

Estudio comparativo sobre el alivio de tensiones residuales  
mediante vibraciones (técnica VSR) en comparativa a los  
tratamientos térmicos convencionales

*Comparative study on residual stress relief by vibrations (VSR  
technique) compared to conventional heat treatments*

Trabajo Fin de Grado para la obtencion del titulo de  
Graduado en Ingenieria de los Recursos Energeticos  
DICIEMBRE 2017

AUTOR: Diego Pérez Husillos  
DIRECTOR: Jesús Setién Marquinez  
COORDINADOR: Raúl Husillos Rodríguez



20 de diciembre de 2017

## Agradecimientos

*En primer lugar me gustaría agradecer a mis padres la oportunidad que me han brindado de realizar este Grado, por su apoyo y ayuda durante todos estos años, incluso en los momentos más difíciles.*

*En segundo lugar, al director Jesús Setién Marquínez y al coordinador Raúl Husillos Rodríguez, así como a Pablo Castro Alonso, por su tiempo y dedicación en la supervisión de este trabajo. Sin vuestra ayuda no hubiera sido posible realizar esta investigación.*

*En tercer lugar, a todo el departamento de tratamiento térmicos de ENSA, en especial a Carlos Tazón a Joaquín R. García y a Ricardo Camarero, por enseñarme su profesión.*

*Por último, quiero agradecer a mi pareja, Isabel Sánchez García, por su ayuda siempre que lo he necesitado y su apoyo cuando mi moral estaba baja. También a los demás compañeros y amigos de la Escuela, con los que tan buenos momentos he vivido. A Victor, Alex, Oti, Diego, Pablo I., Marta, Avelinda, Celia, Razvan; a todos muchas gracias.*

20 de diciembre de 2017

## Tabla de contenido

<b>RESUMEN</b>	<b>V</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>VII</b>
<b>1 INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>2 OBJETIVO Y ALCANCE DEL ESTUDIO</b>	<b>3</b>
<b>3 ESTADO DEL ARTE</b>	<b>5</b>
<b>3.1 TENSIONES RESIDUALES</b>	<b>5</b>
3.1.1 DEFINICIÓN	5
3.1.2 ORIGEN DE LAS TENSIONES RESIDUALES	5
3.1.3 LA IMPORTANCIA DE LA METALOGRAFÍA EN LAS TENSIONES RESIDUALES	7
3.1.4 TIPOS DE TENSIONES RESIDUALES	17
3.1.5 FACTORES INFLUYENTES EN LA CREACIÓN DE TENSIONES RESIDUALES	18
<b>3.2 METODOLOGÍA PARA SU MEDICIÓN Y LOCALIZACIÓN</b>	<b>20</b>
3.2.1 INTRODUCCIÓN	20
<b>3.3 METODOLOGÍA PARA LOGRAR LA REDUCCIÓN EN LAS TENSIONES RESIDUALES</b>	<b>30</b>
3.3.1 DURANTE EL CONFORMADO	31
3.3.2 DESPUÉS DEL CONFORMADO	42
<b>4 ESTUDIO POR ELEMENTOS FINITOS EN LAS TENSIONES RESIDUALES GENERADAS</b>	<b>73</b>
<b>4.1 APLICACIÓN A UN CASO REAL</b>	<b>73</b>
4.1.1 OBJETIVO DE LA APLICACIÓN	73
<b>4.2 MODELIZACIÓN DE UNA SOLDADURA ESTÁNDAR</b>	<b>74</b>
4.2.1 JUSTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN TÉCNICA	74
4.2.2 DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO	74
4.2.3 SEGURIDAD	76
4.2.4 CARACTERÍSTICAS DE LOS COMPONENTES QUE INTEGRAN LA MODELIZACIÓN	78
4.2.5 PLANIFICACIÓN DEL PROCESO	80
4.2.6 MANTENIMIENTO	81
4.2.7 PRESUPUESTO	86
<b>4.3 CÁLCULO DE TENSIONES RESIDUALES</b>	<b>87</b>
<b>5 CONCLUSIÓN</b>	<b>96</b>
<b>6 BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>98</b>
<b>7 ANEXOS</b>	<b>99</b>

20 de diciembre de 2017

## Listado de figuras

Figura 1. Ensamblaje total en SolidWorks.....	v
Figura 2. Total assembly in SolidWorks.....	vii
Figura 3. Mecheros de gas que mantienen el gradiente térmico en soldaduras. Fuente: ENSA...	6
Figura 4. Microscopio metalográfico invertido. Fuente: Labolan .....	7
Figura 5. Ensayo de fatiga. Fuente: www,materialesdeusotecnico.com .....	9
Figura 6. Las propiedades térmicas confieren al metal unas cualidades determinadas. Fuente: www.Actiweb.com .....	10
Figura 7. a) Estructura red espacial cubica centrada. b) Estructura red cubica centrada en las caras. c.) Estructura red hexagonal. Fuente: www.britannica.com .....	11
Figura 8. Diagrama Hierro-Carbono. Fuente: Crystec .....	12
Figura 9. Micrografía de la a) ferrita b) cementita c) perlita d) austenita e) martensita. ....	13
Figura 10. Representación en el diagrama de los puntos peritético, eutéctico y eutectoide.y fases presentes. ....	14
Figura 11. Tamaño de grano en una pulgada cuadrada a aumento 100X. ....	16
Figura 12. Variación de la temperatura y las macro tensiones residuales. Fuente: facingycons	17
Figura 13. Alzado en el reparto de calor existente en una soldadura. ....	18
Figura 14. Elementos básicos en la soldadura. ....	18
Figura 15. Tipos de grietas formadas en las soldaduras. Fuente: Ing. Alexander Saavedra.....	19
Figura 16. Límite de fluencia. Diagrama tensión-deformación.....	19
Figura 17. Fotografía del S.S. Schenectady Fuente: Wikipedia .....	20
Figura 18. Galga extensiométrica. ....	21
Figura 19. El espectro electromagnético. Fuente: CSIC.....	22
Figura 20. Desfase en la interacción de los rayos X con los átomos del material a analizar. Fuente: CSIC.....	22
Figura 21. Ley de Bragg. Fuente: CSIC.....	23
Figura 22. Interacción para localizar las tensiones residuales. Fuente CSIC .....	23
Figura 23. Corrientes de Eddy. Fuente: Universidad Tecnológica de Pereira .....	24
Figura 24. Método Hole-drilling. ....	25
Figura 25. MET la tensiones residuales realizado en una soldadura con unión en "T" .....	28
Figura 26. Soldadura automatizada. Fuente: Förster Welding .....	29
Figura 27. Estructura básica en la secuencia de un Grafcet.....	29
Figura 28. Métodos existentes para lograr el alivio de las tensiones residuales. Fuente: Elaboración propia .....	30
Figura 29. Tipos de uniones en soldeo. ....	31
Figura 30. Franja a la que se debe aplicar el SOAK. Fuente: American Society of Mechanical Engineers (ASME) .....	32
Figura 31. Llama de gas natural.....	33
Figura 32. Llama mezcla gas natural con aire.....	34
Figura 33. Cono de llama.....	34
Figura 34. Disposición de mantas eléctricas en función de la soldadura. Fuente: intec-heat ....	35
Figura 35. Transformador para resistencias. Fuente: www.viasimportaciones.cl.....	35
Figura 36. Calentamiento por inducción. ....	36
Figura 37. Transformador de inducción. Fuente: Miller.....	37
Figura 38. Conexionado inducción. Fuente: Miller .....	37
Figura 39. Mecanizado en un torno. ....	38
Figura 40. Partes de un torno convencional. Fuente: Metal tecnología y proceso. ....	39
Figura 41. Fresadora. Fuente: Terratec SAC.....	40
Figura 42. Perforación estándar.....	40

20 de diciembre de 2017

<i>Figura 43. Representación esquemática del perfilado de una chapa. Fuente: IMHE</i> .....	41
<i>Figura 44. Muela convencional.</i> .....	41
<i>Figura 45. Tipos de tratamientos térmicos. Fuente: <a href="https://sites.google.com">https://sites.google.com</a></i> .....	42
<i>Figura 46. Conectores del termopar. Fuente: ENSA</i> .....	43
<i>Figura 47. Termopares tipo K encamisados. Fuente: ENSA</i> .....	44
<i>Figura 48. Diagrama térmico en un recocido convencional.</i> .....	46
<i>Figura 49. Horno industrial</i> .....	47
<i>Figura 50. Vista frontal de un horno convencional. Fuente: ENSA</i> .....	48
<i>Figura 51. Panel de quemadores. Fuente: ENSA</i> .....	49
<i>Figura 52. Interruptores individuales de los quemadores.</i> .....	50
<i>Figura 53. Conjunto de interruptores de los quemadores. Fuente: ENSA</i> .....	50
<i>Figura 54. Registro de quemadores en funcionamiento. Fuente: ENSA</i> .....	51
<i>Figura 55. Registrador junto a croquis. Fuente: ENSA</i> .....	51
<i>Figura 56. Termopares de tipo “K” colocados. Fuente: ENSA</i> .....	52
<i>Figura 57. Gráfica con la temperatura real de los termopares en función del tiempo, Fuente: ENSA</i> .....	52
<i>Figura 58. Reguladores de zona.</i> .....	53
<i>Figura 59. Conjunto de quemador individual. Fuente: ENSA</i> .....	54
<i>Figura 60. Refractario lateral y superior del horno. Fuente: ENSA</i> .....	55
<i>Figura 61. Solera. Fuente: ENSA</i> .....	55
<i>Figura 62. Pieza colocada en la solera. Fuente: ENSA</i> .....	56
<i>Figura 63. Pieza preparada para tratamiento térmico. Fuente: ENSA</i> .....	56
<i>Figura 64. Solera perfil derecha. Fuente: ENSA</i> .....	57
<i>Figura 65. Interruptor puesto en marcha de la solera. Fuente: ENSA</i> .....	57
<i>Figura 66. Pulsadores de avance, retroceso y parada. Fuente: ENSA</i> .....	58
<i>Figura 67. Botonera de avance. Fuente: ENSA</i> .....	58
<i>Figura 68. Cilindros neumático superiores de la puerta. Fuente: ENSA</i> .....	59
<i>Figura 69. Cilindros neumáticos de la puerta. Fuente: ENSA</i> .....	59
<i>Figura 70. Botonera control de la puerta y señalizado de la palanca que ejecutan los cilindros neumáticos. Fuente: ENSA</i> .....	60
<i>Figura 71. Gomas de seguridad. Fuente: ENSA</i> .....	61
<i>Figura 72. Interruptores de los ventiladores. Fuente: ENSA</i> .....	61
<i>Figura 73. Acometida de la entrada de gas. Fuente: ENSA</i> .....	62
<i>Figura 74. Acometida de la entrada de gas. Fuente: ENSA</i> .....	62
<i>Figura 75. Machete que permite la apertura de la conexión general del gas. Esta no se puede accionar si los ventiladores no están en marcha. Paso Nº10. Fuente: ENSA</i> .....	62
<i>Figura 76. Conexión del registrador analógico. Fuente: ENSA</i> .....	63
<i>Figura 77. Conexión del registrador digital. Fuente: ENSA</i> .....	63
<i>Figura 78. Paso de agua para la refrigeración de la chimenea. Fuente: ENSA</i> .....	64
<i>Figura 79. Croquis de la pieza a tratar. Fuente: Elaboración propia</i> .....	64
<i>Figura 80. Horno de resistencias. Fuente: Vulka.es</i> .....	65
<i>Figura 81. Máquina VCM 905 (Distensionado por vibraciones). Fuente: ENSA</i> .....	66
<i>Figura 82. Acelerómetro. Fuente: ENSA</i> .....	67
<i>Figura 83. Tacos de goma. Fuente: ENSA</i> .....	68
<i>Figura 84. Sargenta. Fuente: ENSA</i> .....	68
<i>Figura 85. Detalle del utillaje creado fijador para la fijación de la pieza. Fuente: ENSA</i> .....	69
<i>Figura 86. Modelización soldadura. Elaboración propia</i> .....	74
<i>Figura 87. Grafset secuencia. Fuente: Elaboración propia</i> .....	75
<i>Figura 88. ABB bullseye</i> .....	80
<i>Figura 89. Ensamblaje total en SolidWorks</i> .....	85

20 de diciembre de 2017

<i>Figura 90. Pieza soldada</i> .....	87
<i>Figura 91. Base de la pieza soldada</i> .....	88
<i>Figura 92. Pieza superior de la soldadura</i> .....	88
<i>Figura 93. Tipología en los archivos Cad</i> .....	89
<i>Figura 94. Mallado estructural en la pieza soldada</i> .....	89
<i>Figura 95. Características del mallado</i> .....	90
<i>Figura 96. Elección del material en el mallado</i> .....	92
<i>Figura 97. Asignación del material a la pieza soldada</i> .....	93
<i>Figura 98. Presión ejercida a la pieza soldada</i> .....	93
<i>Figura 99. Von Mises estrés en el caso de efectuar el distensionado por vibración</i> .....	94
<i>Figura 100. Variaciones en el caso del tratamiento térmico</i> .....	95
<i>Figura 101. Von Mises estrés en el caso de efectuar el tratamiento térmico</i> .....	95

## Listado de tablas

<i>Tabla 1. Conclusiones entre ambas técnicas</i> .....	vi
<i>Tabla 2. Summary of the differences between the two techniques</i> .....	viii
<i>Tabla 3. Nomenclatura en el Grafcet</i> .....	76
<i>Tabla 4. Características brazo robótico IRB 1600</i> .....	78
<i>Tabla 5. Características brazo robótico IRB 1600ID</i> .....	79
<i>Tabla 6. Procedimiento a seguir para el mantenimiento de la estación</i> .....	81
<i>Tabla 7. Procedimiento a seguir para el mantenimiento de la estación</i> .....	82
<i>Tabla 8. Procedimiento a seguir para el mantenimiento de la estación</i> .....	83
<i>Tabla 9- Procedimiento a seguir para el mantenimiento de la estación</i> .....	84
<i>Tabla 10. Conclusiones entre ambas técnicas</i> .....	97

20 de diciembre de 2017

## Resumen

En el sector industrial, la siderurgia es un pilar clave de la economía con unas competencias cada vez más disputadas, obligando a las compañías a invertir en I+D+i, para el impulso de nuevas técnicas, que supongan un ahorro significativo en el producto manufacturado.

Estudiar las nuevas técnicas que permitan cambiar las maneras de actuar en la producción de un elemento puede ser, definitivamente, la causa que suponga un adelanto importante ante los competidores del sector.

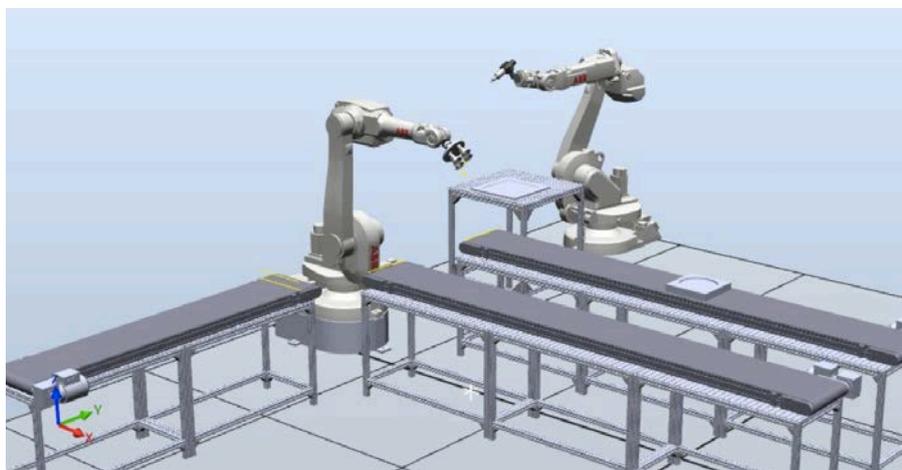
Este estudio tiene como uno de sus objetivos principales el análisis de una tecnología en vías de desarrollo (*Vibratory Stress Relief VSR*), y determinar su potencial y efectividad ante la disminución de las tensiones residuales, en comparativa a los tratamientos térmicos.

El problema radica en que estas tensiones residuales de un material son las tensiones existentes en él cuando no hay carga externa, luego entraña una labor realmente compleja estimar su valor y localización.

No se ha determinado aún, si estas técnicas para el alivio de tensiones pueden ser complementarias o incluso sustitutivas, así como el grado de éxito existente en dicho proceso ya que, de ser así, tendría una repercusión importante en el ámbito económico en cuanto al proceso de manufacturación.

Para poder equiparar ambas técnicas es necesario controlar todas las variables existentes, que entrañan los procesos en la manufactura, así como la soldadura o mecanizado, para obtener una pieza de similares cualidades, y que la comparativa sea óptima desde el principio.

Por esto último, se procederá a modelar en SolidWorks una estación de soldadura por arco de un cupón, para siempre obtener las mismas cualidades de la misma y que la comparativa no se vea afectada por las posibles variables que se puedan manifestar en la propia soldadura.



**Figura 1. Ensamblaje total en SolidWorks.**

20 de diciembre de 2017

Una vez automatizada la soldadura, se procede a realizar un análisis comparativo de los métodos de reducción de tensiones residuales de la soldadura estándar como hipótesis de partida.

Para realizar el estudio por elementos finitos, tras contrastar mucha documentación que afirma que mientras las muestras que habían sido tratadas con calor reflejan una disminución de la resistencia a la tensión y un aumento de la elongación, como era de esperar, el método de vibración prácticamente no altera esos valores, no se templan, normalizan o endurecen por calor ni modifica las propiedades mecánicas del material.

Por esto último, la comparativa en estudio por elementos finitos, tendrá un mismo mallado, ya que la pieza es la misma, pero con un módulo de elasticidad menor en caso del tratamiento térmico en comparativa al VSR.

VSR 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. No he tenido acceso a esta técnica ya que sería la más óptima para hacer este estudio.

El distensionado por vibración es una técnica que no se puede manifestar como una alternativa al resto de tratamientos, pero presenta una serie de ventajas clave en relación a los tratamientos térmicos, ya que se puede llevar a cabo en cualquier momento del proceso de fabricación, manteniendo las propiedades del material y la pieza dentro de tolerancias.

A continuación, se exponen a grandes rasgos las diferencias existentes entre ambas técnicas:

**Tabla 1. Conclusiones entre ambas técnicas.**

<b>Método</b>	<b>Alivio de tensiones residuales por tratamiento térmico</b>	<b>Alivio tensiones residuales por distensionado por vibración</b>
<b>Tiempo</b>	Alto (Horas incluso días)	2 horas como máximo
<b>Automatización</b>	Muy alto grado de automatización	Potencialmente alto
<b>Espacio utilizado</b>	Grande	Pequeño
<b>Movilidad</b>	Elevado, necesarias infraestructuras para el transporte	Poca o ninguna
<b>Costes</b>	Equipos : Muy elevado	Equipos: Bajo
<b>Efectos medioambientales</b>	Dependiendo el tipo de horno, normalmente altos	Bajos

20 de diciembre de 2017

## Abstract

In the industrial sector, the steel industry is a key pillar of the economy with increasingly contested skills, forcing companies to invest in R & D, to promote new techniques, which mean significant savings in the product manufactured.

To study the new techniques that allow to change the ways of acting in the production of an element can be, definitely, the cause that supposes an important advance before the competitors of the sector.

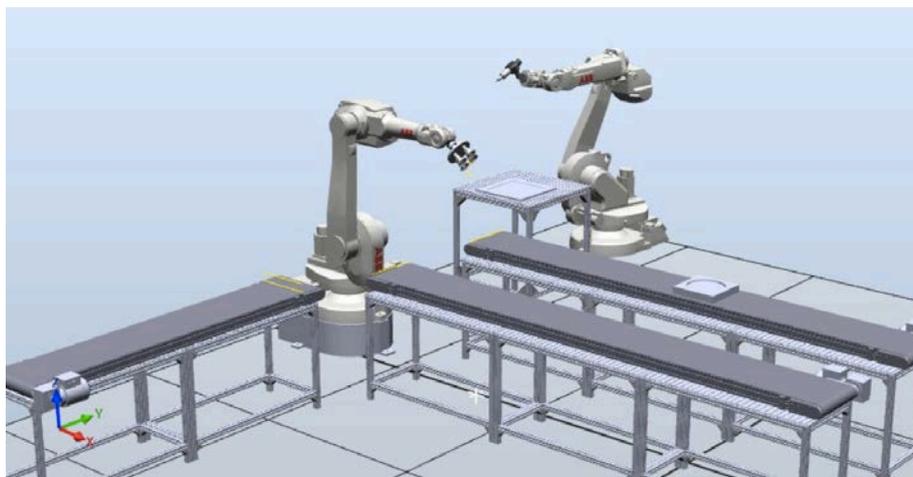
This study has as one of its main objectives the analysis of a technology under development (Vibratory Stress Relief VSR), and determine its potential and effectiveness in the reduction of residual stresses, in comparison to the thermal treatments currently in use.

The problem is that these residual stresses of a material are the tensions in it when there is no external load, then involves a really complex task to estimate its value and location.

