dendritic arrangement, due to the high temperature it supported during the welding process. As carbon also exists, the dark part visible in the micrographs is probably perlite.

On the interface of the weld with the HAZ, dark perlite grains are visible, with ferrite around the grains, forming a net around the perlite. The closer the perlite grains are to the weld the bigger is their size, because they were exposed to higher temperatures than the farther ones.

It was also observed that neither the vibration method nor the heat treatment alter the original metallographic structure of the material.

8. CONCLUSIONS

Firstly, it is noted that, while the specimens that had been heat treated show a decrease in tensile strength and an increase in elongation, as was to be expected, the vibration method practically does not alter those values, for it does not temper, normalize or anneal nor does it modify the mechanical properties of the material.³

Secondly, the energies absorbed in the impact test are practically the same. None of the specimens broke, indicating that the welded material is ductile because it has a considerable amount of ferrite, as can be observed in the micrographs. The decrease in hardness resulting from both treatments was similar, indicating an effective reduction in residual stress.

The conclusion that could be reached would be that heat and vibration methods are equivalent for practical purposes. The authors agree, however, that a test made with only one piece treated with each method is not sufficiently representative to reach valid conclusions. Nonetheless, the authors believe that the preliminary conclusion of this paper can encourage other researchers to further investigate the vibration method of stress relief and those who are involved in welding to seriously consider its implementation. The fact that the American standards, widely used not only in the U.S.A. but also in many other countries, do not formally accept it, raised certain doubts regarding this method. However, the method could be used with a specific piece of material, not designed and/or manufactured according to those standards. It is the case, for example, of the supporting

³ Stress Relief Engineering Co.: Resonant vibration method for reducing residual stresses in welded or machined fabrications, page 5.

**ABS**XXX CONSOLDA — Congresso Nacional de Soldagem
De 13 á 15 de setembro de 2004 Rio de Janeiro — RJ

Associação Brasileira de Soldagem

structure of paper machines, called *Beloit machine* in the paper industry slang. As the structure makes part of the machine itself, the welds do not need to follow standard AWS D.1, as would be the case of the structural steel of a football stadium. Consequently, the machine manufacturer is free to choose the stress relief method most convenient for him, provided that the final quality of the product is maintained. In the case of the Beloit machines, the reason for the choice is clear: the machine must be installed within severe (low) tolerances and stress relief by heat could produce distortions that, even if very small, would exceed the mentioned tolerances. Relief by vibration, on the other hand, does not introduce dimensional changes in the parts.⁴

In some cases, stress relief by vibration may be used as a more convenient option to heat treatment, as for example when the piece is too big to be transported and placed in a furnace. In these cases, the possibility of carrying out the stress relief at site with no need to move the piece is a clear advantage. An example would be a petrochemical tower. On the other hand, pieces in big quantities and easy to handle, as for example prefabricated piping sections, may be conveniently heat treated in batches in a furnace.

9. ACKNOWLEDGEMENTS

The authors wish to thank the following companies:

- Browne Dreyfus International Ltd., of New York city, for the free supply of bibliographic material and other information.
- Promenge Industria e Comercio Ltda., of Sao Paulo, Brazil, for preparing without cost the pipes used in the experimental section.
- Voith Paper Máquinas e Equipamentos Ltda., of Sao Paulo, Brazil, for carrying out the vibratory stress relief of one of the pipes, also free of charge.

10. BIBLIOGRAPHIC REFERENCES

SILVEIRA, José Paulo and MONTEIRO de BARROS, Stenio: "Tensoes residuais e deformaçoes em soldagem_ (Residual stress and distortion in welding)", an internal publication of Petrobrás, Rio de Janeiro, Brazil, undated.

STRESS RELIEF ENGINEERING Co.: "Resonant vibration method for reducing residual stresses in welded or machined fabrications", Costa Mesa, USA, 1990.

KOICHI, M.: "Analysis of welded structures: residual stresses, distortions and their consequences", New York, Pergamon Press, 1980.

BOUHELIER, C.; BARBARIN, P.; DEVILLE, P. and MIEGE, B.: "Vibratory stress relief of welded parts and mechanical relaxation of residual stresses", Philadelphia, L. Mordfin, 1988.

⁴ Stress Relief Engineering Co.: Op. cit., page 5