It has not yet been determined whether these techniques for the relief of tensions can be complementary or even substitute, as well as the degree of success in that process since, if so, it would have a significant impact on the economic environment in terms of the process of manufacturing.

To be able to equate both techniques it is necessary to control all the existing variables, which involve manufacturing processes, as well as welding or machining, to obtain a piece with similar qualities, and that the comparison is optimal from the beginning.

For this last, we will proceed to model in SolidWorks a welding station by arc of a coupon, to always obtain the same qualities of the same and that the comparison is not affected by the possible variables that may manifest in the welding itself.



**Figura 2. Total assembly in SolidWorks.**

Once the welding is automated, a comparative analysis of the residual stress reduction methods of the standard welding is carried out as a starting hypothesis.



20 de diciembre de 2017

To carry out the study by finite elements, a lot of documentation has been contrasted which states that while the samples that had been treated with heat reflect a decrease in the resistance to tension and an increase in elongation, as expected, the vibration method practically does not alter these values, they are not tempered, normalized or hardened by heat or modify the mechanical properties of the material.

For this last, the comparison in study by finite elements will have the same meshing, since the piece is the same, but with a lower modulus of elasticity in the case of thermal treatment in comparison to the RSV.

VSR is a voltage stabilizer, another tool in the workshop; it does not allow us to measure initial tensions and final tensions. To measure residual stresses, there are a number of more or less expensive methods such as x-rays. I have not had access to this technique since it would be the most optimal to do this study.

The relaxation by vibration is a technique that can not be manifested as an alternative to other treatments but presents a number of key advantages in relation to thermal treatments, since it can be carried out at any time of the manufacturing process, maintaining the material and part properties within tolerances.

The following is a summary of the differences between the two techniques:

**Tabla 2. Summary of the differences between the two techniques.**

<b>Method</b>	<b>Method Relief of residual stresses by thermal treatment</b>	<b>Relief of residual stresses by vibration relaxation</b>
<b>Tiempo</b>	High (Hours even days)	2 hours maximum
<b>Automatización</b>	Very high degree of automation	Potentially high
<b>Espacio utilizado</b>	Big	Small
<b>Movilidad</b>	High mobility, necessary infrastructures for transport	Little or not
<b>Costes</b>	Very high Equipment	Low
<b>Efectos mediambientales</b>	Depending on the type of oven, normally high	Low

20 de diciembre de 2017

# 1

## Introducción

Se presenta, de manera escueta, la evolución a lo largo del tiempo del sector de la metalurgia y la siderurgia, su importancia en el contexto económico y las problemáticas a las que se enfrenta actualmente.

Hasta finales de la Segunda Guerra Mundial, las roturas sorprendidas en elementos producidas por fallos en los aceros, estaba a la orden del día, desde barcos resquebrajados por la mitad, alas de aviones y demás arsenal de guerra.

En las siguientes décadas, se estudió el comportamiento del acero y sus tipologías, hallando unas micro tensiones residuales en el material producidas por la manufactura o conformado del metal.

En las últimas décadas muchos estudios han aclarado por qué se producen este tipo de micro roturas dentro del material, mejorando el rendimiento de los productos fabricados, aumentando notablemente su vida útil y calidad. Esto significa un mayor beneficio ya que se aumenta el ciclo de vida de los productos creados.

Invertir en I+D+i, está a la orden del día por las grandes empresas del sector, ya que lograr una buena patente de alguna técnica novedosa y eficaz, puede significar entrar en un mercado muy competitivo en nuestros días.

Las micro tensiones residuales producidas en este tipo de materiales pueden ser reducidas mediante varias técnicas tanto antiguas como novedosas.

Se sabe que los Egipcios, para cortar los bloques de caliza para la construcción de mastabas o pirámides, utilizaban tratamientos térmicos. Este tipo de técnica es la más utilizada hoy en día, para aliviar las tensiones residuales, pero esto requiere hacer una fuerte inversión ya que se deben construir hornos de gas de grandes capacidades, repercutiendo económicamente al precio final de la pieza.

Tras la crisis del 2008, todos los sectores se vieron afectados económicamente, esto hizo que se replanteasen todas las técnicas en la cuales la inversión fuese elevada, y ciertas empresas se fijaron en los costosos hornos. En este periodo, se estudió la efectividad de otras técnicas que pudieran competir con los altos precios que requiere construir toda la infraestructura de los hornos.

Una vez realizada la recopilación bibliográfica, se espera evaluar una técnica de origen Inglés, (“distensionado por vibración”), para aliviar tensiones residuales que no posee más de 50 años, en la cual, la efectividad no está muy estudiada, y no se sabe si puede ser complementaria o sustitutiva a los tratamientos térmicos. La problemática recae en cuantificar la efectividad en la eliminación de las tensiones



20 de diciembre de 2017

residuales tras un tratamiento térmico o tras un distensionado por vibración, ya que ningún estudio ha logrado cuantificarlas.

20 de diciembre de 2017

# 2

## Objetivo y alcance del estudio

Se define de forma clara y unívoca el objetivo que se persigue con el presente estudio, así como el alcance del mismo, especificando los métodos y características a tener en cuenta para su consecución.

En el sector industrial, la siderurgia es un pilar clave de la economía con unas competencias cada vez más disputadas, obligando a las compañías a invertir en I+D+i, para el impulso de nuevas técnicas, que supongan un ahorro significativo en el producto manufacturado.

Es la causa por la cual se requiere la inversión de mucho capital procedente de las ganancias obtenidas en la manufacturación del producto, para así desarrollar nuevas técnicas que permitan ser competitivos en una industria que avanza a un ritmo muy exigente.

Estudiar las nuevas técnicas que permitan cambiar las maneras de actuar en la producción de un elemento puede ser, definitivamente, la causa que suponga un adelanto importante ante los competidores del sector.

Este estudio tiene como uno de sus objetivos principales el análisis de una tecnología en vías de desarrollo (*Vibratory Stress Relief VSR*), y determinar su potencial y efectividad ante las tensiones residuales.

El problema radica en que estas tensiones residuales de un material son las tensiones existentes en él cuando no hay carga externa, luego entraña una labor realmente compleja estimar su valor y localización. Mediante este estudio se pretenden analizar las metodologías existentes para el alivio de tensiones residuales por la vía térmica o revenido, en comparativa al alivio de tensiones mediante esta novedosa técnica VSR.

Determinar el grado de alivio de tensiones residuales provocadas por las soldaduras durante la fabricación de elementos constituyentes para centrales nucleares es un factor muy importante a tener en cuenta para la construcción, dada la alta seguridad y precisión que entraña este tipo de instalaciones.

De los dos métodos existentes, el más utilizado en la industria es el tratamiento térmico, que consiste en calentar la soldadura hasta una temperatura menor a la de transformación y mantener dicho valor un tiempo, hasta que sea uniforme en toda la pieza, con las mismas propiedades y se efectúen los reajustes dimensionales necesarios para establecer el estado de equilibrio a los nuevos valores de la tensión de fluencia. Su convencional aplicación implica construir hornos de importante tonelaje muy costosos y con importantes gastos en recursos energéticos.



20 de diciembre de 2017

El segundo método (técnica VSR) consiste en hacer vibrar la pieza mediante un motor que actuará como vibrador con velocidad variable regulado por un potenciómetro. Además, contendrá un acelerómetro (transductor) que registra el flujo de frecuencia a través de la pieza de trabajo. Variando la velocidad se buscará la frecuencia de resonancia necesaria que variará según el peso del elemento a tratar. Con este método la energía vibratoria reorganiza la estructura de la red cristalina aliviando las tensiones residuales.

La problemática resurge en que esta última metodología no se ha determinado aún si puede ser complementaria o incluso sustitutiva en el alivio de tensiones residuales, así como el grado de éxito existente en dicho proceso ya que, de ser así, tendría una repercusión importante en el ámbito económico en cuanto al proceso de manufacturación.

Este estudio tiene como objetivo, analizar estas metodologías y encontrar las posibles variables que puedan modificar el resultado tanto en el tratamiento térmico convencional como en el distensionado por vibración y comparar las características de ambas técnicas en una amplia conclusión.

Para poder equiparar ambas técnicas es necesario controlar todas las variables existentes, que entrañan los procesos en la manufactura, así como la soldadura o mecanizado, para obtener una pieza de similares cualidades, y que la comparativa sea óptima desde el principio.

Por esto último, se procederá a modelar en SolidWorks una estación de soldadura por arco de un cupón, para siempre obtener las mismas cualidades de la misma y que la comparativa no se vea afectada por las posibles variables que se puedan manifestar en la propia soldadura.

20 de diciembre de 2017



## Estado del arte

Se realiza una exhaustiva investigación documental en relación a las tensiones residuales, determinando su origen y aquellos factores que favorecen su aparición. De forma complementaria, se estudian las metodologías existentes en relación a la medición y localización de las tensiones residuales, así como, aquellas que logren su reducción.

### 3.1 Tensiones residuales

#### 3.1.1 Definición

Las tensiones residuales se pueden definir como los esfuerzos que existen en el material en ausencia de cualquier carga externa existente. La problemática recae en que estas tensiones están conformadas en el interior de la pieza, lo que su localización y posterior medición es una labor que entraña una cierta dificultad.

El mayor problema de las tensiones residuales reside en que son difíciles de medir, al contrario que las tensiones externas que son fácilmente cuantificables. Por norma general las tensiones residuales no suelen ser tomadas en cuenta cuando se diseña una pieza pudiendo repercutir directamente en la vida de la misma.

Estas tensiones residuales son generadas por varias causas de distinta índole, provocando deformaciones plásticas locales que requieren ser localizadas para su posterior corrección.

Es importante definir bien este tipo de tensiones ya que influirán de una manera directa la vida del elemento conformado, luego es un factor importante para definir las garantías que se pueden llegar a ofrecer al cliente dependiendo de las necesidades que tenga que cubrir dicho elemento.

En la actualidad este tipo de tensiones residuales requieren ser calculadas mediante ensayos destructivos, luego la pieza resultará inservible y será una mera comprobación para saber las cualidades que tendrá la réplica de la primera.

#### 3.1.2 Origen de las tensiones residuales

La tensión o estrés residual sucede durante el proceso de fabricación de materiales, o puede acumularse al paso de los años. De cualquier manera, la tensión puede tener efectos negativos bastante serios en cuanto a la calidad del producto, su durabilidad, y vida.

La detección precisa la tensión residual es un elemento importante del proceso de control de calidad, y ayuda a predecir la vida de servicio de los productos,

20 de diciembre de 2017

ya que esta repercute de manera directa a la rotura por fatiga, fractura frágil y a la corrosión bajo tensión.

Estas tensiones residuales son generadas por los procesos de conformado más comunes que existen en la industria metalúrgica. Los procesos de soldadura, mecanizado, moldeado, incluso los propios tratamientos térmicos pueden ser la causa principal de generar estas tensiones residuales durante la manufacturación del producto.

El mismo calor de la soldadura puede provocar deformaciones plásticas incidiendo de manera directa en los cambios estructurales de la pieza, luego puede ser un origen notable en la creación de estas tensiones residuales, a la vez que también lo es, el enfriamiento de la misma soldadura si se efectúa bajo un gradiente térmico elevado.



**Figura 3. Mecheros de gas que mantienen el gradiente térmico en soldaduras. Fuente: ENSA**

Otra etapa en la que se pueden originar nuevas tensiones residuales internas es durante la vida útil de la estructura, ya que por procedimientos o sobrecargas del montaje pueden afectar negativamente a las mismas. Incluso el mismo asentamiento

20 de diciembre de 2017

de la estructura en el terreno puede tener connotación negativa generando nuevas tensiones y afectando a la vida útil del material.

### 3.1.3 La importancia de la metalografía en las tensiones residuales

#### 3.1.3.1 *Análisis metalográfico.*

La Metalografía es la rama de la metalurgia que estudia la estructura de un metal o aleación y la relaciona con la composición química y con las propiedades mecánicas y físicas. Este estudio es llevado a cabo con la aplicación de diversas y variadas técnicas especiales.

Es importante definir las propiedades metálicas ya que definen el comportamiento del metal cuando se somete a esfuerzos o cargas.



**Figura 4. Microscopio metalográfico invertido. Fuente: Labolan**

Estas **propiedades mecánicas** especiales son:

**Resistencia:** Capacidad de un metal para soportar las fuerzas aplicadas. Las vigas de los puentes, los cables de los ascensores y los pilares de los edificios deben gozar de esta propiedad.

**Dureza:** Aptitud de un metal para resistir la penetración o perforación. Cuanto más duro es el metal menos probabilidad existe de que cambie de forma. La dureza puede incrementarse mediante endurecimiento o tratamientos térmicos, método utilizado para aliviar las tensiones residuales.

**Fragilidad:** Tendencia de un metal a romperse. Algunas clases de hierro fundido son frágiles y quebradizas al caerse. La dureza y la fragilidad guardan una relación estrecha, ya que los metales duros son más frágiles que los blandos.

**Maleabilidad:** Capacidad de un metal para ser golpeado con un martillo o laminado sin romperse o fracturarse.

**Ductilidad:** Aptitud del metal para estirarse sin romperse. El cobre es muy dúctil y, por ello, se convierte fácilmente en alambre.

**Elasticidad:** Potencial del metal para recuperar su forma original después de haber sido doblado. Es el ejemplo del acero que se utiliza para la creación de muelles.



20 de diciembre de 2017

**Plasticidad:** Aptitud de un material de mantener su nueva forma después del conformado.

**Fusibilidad:** Capacidad de un material de convertirse fácilmente en fluido y unirse con otros metales. Los metales que funden con facilidad con facilidad suelen tener esta propiedad.

**Maquinabilidad:** Esta cualidad comprende varias propiedades como la velocidad a la que puede extraerse la viruta al someterle a trabajos con máquinas, clase de esquila producida, cantidad de desgaste por herramienta y tipo de acabado que puede obtenerse.

**Punto de fusión:** Temperatura a la que un material se convierte en líquido. En la fabricación de productos no se usan demasiados metales puros, sino que se prefieren aleaciones, entendidas como un todo material que contiene dos o más elementos metálicos. Las aleaciones resultan más útiles porque no tienen un punto de fusión exacto sino un intervalo de fusión, siendo importante por los siguientes motivos:

Ayuda a determinar la temperatura máxima útil de trabajo de aleación. Cuando un metal se aproxima a la temperatura de fusión, su resistencia disminuye rápidamente.

Los técnicos de metales deben escoger una temperatura situada por debajo del intervalo de fusión para realizar operaciones como el reblandecimiento de un material mediante temple o su calentamiento para los procesos del tipo forja.

Los especialistas en metalurgia deben conocer el intervalo de fusión para aprender a usar la aleación con mayor eficacia, o para mejorarla y producir combinaciones de mejores metales.

**Tenacidad:** Potencial de absorber la energía aplicada mecánicamente. Está determinada por la resistencia y la ductilidad del material. Los metales tenaces son necesarios para objetos como vagones de ferrocarril o ejes de automóviles.

**Plastificación :** Deformación irrecuperable de la probeta, a partir de la cual sólo se recuperará la parte de su deformación correspondiente a la deformación elástica, quedando por tanto una deformación irreversible. Este fenómeno se sitúa justo por encima del límite elástico

Pero no solamente se deben mencionar las propiedades físicas ya que las tensiones residuales pueden alterar las propiedades mecánicas de resistencia del material.

Las **propiedades de resistencia** de los metales son:

**Resistencia a la flexión:** Es una medida de la capacidad de carga de los elementos estructurales horizontales entre dos soportes. Algunos ejemplos de elementos sujetos a fuerzas de flexión son las juntas, las vigas y los travesaños.

**Resistencia a la compresión:** Ofrece una medida de la capacidad de transportar cargas en el sentido longitudinal de un elemento sin sufrir deformación. La rigidez y la resistencia a la compresión influyen en la capacidad de la carga.

20 de diciembre de 2017

**Rigidez:** Medida de la resistencia a la deflexión elástica. Así, la rigidez de una viga es proporcional a su anchura y también al cubo de su profundidad.

**Resistencia a la cizalla:** Resistencia interna que desarrolla un cuerpo como respuesta a una fuerza cortante y que es tangencial a la superficie sobre la que actúa.

**Resistencia a la torsión:** Aptitud del material para resistir fuerzas de giro.

**Resistencia a la fatiga:** Aptitud del metal para resistir cargas variables sin romperse. Estas cargas aparecen, por ejemplo, en golpes que sufren las alas de los aviones y el empuje y la retirada que siguen las bielas de los motores de émbolo. Estas acciones de vaivenes bruscos y apariciones y retiradas repentinas de fuerzas reciben el nombre de cargas cíclicas.

Durante la vida útil de máquinas que se mueven rápidamente y piezas sujetas a vibraciones importantes, los cambios de carga pueden producirse miles de millones de veces.

Se atribuye a la fatiga de los metales un buen número de las averías observadas en los equipos y piezas. En los ensayos de fatiga, el fallo es siempre una fractura por un punto frágil. Se llama *duración o vida de fatiga* al número de ciclos que puede resistir un material para una tensión específica sin averiarse.

Existen numerosas variantes de ensayos de fatiga que dependen del tipo de carga aplicada y de la forma de la muestra. Una de las más comunes es la llamada ensayo de voladizo, que utiliza la máquina de ensayo Krouse en chapas, tiras y planchas finas. Un extremo de la muestra se sujeta rígidamente, mientras que el otro tiene la libertad de movimiento. El lado libre de la muestra se mueve arriba y abajo por la acción de una leva, hasta que aparece la fatiga y la muestra termina por romperse. La tensión y el número de ciclos se registran automáticamente.

Normalmente, la resistencia se refiere a una fuerza que actúa sobre una pieza de metal y que tiende a modificar la forma del material. Las fuerzas pueden ser de tensión, compresión, cizalla y torsión. Así, la tensión aparece cuando las fuerzas tienden a alargar la pieza, la compresión resulta de una contracción o aplastamiento, cizalla es el encuentro de dos fuerzas opuestas que confluyen en un punto y la torsión es una tensión de giro.

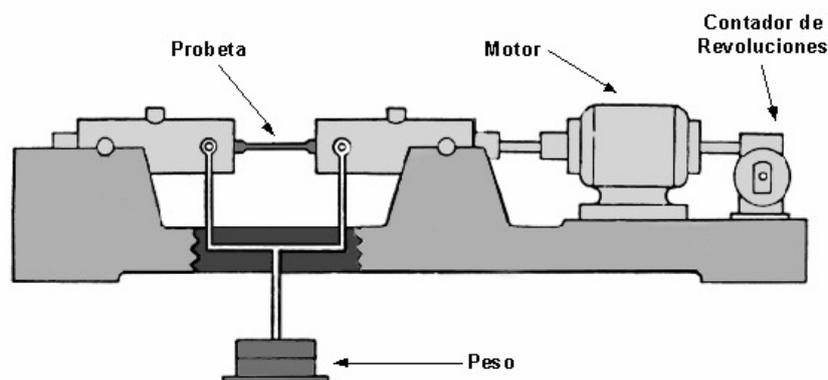


Figura 5. Ensayo de fatiga. Fuente: [www.materialesdeusotecnico.com](http://www.materialesdeusotecnico.com)

20 de diciembre de 2017

La rotura por fatiga tiene aspecto frágil aún en metales dúctiles, puesto que no hay apenas deformación plástica asociada a la rotura. El proceso consiste en un inicio y posterior propagación de fisuras, que crecen desde un tamaño inicial microscópico hasta un tamaño macroscópico capaz de comprometer la integridad estructural del material. La superficie de fractura es perpendicular a la dirección del esfuerzo. Aunque es un fenómeno que, sin definición formal, era reconocido desde antiguo, este comportamiento no fue de interés real hasta la Revolución Industrial, cuando, a mediados del siglo XIX comenzaron a producirse roturas en los ejes de las ruedas de los trenes, que pugnaban, por aquel entonces, por imponerse como medio de locomoción.

Este tipo de resistencia tiene una gran importancia en el estudio, puesto que las tensiones residuales originadas pueden conllevar pequeñas fisuras que originen fatiga.

Existen otras categorías de propiedades en los materiales, referidas a cualidades interesantes que pueden tener gran trascendencia.

Estas cualidades son:

**Propiedades magnéticas:** Están relacionadas con las fuerzas eléctricas y magnéticas. Algunos metales son atraídos por imanes y otros no. Ciertas aleaciones de acero con alto contenido en carbono conservan un magnetismo y se usan para fabricar imanes permanentes.

**Propiedades químicas:** Resistencia existente en un material contra la oxidación o corrosión. Importante cualidad que debe ser tomada en cuenta cuando se trabaja con materiales expuestos a las duras condiciones del mar o en atmósferas industriales.

**Propiedades térmicas:** Relativas al efecto de la temperatura en los metales. La mayoría de los metales conducen bien el calor que, por otra parte, provoca su expansión.



Figura 6. Las propiedades térmicas confieren al metal unas cualidades determinadas. Fuente: [www.Actiweb.com](http://www.Actiweb.com)

20 de diciembre de 2017

**Propiedades eléctricas:** Determinan la conductividad y la resistencia a las cargas eléctricas.

**Propiedades acústicas:** Debido a esta cualidad, muchos metales se recubren con materiales aislantes para reducir el eco o la reflexión acústica. Esta propiedad está relacionada con la transmisión y reflexión del sonido.

**Propiedades ópticas:** Miden la reacción de los metales ante la luz.

Es importante mencionar estas propiedades porque influyen en las posibles variables en el proceder a llevar a cabo en nuestro estudio.

### 3.1.3.2 *Redes cristalinas*

Cada cuerpo está compuesto por moléculas, y las moléculas de átomos. Los cuerpos en los cuales los átomos están de manera desordenada, sin ningún sistema, se llaman amorfos, tales como el vidrio o la resina. Las propiedades físicas de estos elementos son iguales en todas las direcciones.

Por el contrario, en el cuerpo cristalino, los átomos están agrupados en un orden definido y se pueden encontrar propiedades físicas muy distintas en diversas direcciones, luego se puede decir que el cuerpo cristalino es anisótropo.

Los metales poseen un cuerpo cristalino, pero existen diferentes tipos de redes cristalinas.

**La red espacial cubica centrada:** Es un cubo centrado, compuesto de nueve átomos, ocho de los cuales se hallan en los vértices y uno en el centro.

**La red cubica centrada en las caras:** El cristal elemental de esta red consta de 14 átomos; ocho átomos se hallan en los vértices del cubo y uno en el centro de cada cara del cubo.

En los metales, además de las redes cubicas, está ampliamente difundida la **red hexagonal** cuyo cristal elemental no es una celdilla hexagonal sencilla, sino una celda hexagonal compacta en donde, además de los átomos que se encuentran en los vértices y en los centros de las bases hexagonales, hay tres átomos dentro de la celdilla.

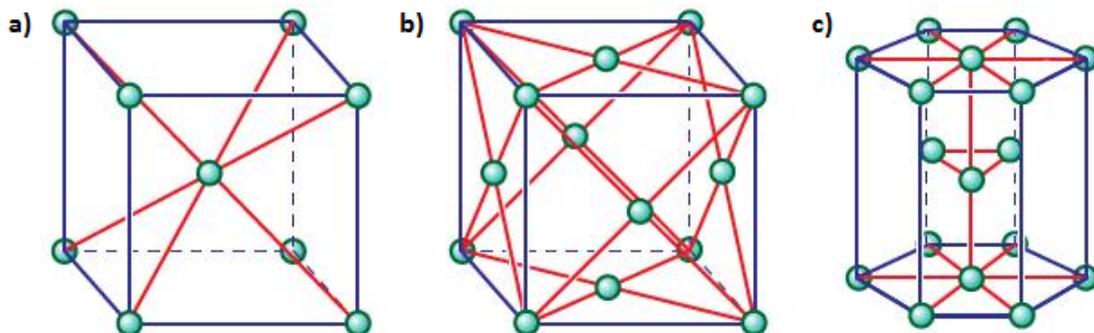


Figura 7. a) Estructura red espacial cubica centrada. b) Estructura red cubica centrada en las caras. c.) Estructura red hexagonal. Fuente: [www.britannica.com](http://www.britannica.com)

La peculiaridad esencial de la estructura de la red cristalina, además de su parámetro, es el número de átomos vecinos equidistantes a cualquier átomo en la

20 de diciembre de 2017

red. A este número se le conoce como número de coordinación. Cuanto más elevado sea este valor más compacto será nuestro elemento.

El enlace entre los átomos en la red cristalina es el carácter por excelencia en los metales, es decir, que los átomos que se hallan en los nudos de la red cristalina, al perder con facilidad sus electrones de valencia, se convierten en iones cargados positivamente y no los átomos neutros. El espacio entre los iones lo ocupan los electrones con carga negativa. Los electrones libres al ser atraídos simultáneamente por varios iones cargados positivamente crean el enlace entre ellos.

### 3.1.3.3 Diagramas de fase

Los diagramas de fase son mapas de sistemas en equilibrio, en una representación de la temperatura frente al tanto por ciento de cada uno de los constituyentes que integran el sistema.

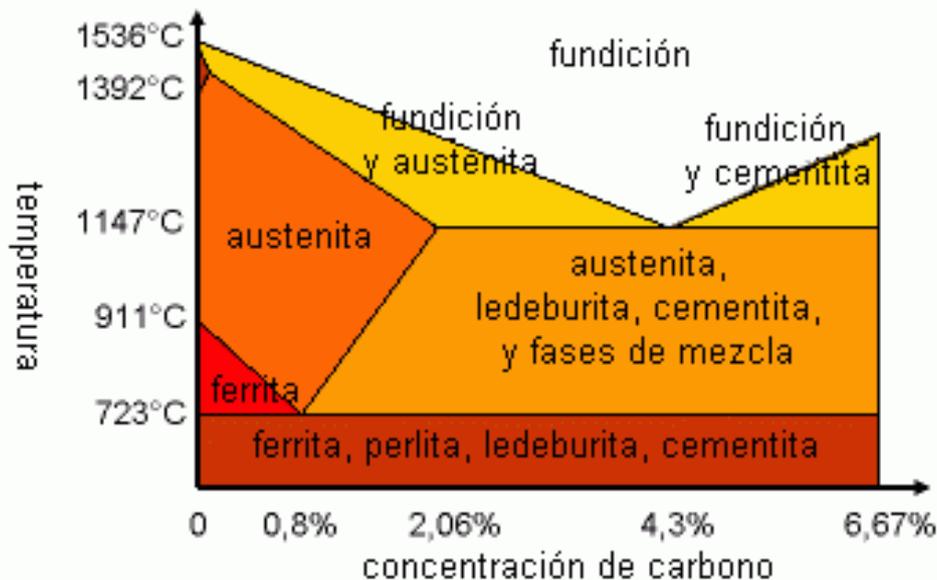


Figura 8. Diagrama Hierro-Carbono. Fuente: Crystec

Se obtienen con series continuas de líneas de enfriamiento donde muestran las fases presentes y componentes existentes para cualquier temperatura y composición. Para que un sistema metálico permanezca en equilibrio, el cambio tiene que ser a velocidades muy pequeñas y se puede dar el caso de que no estén en equilibrio.

Las aleaciones están formadas por constituyentes cuya naturaleza varía según las proporciones de los componentes de la aleación y la temperatura a que se encuentra.

**Ferrita:** Solución sólida de carbono en Fe alfa con una solubilidad máxima de 0.02% (a 723°C). Es el constituyente más blando y dúctil de los aceros. (90HB, 300MPa y 30% elongación)

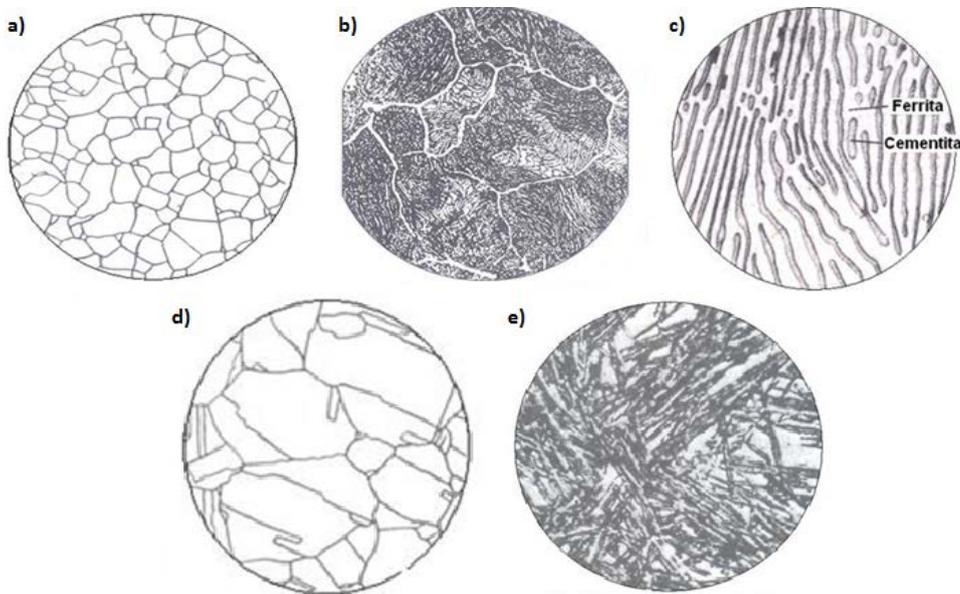
**Cementita:** Es el carburo de hierro ( $Fe_3C$ ) y es el constituyente más duro (700HB) y frágil de los aceros. Termodinámicamente es inestable y perjudicial para el mecanizado de las fundiciones.

20 de diciembre de 2017

**Perlita:** Constituyente eutectoide, compuesto por 86.5% de ferrita y 13.5% de cementita. Posee unas propiedades intermedias (250HB, 1000MPa y 7% de elongación)

**Austenita:** Solución sólida por inserción de carbono en Fe- $\gamma$ . Es muy blanda (140 HB), dúctil (30% de elongación) y tenaz, y presenta una gran resistencia al desgaste. Normalmente no es estable a temperatura ambiente, aunque el níquel puede estabilizarla.

**Martensita:** Es una solución sólida sobresaturada de carbono en Fe $\alpha$ . Se obtiene por enfriamiento muy rápido y es el constituyente más duro (500 – 700 HB) de los aceros después de la cementita, el más resistente (2000 MPa) y frágil (2% de elongación).



**Figura 9. Micrografía de la a) ferrita b) cementita c) perlita d) austenita e) martensita.**

**Troostita:** Procede de la transformación isotérmica de la austenita a temperaturas comprendidas entre 500 y 600 °C. Agregado intermedio de cementita y ferrita con propiedades intermedias (450 HB, 1500 MPa, 5% de elongación).

**Sorbita:** Procede de la transformación isotérmica de la austenita a temperaturas comprendidas entre 600 y 650 °C. Agregado intermedio de cementita y ferrita con propiedades intermedias (300 HB, 900 MPa, 10% de elongación).

**Bainita:** Procede de la transformación isotérmica de la austenita a temperaturas comprendidas entre 250 y 550 °C [bainita superior: 400 – 550 oC (300 HB, 1000 MPa, 10%); bainita inferior: 250 – 400 °C (450 HB, 1500 MPa, 3% de elongación)].

**Ledeburita:** Constituyente eutéctico de las fundiciones formado por austenita (48%) y cementita (52%). No es estable a temperatura ambiente.

**Steadita:** Constituyente de las fundiciones de más de 0.15% de fósforo. Es muy dura y frágil (559 HB).

**Grafito (Carbono libre):** Presente en las fundiciones gris, dúctil y maleable.

20 de diciembre de 2017

## EL DIAGRAMA HIERRO - CARBONO

En él se pueden observar los constituyentes que forman las aleaciones hierro - carbono según el contenido de carbono y la temperatura a que se encuentran, en condiciones de equilibrio. Se destacan:

- (Fe - CFe<sub>3</sub>)
- Puntos: Peritéctico, Eutéctico( $\gamma + \text{Fe}_3\text{C}$ ) y Eutectoide ( $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ )
- Fases: Cementita (muy dura, frágil), Ferrita  $\alpha$ ,  $\delta$  (resistencia media, tenaz) y Austenita (blanda, tenaz, dúctil).

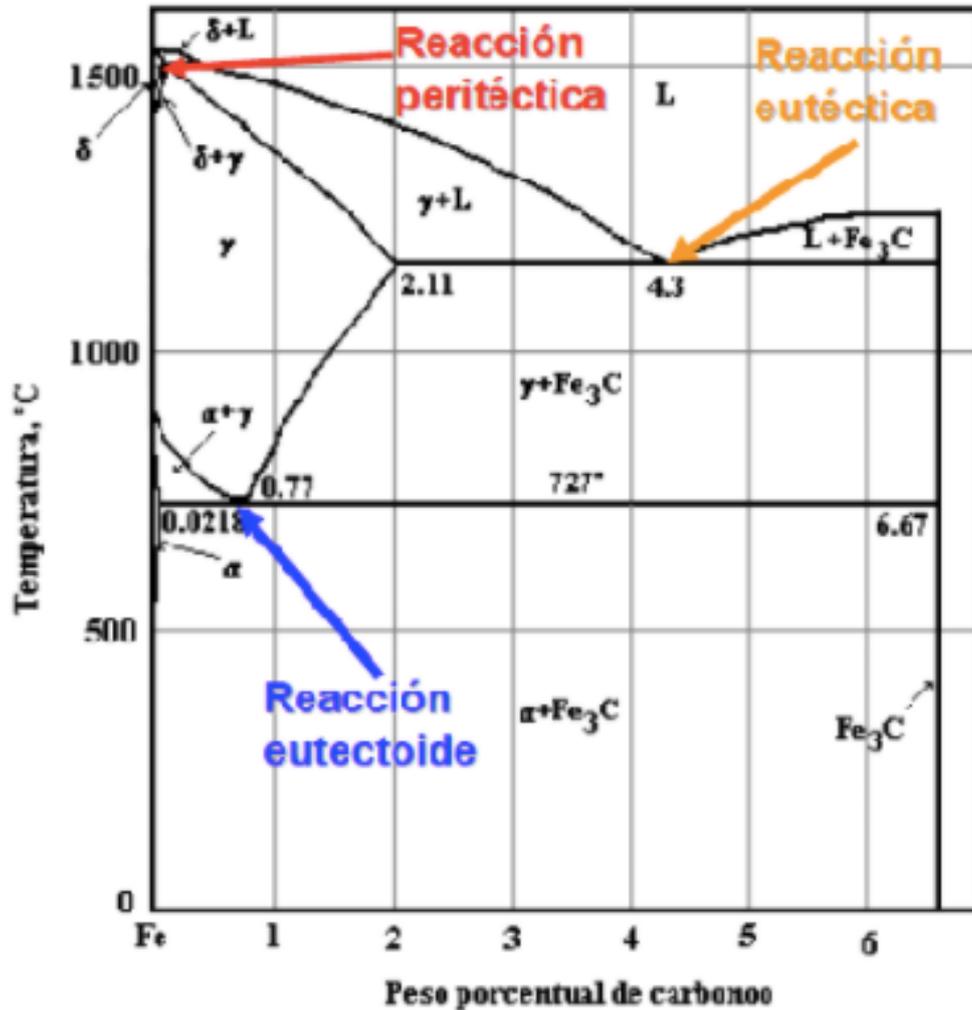


Figura 10. Representación en el diagrama de los puntos peritéctico, eutéctico y eutectoide y fases presentes.

## ACEROS

Acero: toda aleación hierro-carbono forjable con  $0.1 < \%C < 2$

- Clases:
  - Al carbono (Eutectoides, Hipoeutectoides, Hipereutectoides)
  - Aleados (alta aleación, baja aleación, microaleados)
  - Construcción, Herramientas, Especiales (Inoxidables, Refractarios, etc.)



20 de diciembre de 2017

- Buenas propiedades mecánicas de resistencia, tenacidad y ductilidad
- Facilidad de conformado en caliente y en frío
- Admiten tratamientos térmicos (normalizado, recocido, temple, revenido, ...) y termoquímicos
- Son soldables

## FUNDICIONES

Fundición: toda aleación hierro-carbono no forjable con  $2 < \%C < 4$ .

Otros elementos de aleación en su composición: Si, Mn, S, P, Cr, Ni, Mo y Mg. La adición de Si provoca el proceso de grafitización (carbono libre).

Las características mecánicas son, en general, inferiores a las de los aceros, pues el grafito libre origina discontinuidades en la matriz

Ventajas:

- Mayor facilidad de fabricación (temperatura de colada inferior).
- Mejor maquinabilidad.
- Menor coste de fabricación.
- Buena resistencia al desgaste y a la corrosión.
- Buena capacidad de amortiguación de vibraciones.

Existe una gran variedad de fundiciones dependiendo de los constituyentes existentes en el material, aunque este estudio esté referido a los aceros.

### 3.1.3.4 Tensiones en la microestructura

El tamaño de grano tiene considerable influencia en las propiedades mecánicas de los metales y aleaciones, por eso es de gran interés en cuanto a las tensiones residuales que puedan existir en una pieza.

Así pues, es entendible que la realización de los diferentes tratamientos térmicos tenga como principal objetivo obtener el tamaño de grano deseado. Resulta evidente que dicho tamaño de grano es inversamente proporcional al número de granos presentes en la muestra.

El refinamiento de grano es uno de los mecanismos de fortalecimiento más eficaz, mejorando propiedades mecánicas sin pérdida en ductilidad.

Pero las propiedades mecánicas son más difíciles de evaluar cuanto más fino sea el tamaño de grano por las diferentes deformaciones y fortalecimientos de los mecanismos que operan en el producto final.

$$\sigma_y = \sigma_0 + \frac{k_y}{\sqrt{d}}$$

La relación entre el tamaño de grano y la tensión de fluencia viene expresada por la ecuación de Hall-Petch, donde  $\sigma_y$  es la tensión de fluencia, (límite elástico),  $\sigma_0$  es una constante del material que define la tensión necesaria para iniciar el

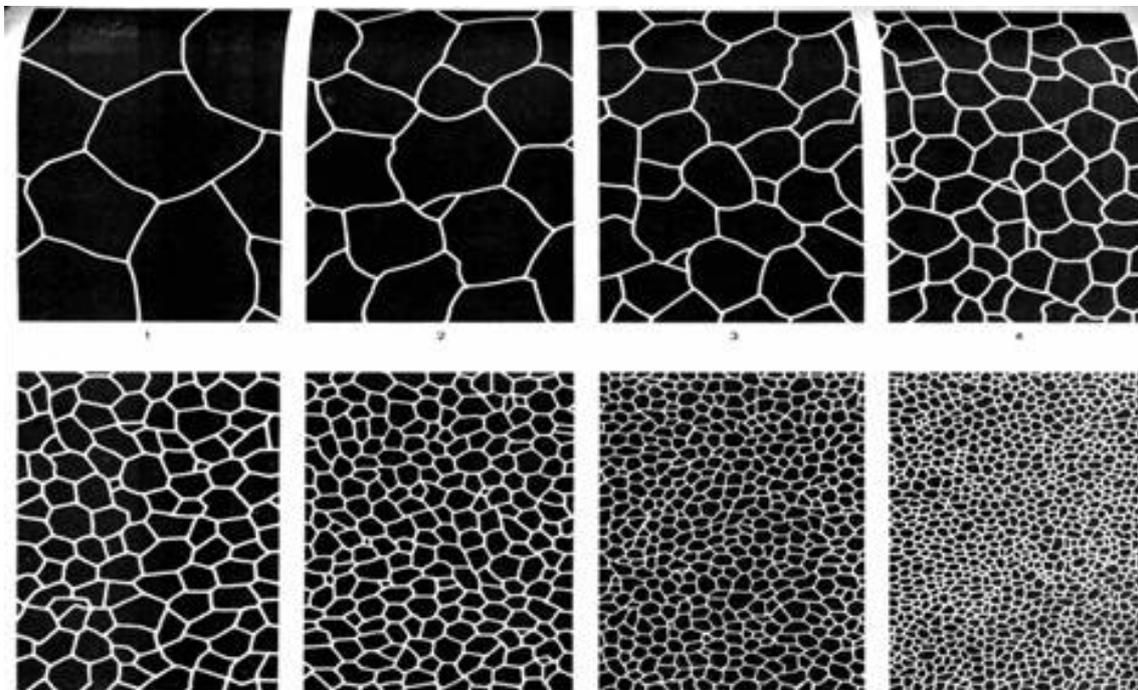
20 de diciembre de 2017

movimiento entre las dislocaciones,  $k_y$  es el coeficiente de endurecimiento constante de cada material y  $d$  expresa el diámetro de los granos.

Es importante definir todas estas variables, ya que es la teoría por la cual las tensiones residuales en una pieza son reducidas mediante tratamientos térmicos u otras técnicas que más adelante se explicarán.

Existen varios métodos para determinar el tamaño de grano, dependiendo como se ven en un microscopio. El método que más se utiliza con frecuencia por los fabricantes de acero, es que el tamaño de grano se mide con unos estándares, cada pulgada cuadrada bajo un aumento de 100X.

La figura siguiente, es una carta que representa el tamaño real de los granos tal como aparece cuando se aumenta su tamaño 100X. El tamaño de grano especificado es por lo general, el tamaño de grano austenítico. Un acero que se temple apropiadamente debe exhibir un grano fino.



**Figura 11. Tamaño de grano en una pulgada cuadrada a aumento 100X.**

El tamaño de grano se expresa, según norma ASTM, mediante el número  $G$  obtenido de la expresión:

$$\text{Número de granos/pulg}^2 \text{ a } 100x = 2^{G-1}$$

En la anterior expresión la  $G$ , es el número de tamaño de grano de uno a ocho. En la anterior imagen se pueden identificar las ocho variedades en tamaño de grano.

Según el mismo criterio, se considera:

- grano grueso cuando  $G < 5$  (diámetro de grano 62 micras)
- grano fino cuando  $G > 7$  (diámetro de grano 32 micras)

20 de diciembre de 2017

3.1.4 Tipos de tensiones residuales

Existen dos grandes grupos de tensiones residuales:

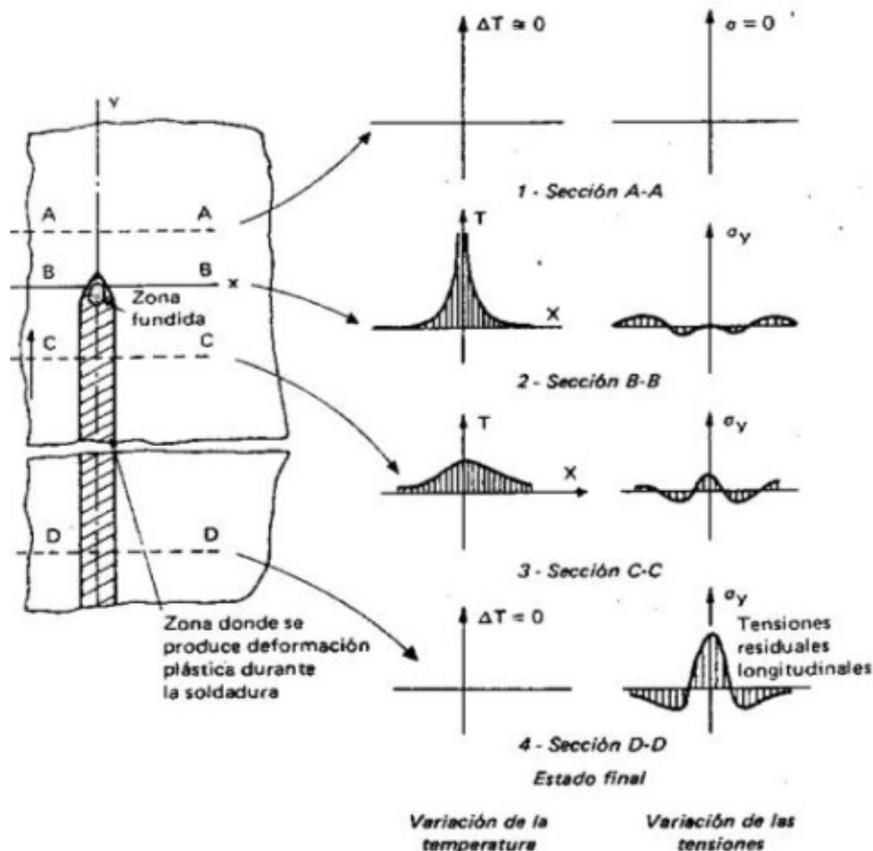
**Macro tensiones residuales**

Estas tensiones se encuentran repartidas de una manera relativamente constante a lo largo de una longitud. El objetivo de este estudio se basa en localizar este tipo de tensiones residuales ya que son las que se pueden modelizar con un estudio de elementos finitos.

**Micro tensiones residuales**

Este tipo de tensiones residuales se encuentran a una escala menor en comparación a las anteriores. Tienen su origen en la textura de los granos y en la anisotropía elástica y plástica. Este tipo de tensiones están asociadas a la presencia de diferentes fases constituyentes en el manufacturado del material.

El ámbito en la formación de las tensiones residuales es muy amplio, por lo que en este estudio se incidirá concretamente en las asociadas al proceso de soldadura en referencia a las macro tensiones residuales, siendo cuantificables matemáticamente mediante métodos de elementos finitos.



**Figura 12. Variación de la temperatura y las macro tensiones residuales. Fuente: facingycons**

En la anterior imagen podemos comprobar cómo influye la velocidad en el cordón ya que en varios cortes transversales varía notoriamente la temperatura y las tensiones residuales existentes.

20 de diciembre de 2017

3.1.5 Factores influyentes en la creación de tensiones residuales

**Soldeo**

El soldeo se puede definir como el procedimiento de fijación por el cual dos o más piezas de metal se unen por aplicación de calor, presión, o una combinación de ambos, con o sin aporte de otro metal, llamado metal de aportación, cuya temperatura de fusión es inferior a la de las piezas que han de soldarse.

En los procesos de soldadura el aporte de energía está focalizado en una zona concreta, lo que provoca una transferencia o disipación de calor. Esta variación de temperatura es el origen de los posibles cambios microestructurales produciendo tensiones y deformaciones internas que pueden afectar al servicio de la soldadura.

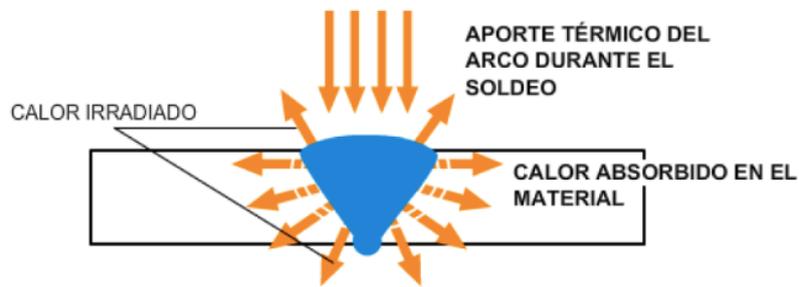


Figura 13. Alzado en el reparto de calor existente en una soldadura.

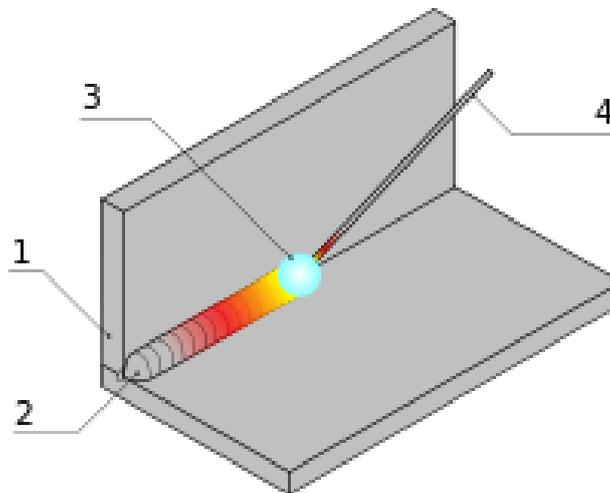


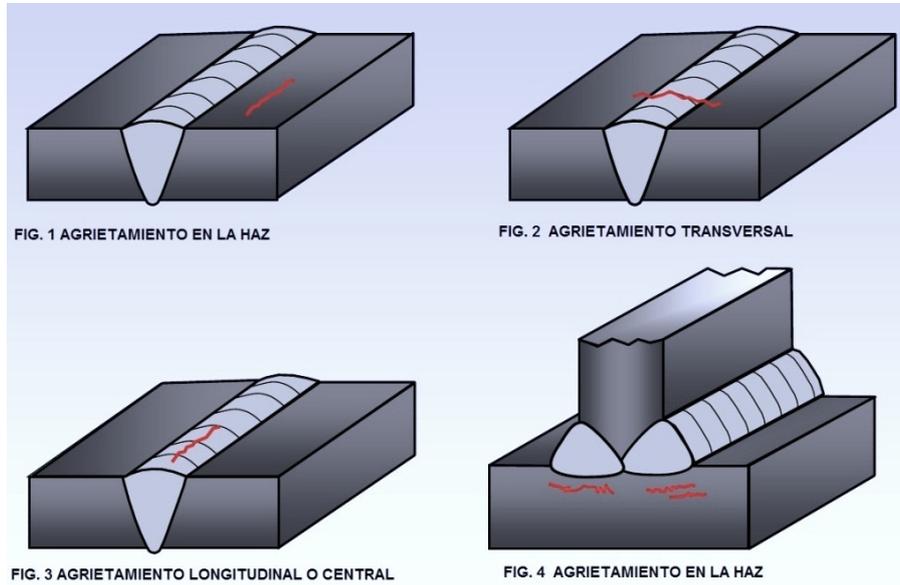
Figura 14. Elementos básicos en la soldadura.

Otro factor clave en la influencia de la creación de tensiones residuales es la manera de soldar, ya que la velocidad de soldeo en el cordón también es un factor clave para procurar la mayor homogeneidad en el cordón y minimizar las tensiones residuales. Debido a este problema nos encontramos en la tesitura de automatizar el soldeo para reproducir las mismas características en la soldadura.

En la anterior imagen se destacan todas las variables existentes en la operación de soldeo. La forma de la soldadura en el metal base, la velocidad o tipo del cordón, así como el tipo de aporte de energía y como el tipo del metal de aportación son variables que, en cierta medida, pueden ocasionar tensiones residuales.

20 de diciembre de 2017

En función de cómo se ha realizado la soldadura, la defectología puede acarrear macro-tensiones residuales o micro-tensiones residuales, manifestándose de la siguiente forma como puede comprobarse en la siguiente ilustración adjunta.

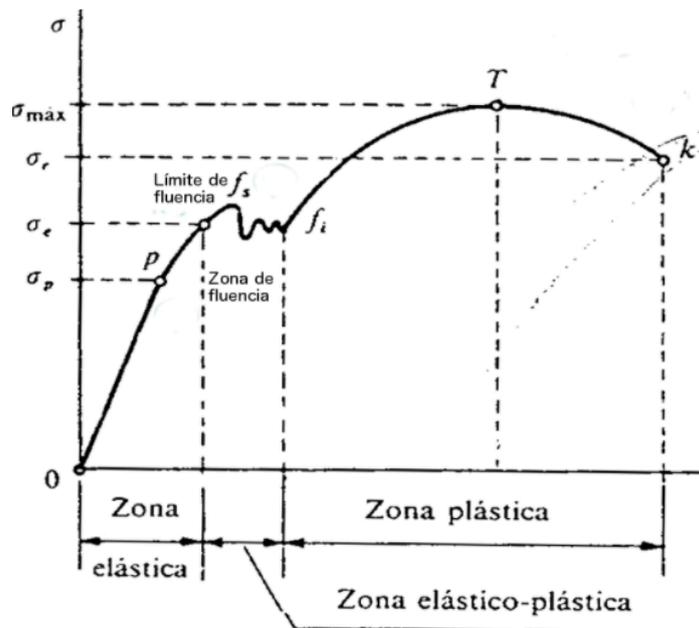


**Figura 15. Tipos de grietas formadas en las soldaduras. Fuente: Ing. Alexander Saavedra**

**Mecanizado**

Existen tensiones residuales que se producen debido a procesos de mecanizado, fresado, rectificado, troquelado, escariado, estampado, perforado y cepillado.

Un mal uso en estas operaciones puede causar tensiones residuales ya que en ocasiones el límite elástico del material puede sobrepasarse y causar cedencia al material.



**Figura 16. Límite de fluencia. Diagrama tensión-deformación.**

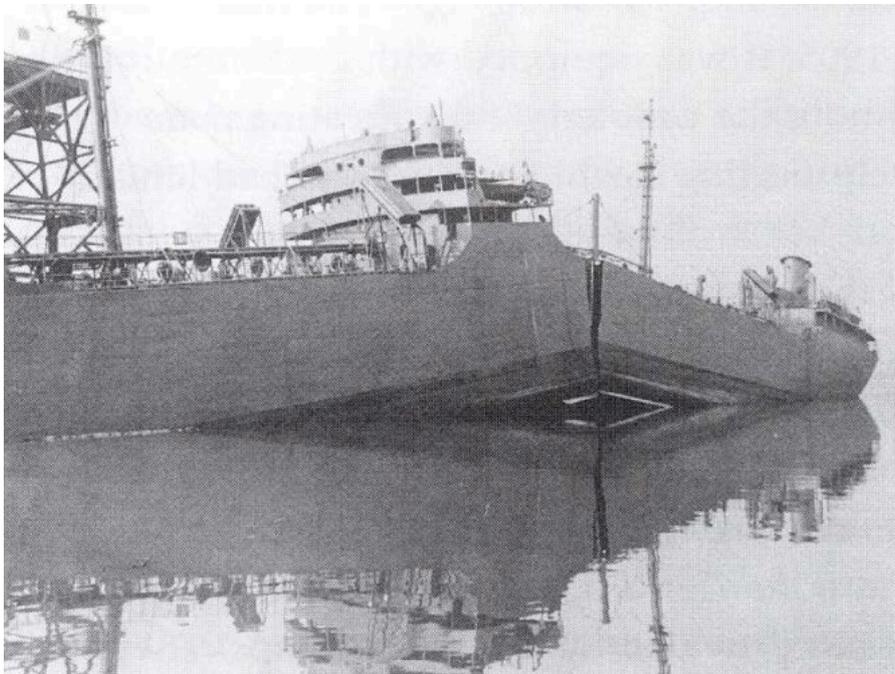
20 de diciembre de 2017

En varios procesos de mecanizado se llegan a conseguir diferencias térmicas importantes por lo que es otro factor influyente en la posible creación de tensiones superficiales.

### 3.2 Metodología para su medición y localización

#### 3.2.1 Introducción

Han existido varios casos de roturas sorprendidas en uniones soldadas sin estar sometidas a sobrecarga externa luego este apartado tiene una importancia extrema, ya que localizar y analizar donde existen estas tensiones residuales resulta crucial tanto por funcionalidad como por seguridad.



**Figura 17. Fotografía del S.S. Schenectady Fuente: Wikipedia**

Existen dos grandes grupos dentro de los métodos para la localización de tensiones residuales, los destructivos y los no destructivos.

##### 3.2.1.1 Galgas extensiométricas

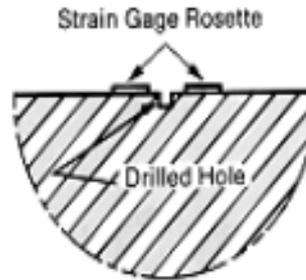
La técnica más ampliamente utilizada para la localización de dichas tensiones residuales.

El método se puede resumir en una secuencia de pasos que son los siguientes:

1. Se coloca una galga extensométrica circular especial de tres elementos en el punto de la pieza a estudiar donde se quiere determinar las tensiones residuales.
2. Se conectan las tres galgas a un indicador de deformación estática a través de una unidad de alimentación y balance.
3. Se centra correctamente sobre el punto a perforar en el círculo formado por las galgas o roseta.

20 de diciembre de 2017

4. Después de poner a cero los indicadores de las galgas, se perfora un pequeño agujero superficial en el centro de la roseta.
5. Las lecturas obtenidas son causadas por las deformaciones por relajación del material que están relacionadas con las tensiones residuales iniciales.
6. Utilizando los datos que se proporcionan en este documento, se pueden calcular las tensiones residuales principales y su orientación angular a partir de las deformaciones medidas.



**Figura 18. Galga extensiométrica.**

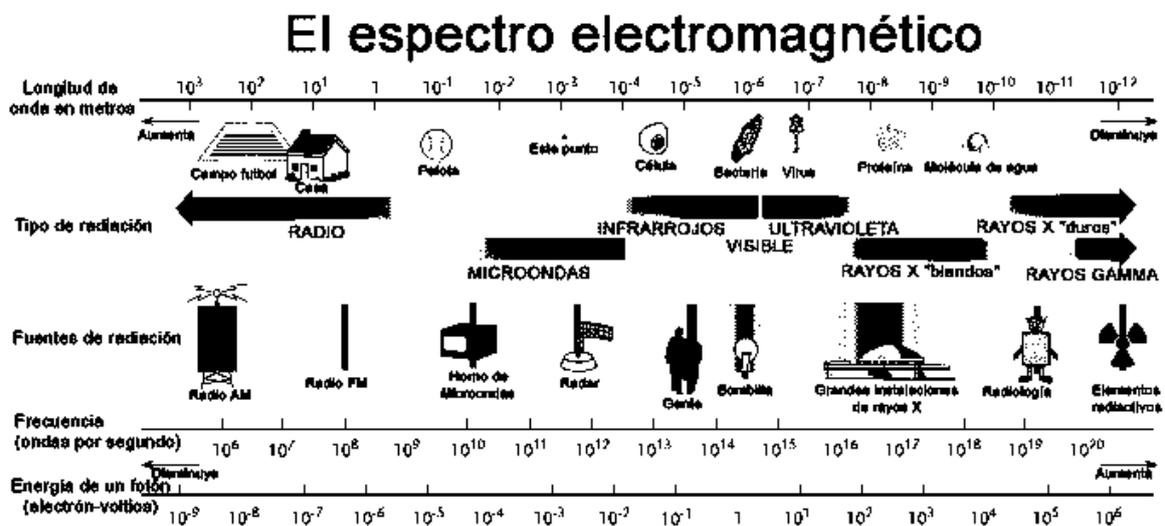
Este método es relativamente simple, y ha sido normalizado en ASTM (Método de Ensayo Estándar), siendo muy aplicado por cualquier técnico cualificado en análisis tensional.

El ensayo es muy versátil ya que puede ser desarrollado en laboratorio o en el exterior, en una amplia gama de formas o tallas del objeto a ensayar.

Esta técnica se denomina semi-destructiva, ya que en muy pocos casos el pequeño agujero originado por el ensayo perjudicaría a la estructura de la pieza.

### 3.2.1.2 Difracción por rayos X

La difracción de rayos X (DRX o XRD) es, por ahora, la única forma precisa de medir la tensión residual de manera no-destructiva. Además, la XRD ofrece métodos de medición sin contacto que ofrecen resolución espacial incomparable, y la capacidad de medir materiales macizos.



20 de diciembre de 2017

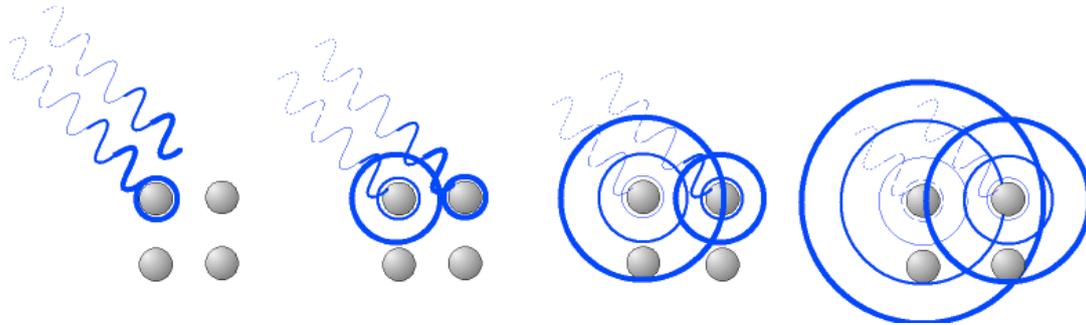
**Figura 19. El espectro electromagnético. Fuente: CSIC**

En nuestro caso para la medición de tensiones superficiales se seleccionan rayos X “duros” ya que a la longitud de onda que se encuentran es muy próxima a las distancias entre los átomos.

Esta técnica se basa en la dispersión coherente del haz de rayos X por parte de la materia (donde se mantiene la longitud de onda de la radiación) y en la interferencia constructiva de las ondas que están en fase y que se dispersan en determinadas direcciones del espacio.

Este hecho no se podría explicar sin tener claros los conceptos de difracción e interferencia que dan lugar a la ley de Bragg.

Cuando los rayos X incidentes alcanzan el material interactúan con los electrones exteriores que emiten una radiación electromagnética en todas las direcciones tal y como se puede ver en la siguiente ilustración.



**Figura 20. Desfase en la interacción de los rayos X con los átomos del material a analizar. Fuente: CSIC**

La radiación incidente llega a átomos consecutivos con un pequeño desfase, provocando en los átomos una radiación dispersada que a su vez también interfiere con la de los átomos adyacentes. Las direcciones en las que las radiaciones dispersadas se superponen son direcciones de una interferencia constructiva.

### **Ley de Bragg**

Esta ley permite estudiar las direcciones en las que la difracción de rayos X sobre la superficie de un material con una estructura cristalina definida produce interferencias constructivas prediciendo los ángulos en los que los rayos X son difractados por un material con una estructura atómica periódica.

$$n\lambda = 2d \cdot \sin(\theta)$$

siendo: n es un numero entero.

$\lambda$  es la longitud de onda de los rayos X.

d es la distancia entre los planos de la red cristalina.

$\theta$  es el angulo entre los planos de la red cristalina y los planos de dispersión.

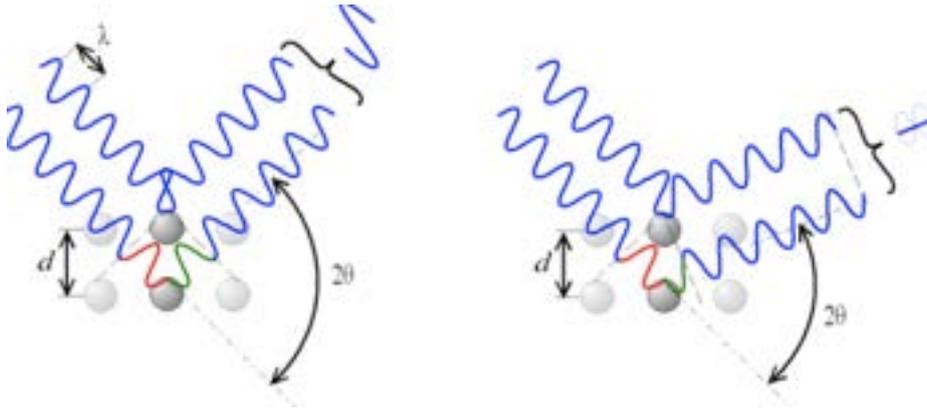
Será necesario conocer las diferencias entre este tipo de interferencias siendo:

- Interferencia constructiva: La interferencia es constructiva, si la diferencia de caminos recorridos por los dos movimientos es igual a un número par

20 de diciembre de 2017

de semilongitudes de onda. Entonces la amplitud de la interferencia será la suma de amplitudes de las ondas.

- Interferencia destructiva: La interferencia es destructiva, si la diferencia de caminos recorridos por los dos movimientos es igual a un número impar de semilongitudes de onda. En este caso la amplitud de la interferencia será la diferencia de amplitudes de las ondas.

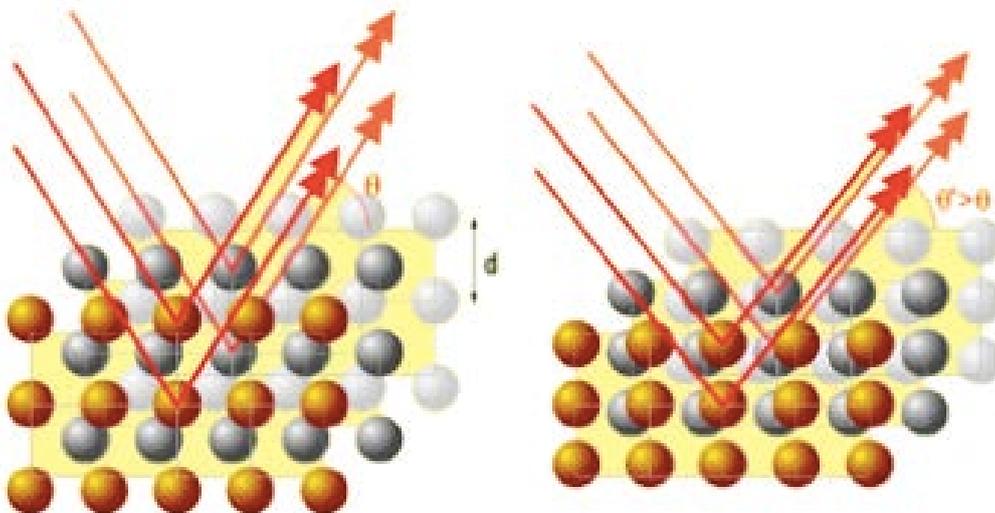


**Figura 21. Ley de Bragg. Fuente: CSIC**

En la imagen anterior el caso de la izquierda es una interferencia constructiva y en el caso de la derecha es una interferencia destructiva.

Por lo tanto, la difracción de rayos X (DRX o XRD) es, por ahora, la única forma precisa de medir la tensión residual de manera no-destrucciona. Además, la XRD ofrece métodos de medición sin contacto que ofrecen resolución espacial incomparable, y la habilidad de medir materiales macizos.

El estrés residual en puntos que han sufrido niveles de tensión excepcional, o las superficies de partes móviles, es determinado rutinariamente por medio de la XRD.



**Figura 22. Interacción para localizar las tensiones residuales. Fuente CSIC**

20 de diciembre de 2017

En resumen, bajo esta técnica se pueden comprobar de manera no destructiva las pequeñas tensiones residuales que se han formado durante el proceso de manufacturación del producto o durante su vida útil.

Se trata de una metodología relativamente cara y novedosa que está dando buenos resultados.

### 3.2.1.3 Corrientes de Eddy

Las corrientes de Eddy están basadas en los principios de la inducción electromagnética, y pueden ser utilizadas para identificar las condiciones físicas, estructurales y metalúrgicas.

El ensayo por corrientes inducidas (corrientes de Eddy) se basa en la medida de los cambios de impedancia inducidos en un material conductor eléctrico.

Consiste en hacer pasar una corriente alterna por un solenoide, la cual genera un campo magnético. Al colocar la pieza a inspeccionar en dirección perpendicular al campo magnético creado por el solenoide, se generan corrientes inducidas circulares en la pieza.

Las corrientes eléctricas inducidas van a producir un campo magnético (secundario), que se va a oponer al campo magnético del solenoide (primario) y modificará la impedancia de la bobina. La consiguiente variación de la corriente eléctrica que circula por la bobina es el parámetro que se mide y registra. Los defectos existentes en la pieza interrumpen las corrientes inducidas, lo que provoca que el campo magnético producido por dichas corrientes sea menor.

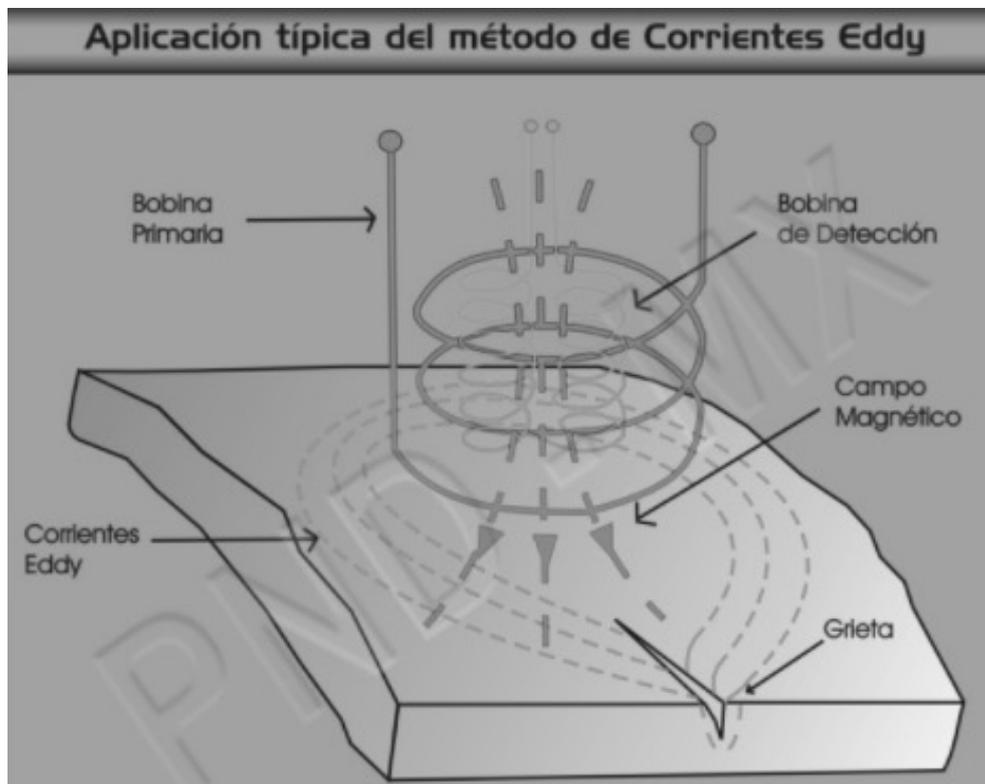


Figura 23. Corrientes de Eddy. Fuente: Universidad Tecnológica de Pereira

20 de diciembre de 2017

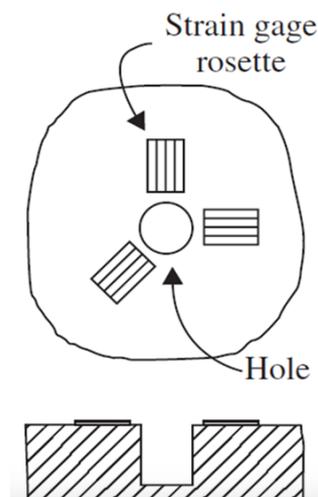
Es una prueba superficial, detectando defectos sub-superficiales cercanos a la superficie y evaluando agrietamientos en las zonas afectadas por soldadura. El patrón de corrientes inducidas y el campo magnético que necesariamente está asociado a ellas, están influenciados por diferentes características del material bajo prueba. Estas características pueden agruparse en tres grupos: detección de discontinuidades, medición de propiedades de los materiales y mediciones dimensionales.

Para este estudio interesan las detecciones de discontinuidades, pero no va a ser la técnica empleada ya que solo tiene validez para los defectos superficiales o cercanos a la superficie. Luego se podrían obviar tensiones residuales existentes si el grosor de la pieza es lo suficientemente elevado.

#### 3.2.1.4 Técnica del Hole-Drilling

El método Hole-Drilling determina tensiones residuales cerca de la superficie de un material. Se trata de fijar unas galgas extensométricas a la superficie, la perforación de un agujero en el centro de estas, y la medición de las tensiones aliviadas resultantes. El método de Hole-Drilling puede identificar en el plano tensiones residuales cerca de la superficie de medición del material de trabajo.

A menudo es descrito como "semi-destrutivo" porque el daño que causa es localizado y con frecuencia no afecta significativamente la utilidad de la pieza. En cambio, la mayoría de los otros métodos mecánicos para la medición de tensiones residuales destruyen sustancialmente la pieza. De todas formas, la perforación del agujero causara algún daño, por lo que este método debe aplicarse sólo en aquellos casos en que la pieza de trabajo es prescindible, o donde la introducción de un pequeño agujero poco profundo no afecte significativamente al desempeño de la pieza en servicio.



**Figura 24. Método Hole-drilling.**

Se necesita un análisis complejo para relacionar deformaciones y tensiones por lo que el método se limita a la medición de las tensiones residuales hasta la mitad de la tensión de fluencia si son biaxiales, o hasta un tercio de la tensión de fluencia si son uniaxiales, para garantizar un comportamiento elástico.



20 de diciembre de 2017

### 3.2.1.5 *El método de elementos finitos (MEF)*

El método de elementos finitos pertenece al grupo de técnicas de residuos ponderados. Una de sus características principales es que estos procedimientos no se aplican a la totalidad del dominio de integración. Este dominio se divide en regiones que se denominan elementos. Como se verá a continuación, la configuración de los elementos dependerá de la geometría del sólido y de la dimensionalidad del flujo.

Hoy en día, este tipo de métodos se emplean de una manera teórica mediante software de programación como pueden ser el SolidWorks, Abaqus o Ansys. En este estudio el software utilizado será el SolidWorks.

Las ideas básicas de este método se originaron durante el análisis estructural de la industria aeronáutica en la década del '50. En la década del '60 el método fue generalizado para la solución aproximada de problemas de análisis de tensión, de flujo de fluidos y transferencia de calor.

En la década del '70 el método fue extendido al análisis de problemas no lineales de la mecánica del continuo. Hoy en día el método permite resolver prácticamente cualquier situación física que pueda formularse mediante un sistema de ecuaciones diferenciales.

#### **Aplicación del MEF en la soldadura**

Es amplia la atención que se ha prestado al estudio de la magnitud y distribución de los esfuerzos residuales en las construcciones soldadas. La relación entre fenómenos como los cambios complejos de temperatura (que provocan esfuerzos térmicos) y las deformaciones plásticas, obligan a trabajar bajo una cierta metodología.

Las aplicaciones más comunes en la resolución de este método son:

- **Análisis del flujo de calor.**
- **Análisis de los desplazamientos provocados por los esfuerzos residuales.**
- **Determinación de las deformaciones.**
- **Análisis de los esfuerzos térmicos residuales.**

Esta técnica tiene una importante relevancia en nuestro estudio, ya que va a ser empleada para calcular las diferencias entre las deformaciones entre los distintos tipos de métodos para el alivio de tensiones.

Para el caso específico de la simulación de la soldadura mediante MEF se utilizan diferentes pasos o etapas básicas de cálculo como son:

#### **1º Etapa: Selección del tipo de elemento**

Varía en función de la tipología del problema y de la precisión deseada. Después de seleccionado el elemento, quedan definidas las funciones de forma, según el tipo de elemento seleccionado.

20 de diciembre de 2017

## **2ªEtapa: Discretización de la geometría en los elementos finitos.**

En este paso se define la topología de la malla y coordenadas de los nodos que se escoge según la geometría del problema y de la precisión que se desee obtener.

## **3ªEtapa: Entrada de datos.**

Se introducen las propiedades de los materiales, variables esenciales como espesor, cantidad de calor aportado, a partir del proceso utilizado (en el cual intervienen, el voltaje, la corriente, la velocidad de soldadura, entre otros factores), las condiciones iniciales, tiempo de análisis y otras según sea necesario; también en esta etapa se introduce la restricción de los grados de libertad, según sea la restricción externa del modelo utilizado, esto no es más que, por ejemplo para el caso de la soldadura, definir el grado de libertad impuesto a las juntas, valorando cuándo existe la posibilidad de variar la rigidez externa, los diferentes estados tensionales y deformaciones con el fin de escoger la opción más favorable, también cuándo el modelo es simétrico y se decide solo modelar una sección de la misma, con esta opción se representa además continuidad de material.

## **4ªEtapa. Cálculo de la matriz de rigidez de los elementos.**

Se calcula la matriz de rigidez de cada uno de los elementos que conforman el mallado del modelo. Para los posibles futuros problemas se calculará además la matriz de masa y la aportación que se realiza a la matriz de rigidez debido a las condiciones de contorno, como puede ser la convección.

## **5ªEtapa. Cálculo del vector de temperaturas nodales.**

Se obtiene el vector de temperaturas nodales equivalentes para cada elemento. Su complejidad depende del elemento utilizado y también de las cargas externas consideradas. Para problemas posteriores se consideran las aportaciones de las condiciones iniciales y de la matriz de rigidez por el esquema de integración del tiempo, lo cual para cada elemento se irá actualizando.

## **6ªEtapa. Solución del sistema de ecuaciones globales.**

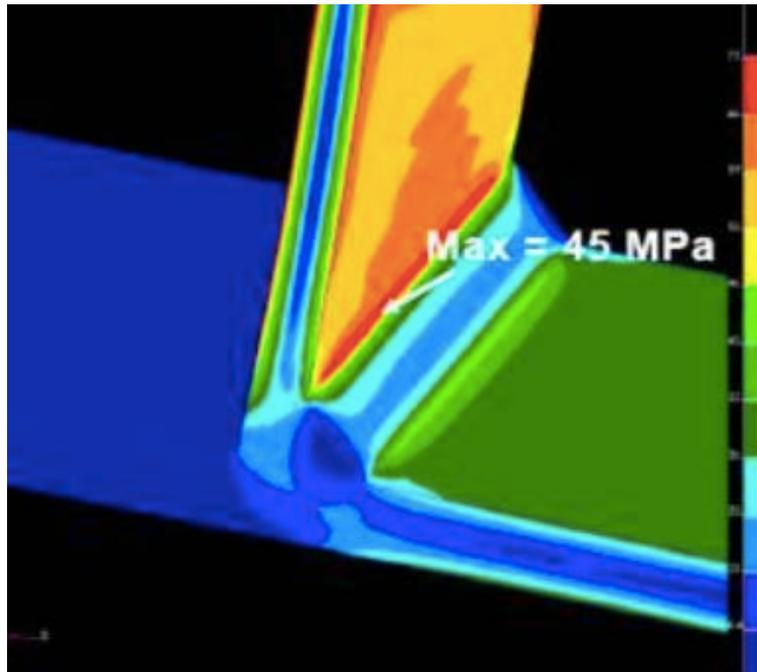
Después de tener las matrices de rigidez y los vectores de temperaturas nodales de cada elemento sigue la etapa de ensamblaje de dichas matrices y vectores y la solución del sistema de ecuaciones resultantes, para obtener las temperaturas nodales.

## **7ªEtapa. Cálculo de los gradientes**

Consiste en calcular los gradientes de temperaturas en los nodos de los diferentes elementos a partir de los valores de temperaturas nodales y a partir de estos y del sistema de rigidez obtener los desplazamientos y tensiones.

En este caso de estudio las variables van a ser las tensiones residuales existentes en el interior de la pieza.

20 de diciembre de 2017



**Figura 25. MET la tensiones residuales realizado en una soldadura con unión en "T".**

### **Modelización de la soldadura y MET**

Una de las tareas fundamentales del ingeniero consiste en el "cálculo", que es la predicción cuantitativa del comportamiento de un sistema tecnológico para proceder a su diseño eficiente.

Para ello debe hacer uso de conceptos de física y matemática, a fin de formular un modelo matemático del sistema en consideración. Este modelo no es más que un sistema de ecuaciones cuyas incógnitas representan magnitudes de interés tecnológico, que permiten describir el comportamiento del objeto bajo análisis. Consecuentemente, para llevar a cabo la predicción en sí misma, se debe resolver cuantitativamente las mencionadas ecuaciones para dedicarse, a continuación, a la interpretación técnica y al análisis de los resultados.

Algunos ejemplos de este análisis lo constituyen el estudio estructural de automóviles, aviones, puentes, o el análisis del campo de flujo de calor en soldadura, flujo de fluidos, etc. Debido a la gran dificultad para obtener soluciones analíticas a las aludidas ecuaciones, la ingeniería ha recurrido, históricamente, al uso de modelos simplificados basados en resultados experimentales, como ocurre en este mismo estudio.

Esta metodología general de la ingeniería ha dado buenos resultados y aún se continúa realizando. No obstante, es importante denotar que se trata de una metodología que presenta fuertes limitaciones en cuanto a las posibilidades del análisis, hecho que se hace más grave si se consideran las crecientes necesidades de la tecnología moderna.

Hoy las empresas tienen la necesidad de reducir los tiempos de desarrollo de sus productos y, además, aumentar la calidad de las herramientas de cálculo y es por ello que de manera progresiva han ido surgiendo y renovándose las técnicas computacionales mediante métodos numéricos.

20 de diciembre de 2017

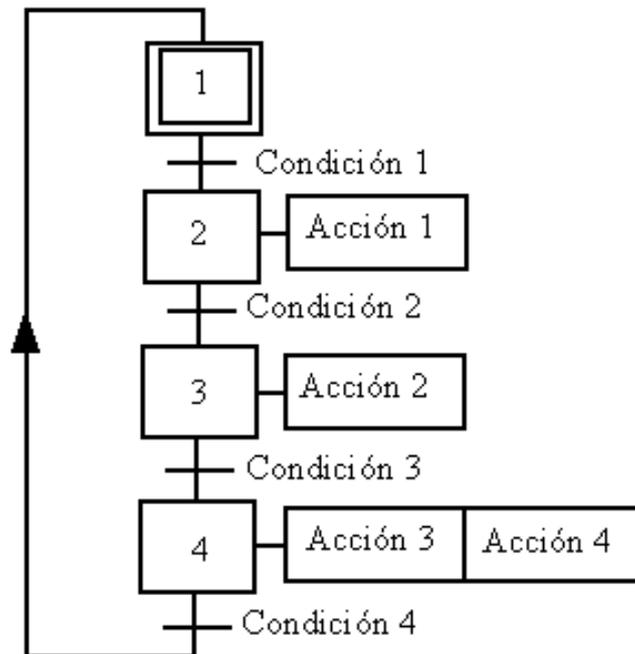


**Figura 26. Soldadura automatizada. Fuente: Förster Welding**

**Grafcet**

El grafcet es un diagrama funcional que describe los procesos a automatizar, teniendo en cuenta las acciones a realizar, y los procesos intermedios que provocan estas acciones.

Es necesario desarrollar la secuencia en la que vamos a realizar la soldadura en nuestro estudio, luego tenemos que recurrir a una estructura patrón que defina cómo va a actuar y en qué orden dicha soldadura. La estructura patrón es definida por el grafcet.



**Figura 27. Estructura básica en la secuencia de un Grafcet.**

20 de diciembre de 2017

Un graficet está compuesto de:

**Etapas:** define un estado en el que se encuentra el automatismo. Las etapas de inicio se marcan con un doble cuadrado.

**Acción Asociada:** define la acción que va a realizar la etapa, por ejemplo, conectar un contactor, desconectar una bobina, etc.

**Transición:** es la condición o condiciones que, conjuntamente con la etapa anterior, hacen evolucionar el GRAFCET de una etapa a la siguiente, por ejemplo, un pulsador, un detector, un temporizador, etc.

### 3.3 Metodología para lograr la reducción en las tensiones residuales

Si se tiene la certeza que existe una elevada tensión residual no deseada en nuestra estructura o pieza metálica, puede reducirse utilizando varios métodos.

Estos métodos se pueden clasificar en métodos térmicos y mecánicos (o no térmicos). Todos los métodos implican el procesamiento de la pieza para ser liberada de tensiones como un conjunto.



**Figura 28. Métodos existentes para lograr el alivio de las tensiones residuales. Fuente: Elaboración propia**

En este estudio, la comparativa se realiza entre los métodos no mecánicos, en los cuales se engloban los tratamientos térmicos convencionales y el distensionado por vibración.

El revenido por parte de los tratamientos térmicos y el distensionado por vibración serán las técnicas a evaluar para llegar a una conclusión sobre la efectividad, comodidad, maquinabilidad y repercusión económica de cada técnica.

20 de diciembre de 2017

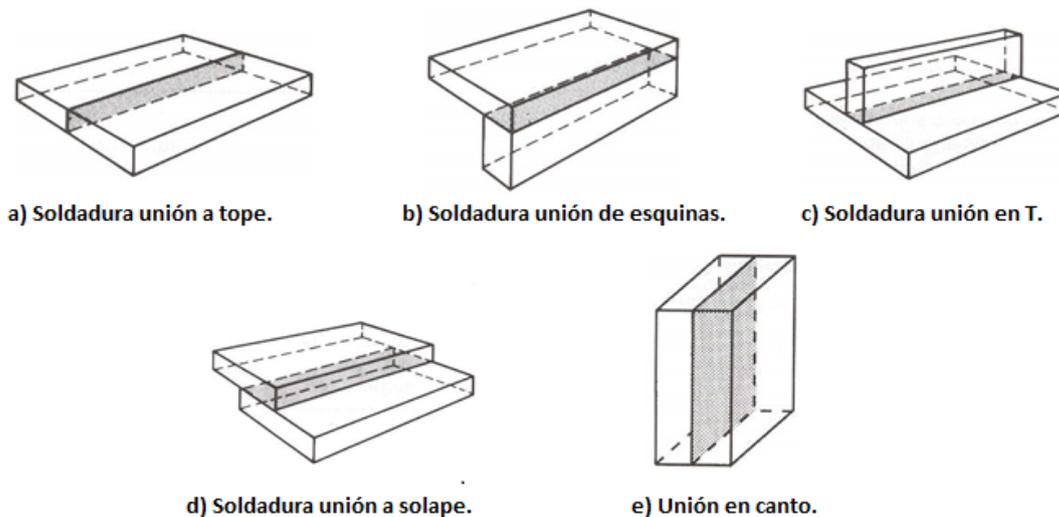
### 3.3.1 Durante el conformado

#### 3.3.1.1 Soldadura

Este procedimiento es ampliamente conocido en la industria puesto que es una labor que se emplea para diversas funciones tal y como:

- **Para sustituir piezas fundidas**
- **Para sustituir al remachado**
- **Para recuperar piezas desgastadas o rotas**
- **Para mejorar las características superficiales**

Existen varios tipos de uniones en el soldeo, éstas son las más representativas:



**Figura 29. Tipos de uniones en soldeo.**

### **SOLDADURA EN LA REDUCCION DE LAS TENSIONES RESIDUALES CON SOAK**

Para reducir el elevado nivel de estrés residual al finalizar la soldadura el componente se recalienta a una temperatura suficientemente alta.

A medida que aumenta la temperatura, disminuye la resistencia, lo que permite que se produzca la deformación y que disminuya la tensión residual hasta que se alcanza un nivel aceptable.

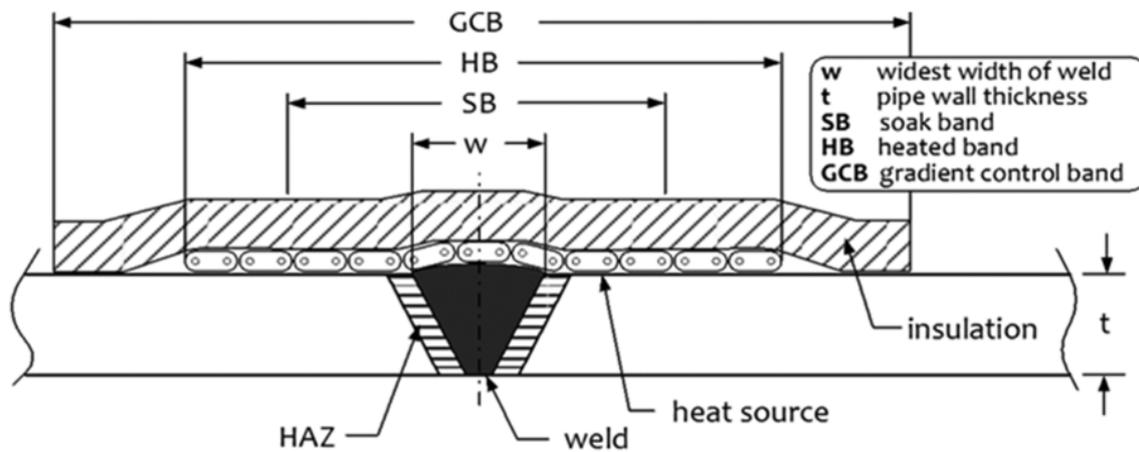
El componente se mantendría a esta temperatura (soaking, empapado o impregnación en inglés) durante un período de tiempo hasta que se alcance una condición estable y luego se vuelva a enfriar a temperatura ambiente.

En la práctica, este tipo de proceso suele durar unas cuatro horas a partir de que se acaba el último cordón de soldadura, y la temperatura se eleva en torno a unos 400°C.

20 de diciembre de 2017

En este proceso se elimina además el hidrógeno ya que este contribuye a un retraso en la soldadura y/o la zona afectada por el calor puede sufrir agrietamiento. El hidrógeno, combinado con altas tensiones residuales y con acero sensible al agrietamiento, puede presentar grietas horas o días después de que el proceso de soldadura se haya completado.

Los aceros de alta resistencia, las secciones gruesas y las partes fuertemente restringidas son más susceptibles a la fisuración por hidrógeno. En estos casos, se recomienda utilizar un proceso de bajo consumo de hidrógeno y revisar que se lleven a cabo los procedimientos apropiados de precalentamiento, entre pasada y post-calentamiento.



**Figura 30. Franja a la que se debe aplicar el SOAK. Fuente: American Society of Mechanical Engineers (ASME)**

Es importante deshidrogenar adecuadamente la soldadura ya que se pueden ocasionar grietas días después de la soldadura, originando posibles tensiones residuales que a priori, no son detectadas en el momento de la ejecución de la soldadura.

### 3.3.1.2 Tipos de precalentamiento para efectuar la soldadura

#### 3.3.1.2.1 Precalentamiento y Soak

El precalentamiento se debe realizar de forma que no se afecten las propiedades de metal en la zona precalentada es decir, que no se superen los rangos de temperatura en los que exista un cambio metalúrgico en las propiedades de la pieza.

#### 3.3.1.2.2 Métodos y precauciones

Se puede precalentar utilizando hileras o aros de quemadores de gas, resistencias eléctricas o equipos de inducción. Cualquier elemento que aporte calor es apto siempre se pueda regular con precisión mediante unos medidores colocados en lugares estratégicos llamados termopares.

#### 3.3.1.2.2.1 CALENTADORES DE GAS

Para calentar las piezas mediante calentadores de gas se deberán definir los siguientes elementos que constituyen un calentamiento óptimo.

20 de diciembre de 2017

**Gas Natural:** El gas natural es una mezcla combustible rica en gases de gran poder calorífico. El principal componente de la mezcla que conforma el gas natural es un hidrocarburo llamado metano. Los riesgos que pueden ocurrir si acontece una pérdida de gas son; asfixia, explosión o deflagración.

**Quemador:** es un dispositivo para quemar combustible gaseoso y producir calor mediante una llama.

**Colector:** es un depósito móvil destinado a la distribución de Gas Natural por planta, distribuye gas natural de forma segura.

En caso de calentar la pieza o cupón mediante gas natural se colocará el mechero o calentador que se ajuste mejor a la zona a precalentar en la pieza y se soldará el mismo para que quede fijo a la zona que interese calentar.

Para ello, se debe tener en cuenta el dimensionamiento de la pieza a tratar ya que el calor debe ser repartido de la manera más homogénea posible evitando distintos gradientes de temperatura en la misma.

Posteriormente, se necesitará un colector portátil de gas para realizar la mezcla gas-aire y un colector general de aire y gas, distribuidos a lo largo de la nave. Además, se conectarán mangueras del colector portátil a los mecheros o calentadores, tantas como sea necesario.

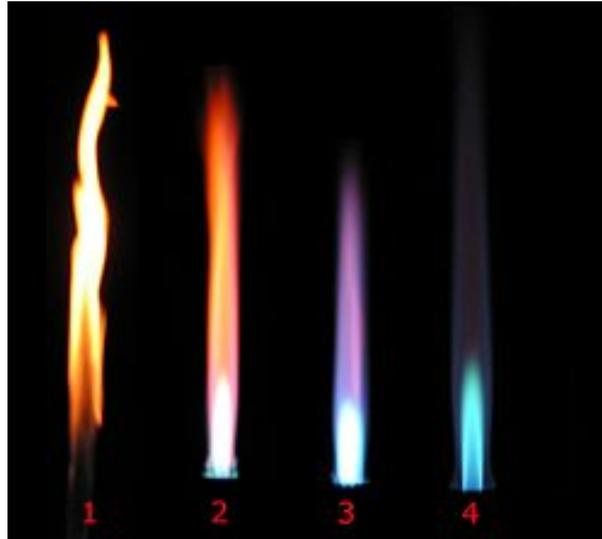
En caso de que el quemador solo expulse gas natural, la llama será roja y grande, lo que puede provocar en la pieza cambios en el gradiente en su envolvente y generan cambios indeseados en su microestructura más periférica.



**Figura 31. Llama de gas natural.**

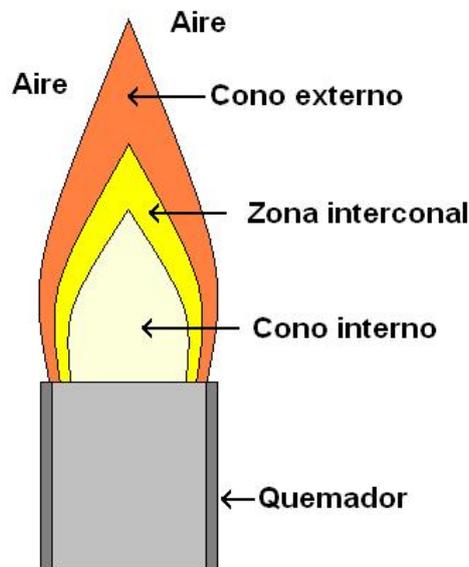
En cambio, para optimizar la energía en los calentadores de gas, se utilizan unos colectores, en los que se mezclan el gas natural con aire, provocando que la llama pase a un tono azulado. Esta llama contiene más energía focalizada siendo el tamaño de llama directamente proporcional a la mezcla de gas natural-aire existente en el colector.

20 de diciembre de 2017



**Figura 32. Llama mezcla gas natural con aire.**

En cuanto a la regulación de la llama se debe evitar que el cono interno toque la propia pieza a tratar ya que se encuentra a temperaturas muy elevadas, y estás podrían cambiar la microestructura externa de la pieza, provocando tensiones residuales que más tarde deberán ser analizadas y reducidas.



**Figura 33. Cono de llama.**

También será necesario conectar mangueras, de una a cuatro para el gas, en función del caudal de gas necesario para el precalentamiento, y una de aire, del colector general al portátil para conseguir la proporción deseada en la mezcla del combustible y comburente.

Para el encendido se abrirá el gas del tramo del mechero o colector que se quiera encender y con un mechero, con o sin boquilla. Si el alcance al mechero no fuese posible, se podrá realizar el encendido con la ayuda de un trapo enganchado a una vara metálica, retirando el trapo, apagándolo adecuadamente, y desechándolo en el contenedor correspondiente.

20 de diciembre de 2017

Una vez encendido, se realizará la regulación de la llama, mediante la observación de esta, y la mezcla gas-aire mediante los reguladores del colector portátil, en caso de que sean mecheros, y solo gas en caso de que sean calentadores.

### 3.3.1.2.2.2 RESISTENCIAS ELÉCTRICAS

Las resistencias eléctricas son un calefactor eléctrico flexible ampliamente usado en precalentamiento y post-calentamiento de la soldadura en piezas metálicas.

Estos calefactores están contruidos en base a un arreglo de piezas cerámicas de alúmina tejidas por un alambre trenzado de 19 hebras de Ni-Cr, obteniendo así un calefactor que se puede adosar fácilmente tanto a superficies planas como curvadas.



**Figura 34. Disposición de mantas eléctricas en función de la soldadura. Fuente: intec-heat**

Cómo se utilizan:

Inicialmente se colocarán las resistencias requeridas para la zona a precalentar mediante un utillaje que logre que se amolden a la pieza o cupón a tratar. Si fuese necesario y posible, se puede soldar el soporte y brazos a apoyos fijos.

Una vez colocadas las resistencias, se procederá a su conexión a un transformador de potencia mediante cables de fuerza de gran sección para aguantar el amperaje que es conducido por la línea trifásica.

Para encender, se procederá a poner en funcionamiento el transformador y mediante reguladores de potencia, en tanto por ciento, se controlará la temperatura de las resistencias. Es aconsejable empezar con un porcentaje bajo e ir subiéndolo gradualmente, para evitar un choque térmico con la pieza, controlando el gradiente térmico dependiendo del material que se esté tratando.



**Figura 35. Transformador para resistencias. Fuente: www.viasimportaciones.cl**

20 de diciembre de 2017

### 3.3.1.2.2.3 INDUCCIÓN

El calentamiento por inducción se puede definir como un proceso mediante el que se consigue la elevación de temperatura de objetos metálicos (únicamente férricos). El calentamiento se produce mediante variaciones en la orientación magnética molecular por magnetismo inducido por corrientes eléctricas alternas de alta frecuencia.

El procedimiento a ejecutar para calentar la pieza es llevado a cabo mediante la manguera de inducción, de color blanco, enrollada en la zona a precalentar, fijada mediante cinta ignífuga, colocando a su vez tela o manta ignífuga para retacar y evitar pérdidas innecesarias de calor.

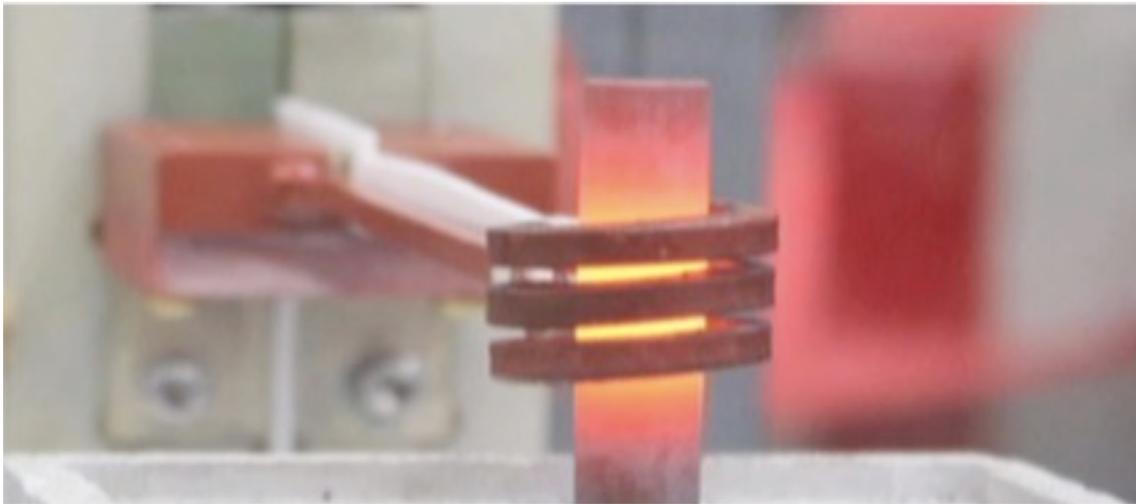
Es necesario para aislar las mangueras, protegerlas de esquinas, por los posibles sobrecalentamientos que pueda ocasionar la manguera en ciertas partes de la pieza.

Después se procederá a su conexión con la manguera de corriente, y a la colocación de los manguitos refrigerantes.

El siguiente paso es conectar la manguera de corriente a la máquina de inducción, y los manguitos del circuito refrigerante.

Por último, conectar el termopar de control a la máquina que será el patrón que dictamine si el transformador debe aportar energía y fijarle bien entre la zona a precalentar y la manguera de inducción.

El termopar no puede quedar al aire, y debe estar bien fijado para evitar posibles irregularidades en el funcionamiento de la máquina.



**Figura 36. Calentamiento por inducción.**

Para su encendido, conectar la máquina de inducción a la corriente y pulsar el interruptor de encendido. Fijar la temperatura objetivo y este actuará según lo que refleje el termopar instalado.

Es importante comprobar que la bomba del circuito de refrigeración esté funcionando. De no ser así, se puede estar sometiendo al transformador de inducción a un sobrecalentamiento pudiendo llegar a quemarlo. Es muy importante

20 de diciembre de 2017

comprobar que el caudal de refrigerante está activo en todo momento que el transformador esté trabajando.



**Figura 37. Transformador de inducción. Fuente: Miller**

Este sistema de calentamiento por inducción conlleva una instalación más sencilla que los otros métodos de calentamiento, como puede ser por mecheros de gas o resistencias eléctricas.

El control de temperatura se hace mediante un termopar que es el que dicta si se aporta más energía o menos en función de la temperatura requerida para la soldadura en referencia a la temperatura original. Se puede programar manualmente, luego es una operación automatizada. Esta cualidad es relativamente costosa si tenemos que utilizar calentamiento mediante gas o resistencias eléctricas.

Se debe aislar con cinta ignífuga o con cualquier aislante el contacto directo de la manguera de inducción con la pieza o cupón, ya que estas alcanzarían temperaturas elevadas. Se debe tener en cuenta que el calentamiento se realiza para que durante la soldadura la temperatura en toda la pieza sea lo más homogénea posible.

Posee como una notable ventaja que no produce gases explosivos ni elementos calientes que puedan hacer más complejo el trabajo al soldador.

La configuración del sistema en el conexionado es más compleja que en los demás sistemas de calentamiento puesto que lleva dos circuitos en serie por la misma manguera principal.



**Figura 38. Conexión de inducción. Fuente: Miller**

20 de diciembre de 2017

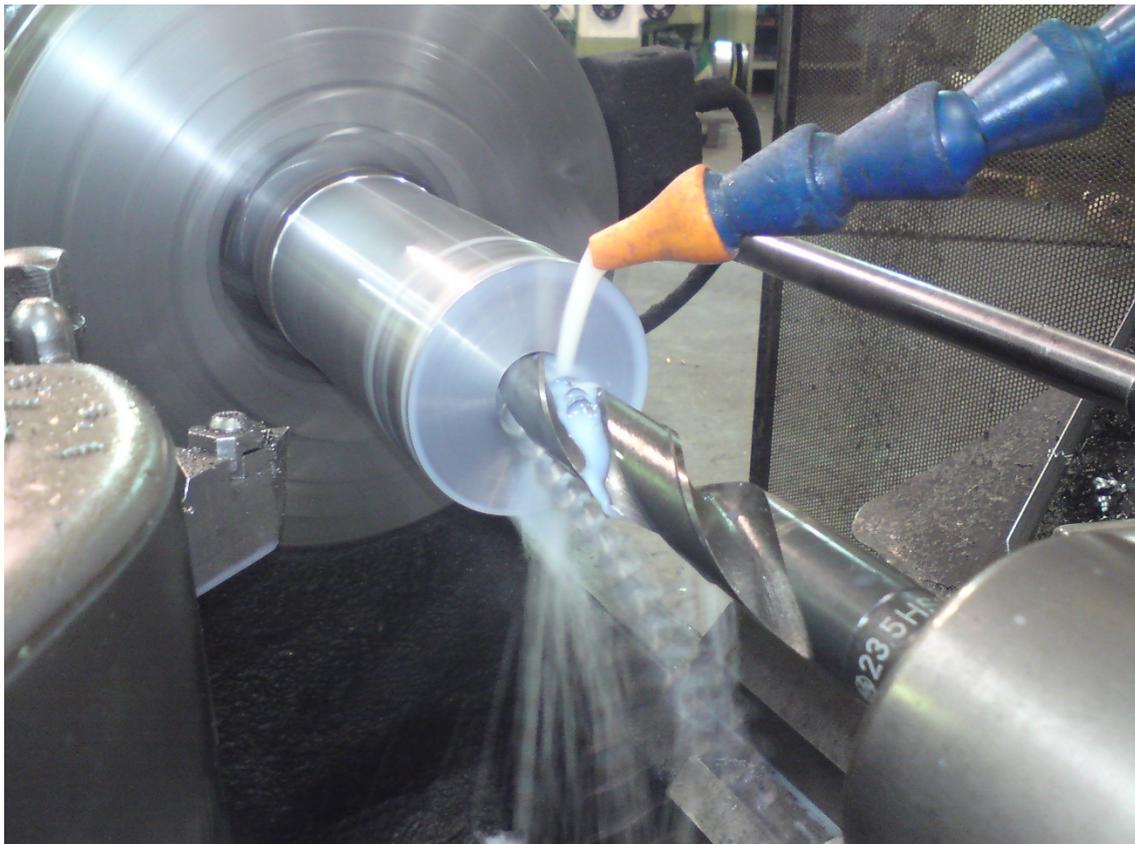
El conexionado consta de una manguera con dos conductos concéntricos. El interior, conduce la electricidad y por el exterior circula el aislante que impide que se quemara la manguera. Entraña un cierto riesgo el conexionado ya que se juntan una corriente trifásica con agua por la misma manguera debiéndose comprobar que el sellado de la manguera interior y exterior este en perfectas condiciones.

### 3.3.1.3 Mecanizado

Las operaciones de mecanizado generan deformación plástica y calor en la zona próxima a la superficie de la pieza mecanizada, dando lugar a tensiones residuales.

Dependiendo de su magnitud y signo, estas tensiones pueden ser perjudiciales o beneficiosas para la vida en servicio de la pieza. El estado final de tensiones depende del proceso de mecanizado aplicado, así como de los parámetros del mismo.

Por tanto, el establecimiento de unas pautas de mecanizado adecuadas requiere una medida precisa de las tensiones residuales generadas, tanto en la superficie, como en el interior del material.



**Figura 39. Mecanizado en un torno.**

El mecanizado constituye uno de los cuatro métodos principales de manufactura de metales. Los otros tres corresponden al forjado, conformado en frío y la fundición. Todos ellos se utilizan para fabricar productos metálicos.

20 de diciembre de 2017

La industria aplica en general procesos de mecanizado cuando se necesitan superficies de piezas muy precisas y lisas ya que resulta ser la modalidad más cara dentro de las metodologías en la manufactura de los metales.

En el mecanizado se utilizan máquinas y herramientas para eliminar virutas de una pieza metálica y obtener así, la forma y tamaño deseado.

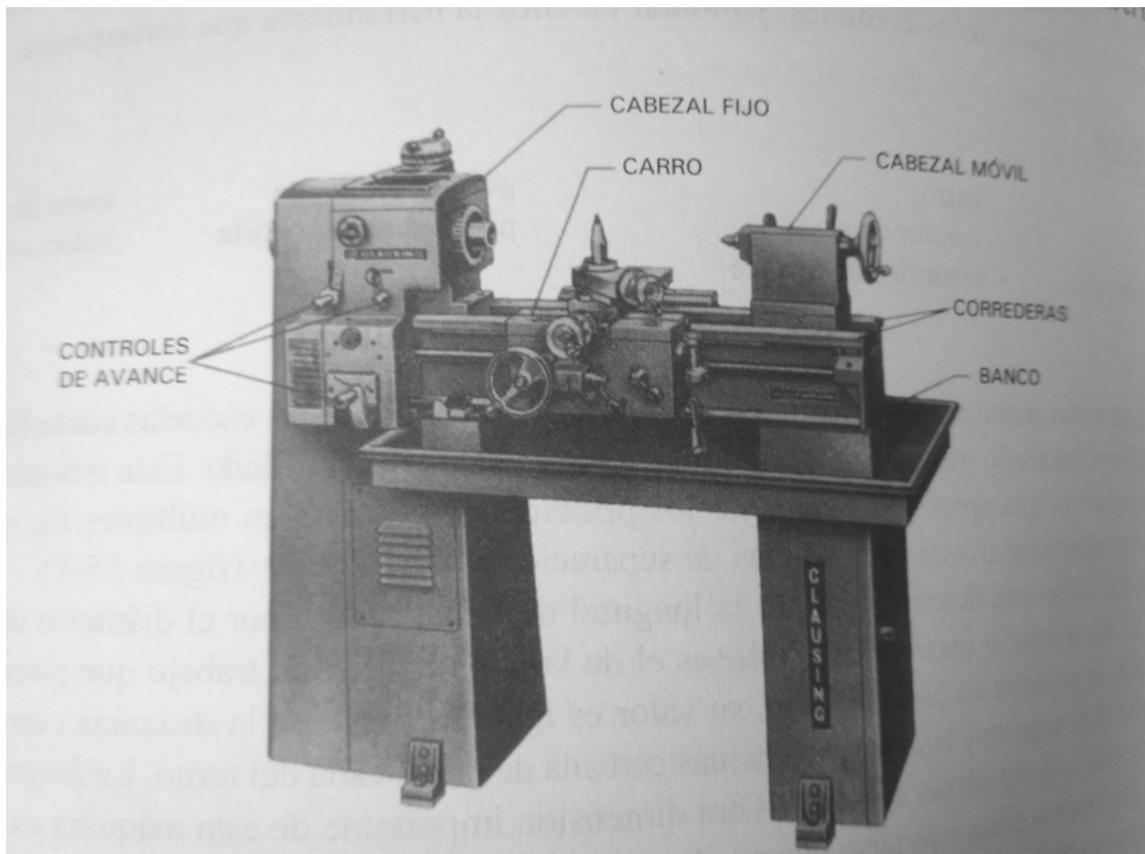
Las máquinas más comunes para mecanizar son los tornos, las fresadoras, taladradoras, perfiladoras y amoladoras.

#### 3.3.1.3.1 Torneado

El torneado se elabora mediante un torno de motor, que funciona haciendo girar la pieza en contacto de una cuchilla afilada.

El tamaño del torno está determinado por la longitud de la bancada y por el diámetro máximo admisible que se corresponde al de la mayor pieza de trabajo que puede tornearse en la máquina. Otra cualidad de los tornos es la denominada distancia entre puntas, limitando la largura máxima de la pieza a tornear.

Los procesos de torneado pueden generar macro tensiones residuales ya que, si la incidencia de la cuchilla en el material no es adecuada, puede formar este tipo de fracturas microscópicas que derivan en un punto débil del material y en una posible futura fractura.



**Figura 40. Partes de un torno convencional. Fuente: Metal tecnología y proceso.**

20 de diciembre de 2017

### 3.3.1.3.2 Fresado

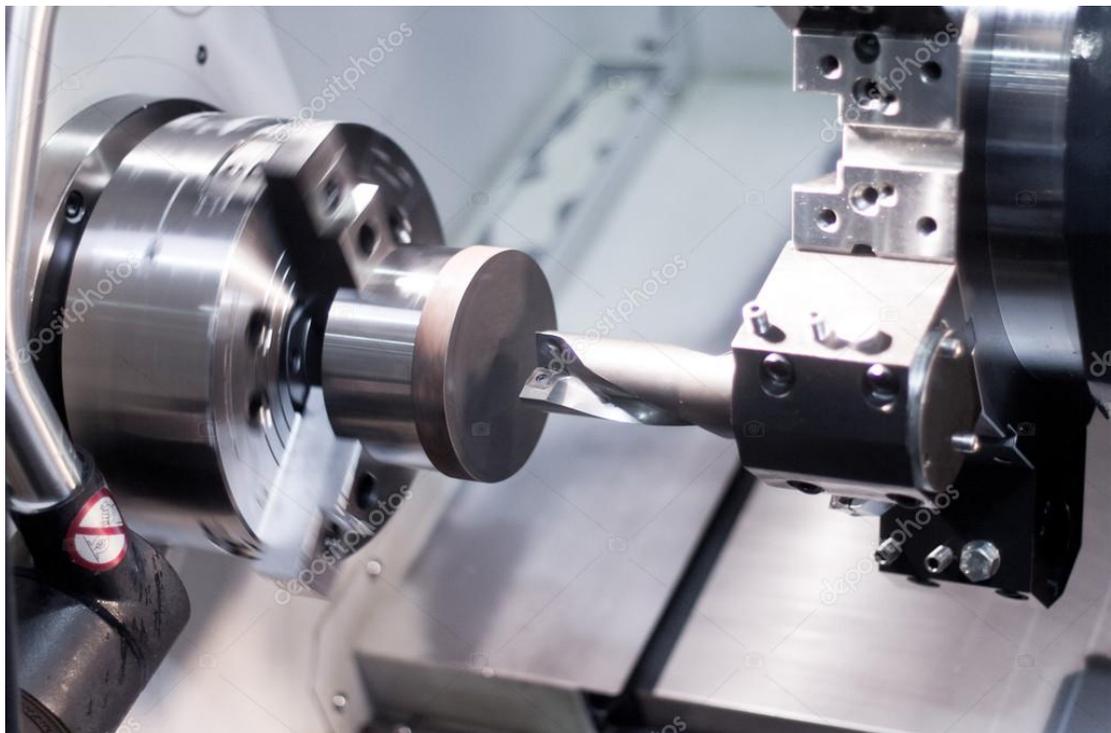
El fresado consiste principalmente en el corte del material que se mecaniza con una herramienta rotativa de varios filos, que se llaman dientes, labios o plaquitas de metal duro, que ejecuta movimientos de avance programados de la mesa de trabajo en casi cualquier dirección de los tres ejes posibles en los que se puede desplazar la mesa donde va fijada la pieza que se mecaniza.



**Figura 41. Fresadora. Fuente: Terratec SAC.**

### 3.3.1.3.3 Perforación

Proceso de mecanizado por el cual se generan perforaciones o taladros y que requiere de múltiples operaciones para obtener la concentricidad y acabados idóneos.

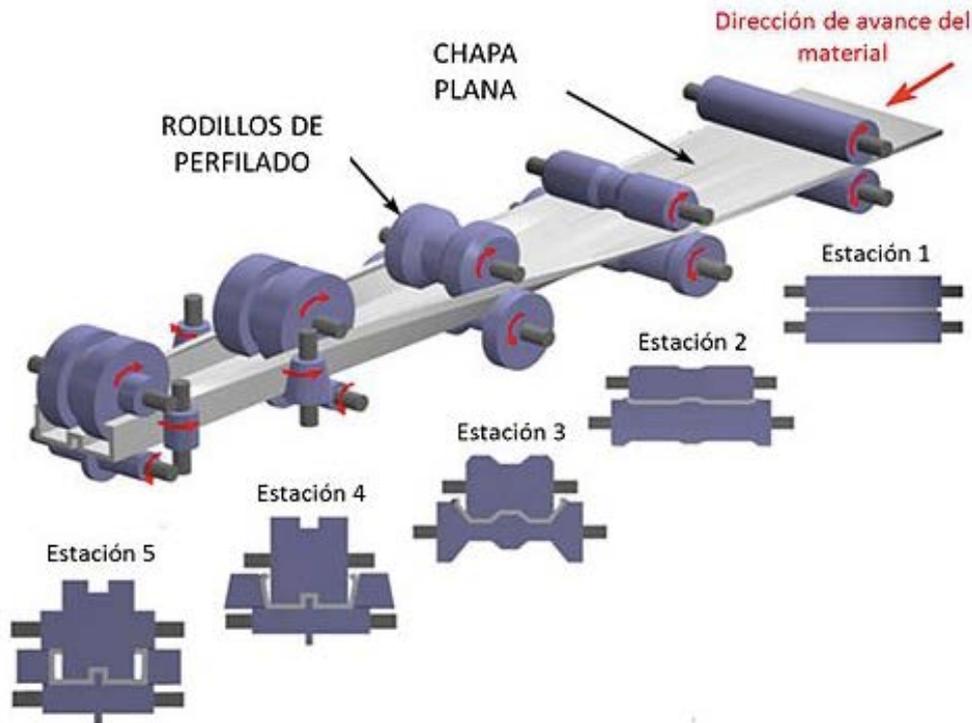


**Figura 42. Perforación estándar.**

20 de diciembre de 2017

#### 3.3.1.3.4 Perfilado

El perfilado es un proceso continuo de mecanizado por deformación plástica que se aplica a una chapa plana. Esta técnica tiene una muy alta productividad.



**Figura 43. Representación esquemática del perfilado de una chapa. Fuente: IMHE**

#### 3.3.1.3.5 Amolado

Operación de mecanizado que se realiza mediante una herramienta que está constituida por una multitud de cuchillas, aglomeradas mediante un cemento que actúa como soporte de las mismas. A esta herramienta se la denomina muela.



**Figura 44. Muela convencional.**

Mediante esta técnica se puede afilar, desbastar o rectificar. La primera operación regenera el filo de cualquier herramienta para la posterior mecanización de otras piezas. El desbaste consiste en el arranque de material para aproximar las piezas a las tolerancias exigidas.

En el caso del rectificado se efectúa amolado final por el que se eliminan de las piezas las posibles irregularidades y desviaciones de carácter geométrico que son inevitables en un proceso normal de mecanización o tratamiento térmico.

20 de diciembre de 2017

El amolado elimina material superficial de la pieza a tratar, lo que puede causar ciertas tensiones residuales.

En general, todas estas operaciones de mecanizado puede llegar a producir tensiones superficiales y deben ser muy tenidas en cuenta ya que ciertos estudios han indicado que se ha observado que el torneado genera fuertes tensiones de tracción en la superficie y el rectificado tensiones de compresión. Inmediatamente, bajo la superficie, el rectificado genera tensiones ligeramente tractivas o nulas, mientras que el torneado genera tensiones fuertemente compresivas.

### 3.3.2 Después del conformado

Una vez que la pieza está conformada debemos cuantificar como son las posibles tensiones residuales producidas por el manufacturado de la pieza o cupón. En el caso de que estas tensiones residuales sean elevadas, deberemos procurar reducirlas con las siguientes técnicas explicadas exhaustivamente.

#### 3.3.2.1 Tratamientos

Los tratamientos térmicos se definen como una operación en la que se eleva la pieza metálica a una temperatura tal que permita modificar sus propiedades. La temperatura alta afecta a la estructura de grano del metal, una cualidad física de importante relevancia ya que los átomos metálicos están dispuestos en estructuras cristalinas que a su vez, se unen para formar minúsculos granos configurados en bloques estrechamente vinculados. El efecto de dichos tratamientos térmicos sobre estos granos suele endurecer o reblandecer el metal.

Un tratamiento mediante calor confiere al metal determinadas propiedades de dureza, tenacidad u otras que se necesiten en el material conformado.

Los pasos principales del tratamiento térmico son: (1) calentamiento hasta la temperatura adecuada, (2) mantenimiento de esta temperatura durante un cierto tiempo y (3) enfriamiento de manera que se obtengan los resultados pretendidos.

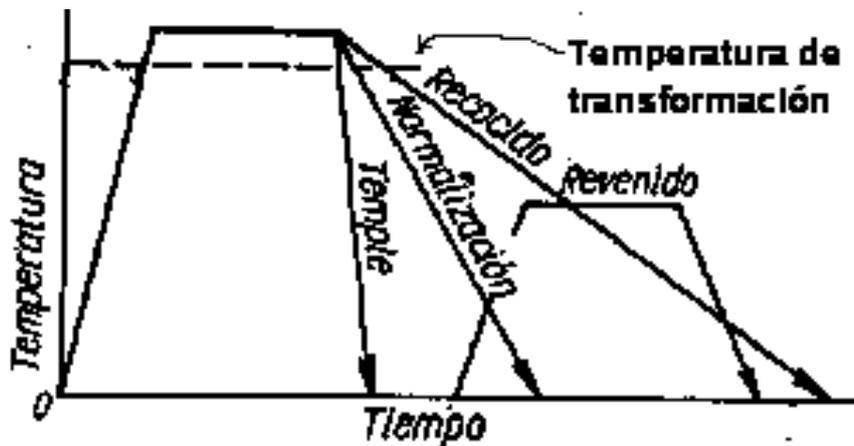


Figura 45. Tipos de tratamientos térmicos. Fuente: <https://sites.google.com>

El tratamiento térmico puede ser un proceso sencillo que exija el mantenimiento de pocas herramientas pero en la industria adquiere el rango de operación de alto contenido científico que obliga al uso de equipos especiales.

20 de diciembre de 2017

El tratamiento térmico se aplica también sobre metales no férreos como el aluminio, el cobre y el latón. En estos metales, sin embargo, el tratamiento presenta particularidades específicas que en este estudio no son de suma importancia ya que nuestro ensayo se realizará sobre un acero.

### **Equipos para tratamiento térmico**

Todos los procesos de tratamiento térmico utilizan los mismos equipos básicos:

- Horno de tratamiento térmico, que aporta la fuente de calor necesaria.
- Baño de enfriamiento, es necesario para varios tratamientos térmicos, no para todos.
- Pinzas de forja si es necesario sujetar el metal caliente.
- Termopares para controlar la temperatura instantánea.

Más adelante se detallarán las características de todos ellos.

### **Tipología de termopares**

Un termopar es un sensor para medir la temperatura. Se compone de dos metales diferentes, unidos en un extremo. Cuando la unión de los dos metales se calienta o enfría, se produce una tensión que es proporcional a la temperatura. Las aleaciones de termopar están comúnmente disponibles como alambre.

Los termopares están disponibles en diferentes combinaciones de metales o calibraciones para adaptarse a diferentes aplicaciones. Los tres más comunes son las calibraciones tipo J, K y T, de los cuales el termopar tipo K es el más popular debido a su amplio rango de temperaturas y bajo costo.



**Figura 46. Conectores del termopar. Fuente: ENSA**

El termopar tipo K tiene un conductor positivo de níquel-cromo y un conductor negativo de níquel-aluminio.

El termopar produce una salida de tensión que puede ser correlacionada con la temperatura que el termopar está midiendo.

20 de diciembre de 2017

Existen también los mismos termopares pero encamisados, para aguantar altas temperaturas a diagnosticar.



**Figura 47. Termopares tipo K encamisados. Fuente: ENSA**

### **Endurecimiento**

El endurecimiento es una operación de calentamiento con posterior enfriamiento del acero para obtener una estructura de grano fino. Este proceso reduce la ductilidad del acero, o capacidad de sufrir deformaciones sin romperse. En cambio, aumenta su dureza, entendida como el grado de firmeza y resistencia de material. También incrementa la resistencia a la tensión, o magnitud de fuerza mecánica que puede resistir sin fracturarse. Los productos se someten a endurecimiento para producir herramientas cortantes afiladas o para mejorar el desgaste en superficies destinada a soportar una fricción.

Para ello, primero se debe calentar el metal y posteriormente se enfría rápidamente. Al calentarlo se produce una reacción física y química entre el hierro y el carbono que contiene el acero.

La temperatura crítica es el valor térmico en el cual el acero alcanza características óptimas. Cuando se llega a esta temperatura, que suele estar comprendida entre los 760 y 870°C, se encuentra en condiciones ideales para obtener un material duro y resistente si se enfría con la mayor rapidez posible.

Hace años la temperatura se valoraba cuándo era la oportuna viendo únicamente el color del metal, pero hoy en día se recurre a pirómetros, registrando temperaturas muy precisas.



20 de diciembre de 2017

Cuando el metal llega a la temperatura crítica marcada por el pirómetro se temple o enfría sumergiéndolo en aceite, agua o salmuera. Esta operación se aplica con el fin de que el metal retenga esas características óptimas que se le han conferido ya que, si se le dejara enfriar con lentitud, recuperaría su condición inicial.

El revenido o recalentamiento es una operación que persigue reducir la dureza y elevar la tenacidad del material. Con ello limita la fragilidad de una pieza endurecida y le confiere una estructura de grano más fina.

El proceso de revenido se realiza recalentando el metal después de endurecerlo, a una temperatura media o baja, y enfriándolo al aire. El calor templado puede determinarse por la medida del pirómetro u observando los colores del templado, ya que el metal, en el proceso, va cambiando de color.

### **Temple**

El temple o recalentamiento es una operación que persigue reducir la dureza y elevar la tenacidad del material. Con ello limita la fragilidad de una pieza endurecida y le confiere una estructura de grano más fina.

El proceso de temple se realiza recalentando el metal después de endurecerlo, a una temperatura media o baja, y templándolo al aire. El calor templado puede determinarse por la medida del pirómetro u observando los colores del templado, ya que el metal, en el proceso, va cambiando de color. Con el acero caliente en un horno a temperatura por encima de la crítica superior, se procede a enfriar bruscamente con aceite.

En esta forma conseguimos una gran dureza en los aceros con contenidos de carbono superiores a 0,35%.

Cada acero, según su composición química, debe ser enfriado a una velocidad mínima necesaria para que en su estructura íntima se produzcan las transformaciones que originan la aparición de microconstituyentes duros, y a esta velocidad de enfriamiento se le denomina velocidad crítica.

Tras el temple aumenta la dureza, resistencia, límite elástico y disminuye el alargamiento.

La severidad del temple puede ser graduada eligiendo un medio de enfriamiento conveniente, pudiendo usarse agua con aproximadamente 10% de sal, agua pura o aceite entre otros, y así mismo dependerá de la temperatura de dicho medio.

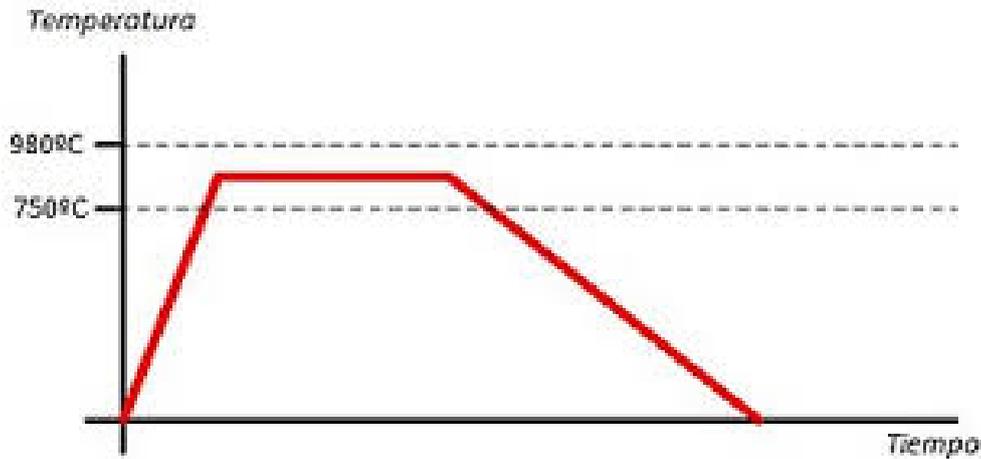
### **Recocido y normalización**

El recocido es una operación de reblandecimiento del metal para liberar tensiones internas y hacerlo más adecuado para las tareas de modelado y corte siempre y cuando sean necesarias.

En esta operación, el metal se calienta hasta la temperatura crítica y después se enfría lentamente. Cuanto más lento es el enfriamiento, más blando queda el metal.

20 de diciembre de 2017

Este es el tratamiento térmico que nos interesa para aliviar las tensiones residuales en el metal acumuladas durante el proceso de fabricación ya que, si no se liberaran, estas tensiones producirían combaduras o fracturas en las piezas.



**Figura 48. Diagrama térmico en un recocido convencional.**

A menudo, los metales se someten a procesos de recocido después de salir de los trenes de laminación o las fundiciones. El recocido mejora la estructura del grano de los metales y facilita los trabajos ulteriores de mecanizado.

Por su parte la normalización consiste en la recuperación de las condiciones normales de un metal después de una forja o un tratamiento térmico incorrecto. En esta operación, el acero se calienta por encima de la temperatura de endurecimiento y luego se enfría al aire, es muy semejante al recocido, pero tiene otro fin completamente distinto.

En el proceso del recocido es necesario controlar los gradientes térmicos de la pieza, visualizando y anotando en función del tiempo la temperatura de cada termopar.

Existen casos en que el gradiente térmico es tan reducido que se pueden dar recocidos de más de 48 horas.

### **Endurecimiento superficial**

Es una técnica que se aplica en la superficie exterior de los componentes. Si por ejemplo se añade una pequeña cantidad de carbono a la superficie del acero durante el tratamiento térmico, la superficie endurecerá, mientras que la parte interior permanecerá dúctil y blanda.

Existen varios métodos de endurecimiento superficial:

**Cementación:** Consiste en aumentar la cantidad de carbono de la capa exterior de los aceros. Se mejora la dureza superficial y la resiliencia. Se aplica a piezas que deben ser resistentes a golpes y a la vez al desgaste.

**Nitruración:** Consiste en endurecer la superficie de los aceros y fundiciones. Las durezas son elevadas y tienen alta resistencia a la corrosión. El componente químico añadido en este caso es nitrógeno, que se obtiene del amoníaco.

20 de diciembre de 2017

**Cianuración:** Se trata de endurecer la superficie del material introduciendo carbono y nitrógeno. Es una mezcla de cementación y nitruración. La temperatura es intermedia entre la utilizada para la cementación y la nitruración, que es mucho menor que aquella. Se aplica a los aceros a partir de un baño de sales de cianuro.

#### 3.3.2.1.1 Hornos

Los hornos industriales son los equipos o dispositivos utilizados en la industria, en los que se calientan los materiales y las piezas o elementos colocados en su interior por encima de la temperatura ambiente.

El objeto de este calentamiento puede ser muy variado, por ejemplo:

- Alcanzar la temperatura necesaria para que se produzcan las reacciones químicas necesarias para la obtención de un determinado producto.
- Cambios de estado (Fusión de los metales y vaporización).
- Ablandar para una operación de conformado posterior.
- Tratar térmicamente para lograr determinadas propiedades.
- Recubrir las piezas con otros elementos, operación que se facilita frecuentemente operando a temperatura superior a la del ambiente (Vitrificado de los productos cerámicos).

En el trabajo de los metales, la temperatura desempeña un papel de gran importancia. Las temperaturas elevadas vuelven más blandos la mayoría de los metales, capacitándolos para las operaciones de deformación por flexión, forja, estampación, extrusión o laminación.



**Figura 49. Horno industrial.**

Las temperaturas todavía más elevadas funden los metales y también eliminan la acritud de los mismos; el proceso de calentamiento de los metales con este fin, enfriando después de modo que no se produzca ninguna deformación, se conoce como recocido.

La elevación de la temperatura por encima de un cierto punto crítico, seguida de un enfriamiento brusco, vuelve el acero más duro y resistente pero con una ductilidad menor.

20 de diciembre de 2017

Un nuevo calentamiento a una temperatura inferior al punto crítico disminuye la dureza y aumenta la ductilidad. Se conoce como tratamiento térmico el proceso completo que tiene por objeto producir unas propiedades físicas deseadas, controlando la estructura cristalina.

Las operaciones industriales abarcan una amplia gama de temperaturas, las cuales dependen del material a calentar y también (para un material dado) del objeto del proceso de calentamiento y de las operaciones subsiguientes.

#### 3.3.2.1.1.1 Tipos de hornos

La forma de calentamiento da lugar a la clasificación de los hornos en dos grandes grupos, con diversos tipos.

##### 3.3.2.1.1.1.1 Hornos de gas

Las características principales en un horno de gas convencional que se deben mencionar para realizar correctamente un tratamiento térmico ordinario serán:

**Dimensionamiento**

**Temperaturas normales de tratamiento**

**Temperatura de la cámara del horno**

**Temperatura del material**

**Velocidad del calentamiento**

**Combustible**

**Potencia calorífica superior**

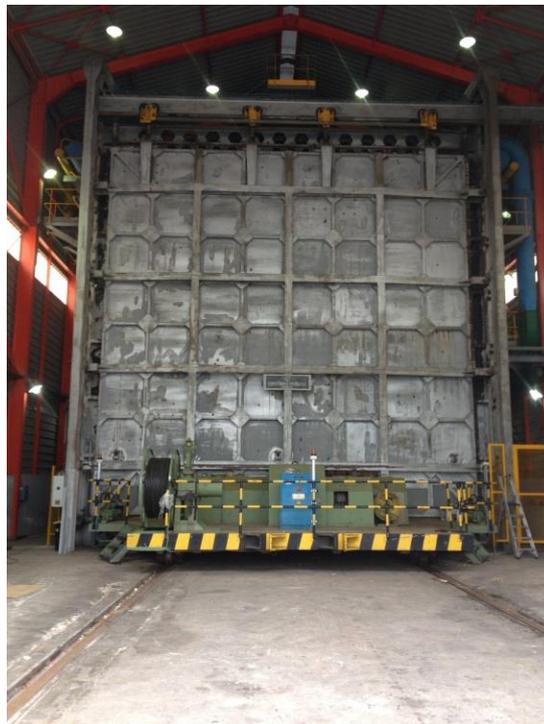
**Potencia calorífica inferior**

**Temperatura de llama**

**Quemadores**

**Carga máxima**

**Refractario envolvente**



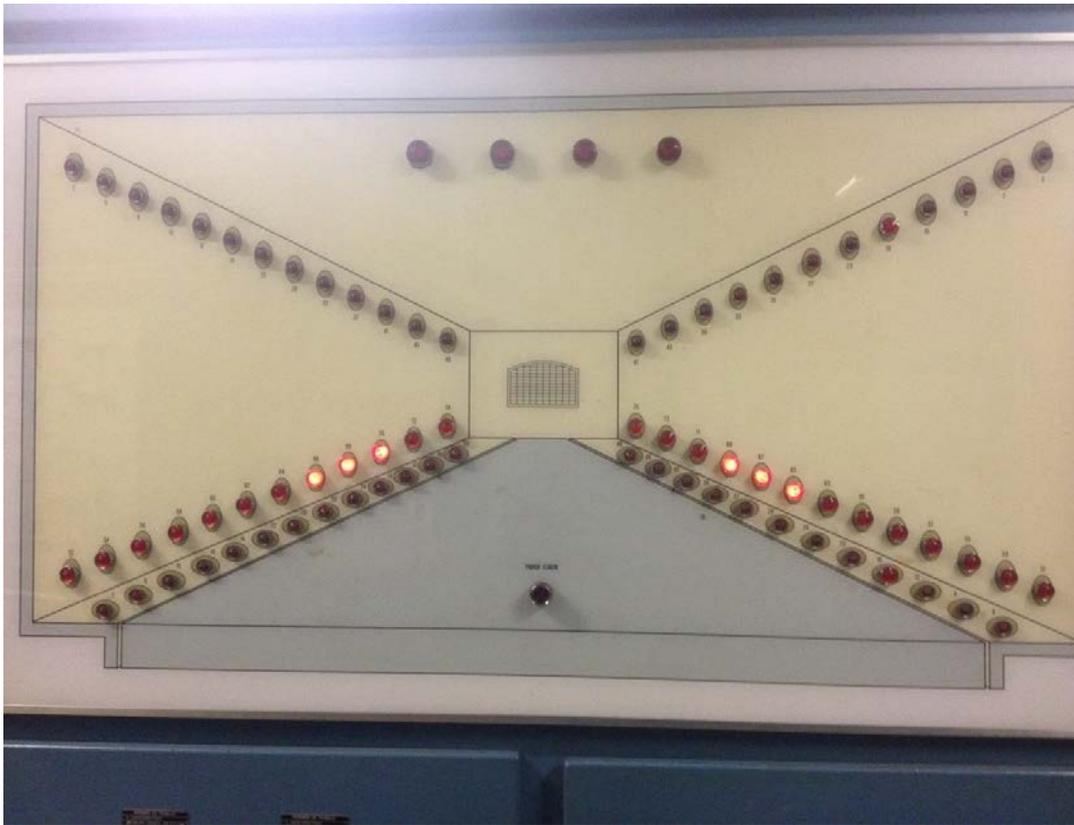
**Figura 50. Vista frontal de un horno convencional. Fuente: ENSA**

20 de diciembre de 2017

## Regulación de temperatura

En la regulación a valor fijo, el punto de consigna de temperatura es fijado manualmente sobre cada regulador de temperatura.

La regulación de la temperatura normalmente está distribuida en varias zonas en el horno, en el sentido de su longitud y en cada zona puede adaptarse a la temperatura conveniente según el accionamiento de los quemadores.



**Figura 51. Panel de quemadores. Fuente: ENSA**

En la Figura 51 se puede ver la configuración del horno en función de los quemadores para así incrementar homogéneamente la temperatura en toda la pieza a tratar.

El encendido/apagado de los diferentes quemadores se realiza desde la cabina de mandos, lo que permite controlar la temperatura en función del número y posición de los quemadores durante el tratamiento y en función de cómo vaya incrementándose la temperatura.

La gran mayoría de los tratamientos tienen unas condiciones y especificaciones determinadas en cuanto al g (Cheung, 1967; Metalmecánico, 2012 ; C. A. Walker A. J. Waddell D. J. Johnston, 1994; Claxton, 1991) radiante térmico en función del tiempo, por lo que controlar este tipo de quemadores es muy importante para efectuar correctamente dicho tratamiento.

En la cabina se dispone de un sinóptico en el que se pueden observar los quemadores que están en funcionamiento para así saber cuál accionar en el caso de que una determinada zona haya que calentarla o enfriarla según el tratamiento a realizar.

20 de diciembre de 2017



Figura 52. Interruptores individuales de los quemadores.



Figura 53. Conjunto de interruptores de los quemadores. Fuente: ENSA

20 de diciembre de 2017

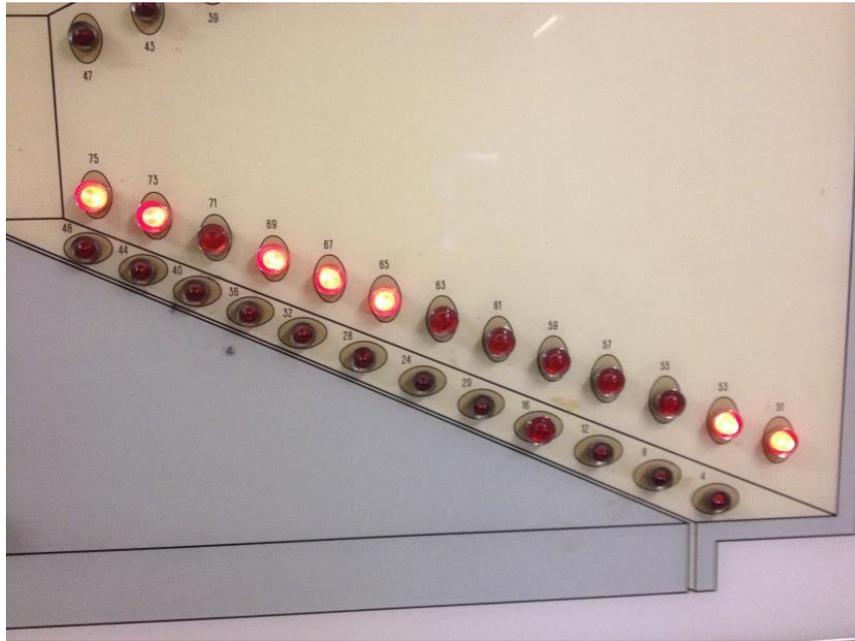


Figura 54. Registro de quemadores en funcionamiento. Fuente: ENSA

### Registro de temperatura

Para efectuar la medición de las temperaturas de las piezas se utilizan termopares de contacto de tipo “k” colocados sobre la pieza tratar.

Estos termopares envían una señal a un registrador donde queda descrita la gráfica temperatura/tiempo. Estos termopares se componen de dos cables que cierran un circuito en la pieza, determinando la temperatura a la que se encuentra la misma.

Durante todo el ciclo de tratamiento, la temperatura queda registrada por medio de registradores de canales multipuntos o registradores digitales.



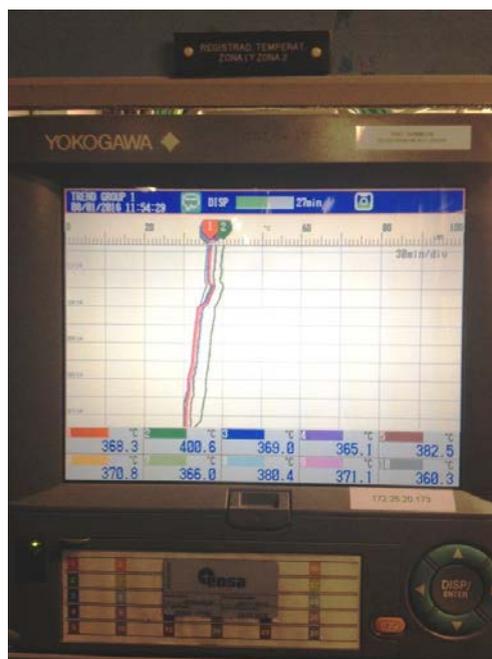
Figura 55. Registrador junto a croquis. Fuente: ENSA

20 de diciembre de 2017



**Figura 56. Termopares de tipo "K" colocados. Fuente: ENSA**

El horno está provisto de ciertas cañas pirométricas instaladas en sus paredes laterales y en la bóveda, que envían la señal de temperatura a un registrador digital y a cada uno de los reguladores de temperatura, de forma que es posible ver la temperatura en el interior de la cámara.



**Figura 57. Gráfica con la temperatura real de los termopares en función del tiempo, Fuente: ENSA**

20 de diciembre de 2017



Figura 58. Reguladores de zona.

Estos reguladores de zona miden la temperatura que existe en las cuatro zonas previamente delimitadas dentro del horno, siendo las más desfavorables controladas, para conocer en todo momento cuál es la diferencia térmica existente entre la zona más caliente en el horno y la que menos.

#### **Nº de quemadores pilotos**

Cada quemador principal llevará un quemador piloto con encendido por chispa para que se produzca la ignición y por consiguiente efectuar el aporte calórico.

#### **Nº de ventiladores**

Cada zona lleva un ventilador centrífugo y los pilotos un ventilador centrífugo único para todos ellos. En total suelen ser dos o cuatro zonas de ventilación en todo el horno.

#### **Circuito de aire de combustión, quemadores pilotos**

Cada quemador piloto debe ser alimentado con gas rico.

#### **Quemadores principales**

Encargados de transformar el gas rico en un aporte energético continuo calórico al interior del horno, acoplados con un quemador piloto responsable de crear la chispa correspondiente para iniciar la combustión.

20 de diciembre de 2017



**Figura 59. Conjunto de quemador individual. Fuente: ENSA**

### **Refractario del horno**

El refractario es un factor muy importante en un horno ya que nos indica la cantidad de calor que va a malgastarse por pérdidas en la transmisión de calor, lo que conlleva a un sobrecoste en la cantidad de energía empleada para realizar el tratamiento térmico correspondiente.

En las paredes laterales:

1º Capa espesor de 230 mm de refractario aislante  $d=0.6 \text{ kg/m}^3$

2º Capa espesor de 50 mm de placa aislante  $d=0.4 \text{ kg/m}^3$

Con un espesor total de 280 mm.

Bóveda:

1º Capa espesor de 190 mm de refractario aislante  $d=0.85 \text{ kg/m}^3$

2º Capa espesor de 60 mm de hormigón aislante  $d=0.28 \text{ kg/m}^3$

Con un espesor total de 250 mm en la bóveda.

Las paredes laterales irán ancladas al blindaje mediante ganchos y sobre apoyos de acero refractario y bloques de hormigón refractario ligero.

Los materiales de la bóveda serán fijados a los perfiles de sustentación mediante grapas de fundición y tornillos de acero inoxidable.

20 de diciembre de 2017



**Figura 60. Refractario lateral y superior del horno. Fuente: ENSA**

## **Solera**

### **Colocación de pieza sobre la solera**

Tanto la colocación de la pieza en la solera como el número de termopares varía en función del tratamiento térmico que interese efectuar. Otro dato importante a tener en cuenta es la capacidad de peso que puede soportar la solera.



**Figura 61. Solera. Fuente: ENSA**

20 de diciembre de 2017



**Figura 62. Pieza colocada en la solera. Fuente: ENSA**



**Figura 63. Pieza preparada para tratamiento térmico. Fuente: ENSA**

20 de diciembre de 2017

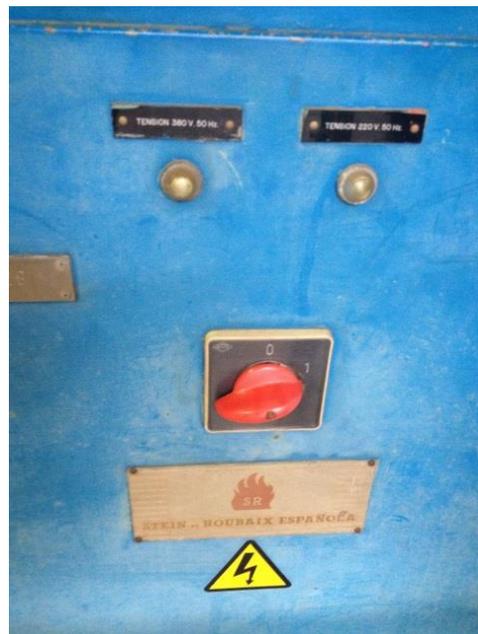


**Figura 64. Solera perfil derecha. Fuente: ENSA**

### **Desplazamiento de solera**

El avance/retroceso de la solera se puede controlar en dos puntos:

-Un cuadro de mando colocado en la solera, permite controlar el avance y retroceso.



**Figura 65. Interruptor puesto en marcha de la solera. Fuente: ENSA**

Como medida preventiva se dispone de un pulsador en el retroceso para asegurar que la movilidad de la solera será efectuada siempre por un operario. Aunque su velocidad sea pequeña (6 m/min) siempre es recomendable la supervisión de una persona por el riesgo de atropello de personas o materiales.

La parada es necesaria ya que el avance funciona mediante un interruptor que únicamente puede ser detenido mediante el botón parada o en su defecto por el final de carrera que está situado en el horno.

20 de diciembre de 2017



**Figura 66. Pulsadores de avance, retroceso y parada. Fuente: ENSA**

-Una botonera colocada en la barandilla de la solera. En este caso solo permite controlar el avance.



**Figura 67. Botonera de avance. Fuente: ENSA**

Un reductor TANDEM, compuesto por 4 trenes de engranajes cilíndricos helicoidales, con carcasa en acero laminado, con dos ejes de salida y un eje de entrada.

La solera consta de ruedas libres de sustentación y de ruedas motrices, siendo estas las que reciben el par motor procedente del motor eléctrico propulsor de la solera.

Para evitar el deslizamiento de las ruedas motrices, se elige la tracción sobre cuatro ruedas por hilera.

El equipo motor consta de un grupo moto-reductor de 30CV con dos ejes de salida, uno por hilera, en cada uno de los cuales va montado un piñón para transmisión por cadena.

Dicho piñón mueve la rueda de cadena acoplada a la segunda rueda motriz por hilera, que a su vez transmite su movimiento a las ruedas motrices.

Todo este mecanismo está acoplado en la parte delantera de la solera.

20 de diciembre de 2017

### **Velocidad de traslación de la solera 6 m/min**

Antes de subir el cierre del horno se debe poner en marcha la bomba turbo-soplante que está junto a la chimenea y pararla una vez esté el cierre arriba. El objetivo es mantener suelta la arena del cajón de cierre para que entre la chapa sin dificultad y evitar así pérdidas en la transmisión de calor.

### **Traslación de la puerta, apertura/cierre de puerta**

El cierre de la puerta se realiza mediante un sistema de cilindros neumáticos que comprimen la puerta contra el cierre.



**Figura 68. Cilindros neumático superiores de la puerta. Fuente: ENSA**



**Figura 69. Cilindros neumáticos de la puerta. Fuente: ENSA**

20 de diciembre de 2017

La apertura/cierre de la puerta se realiza desde el cuadro de mandos situado junto a la puerta, accionando los cilindros neumáticos que mantienen la puerta cerrada.

El avance y retroceso de los cilindros neumáticos se controla mediante la palanca colocada debajo de este cuadro de mandos.



**Figura 70. Botonera control de la puerta y señalizado de la palanca que ejecutan los cilindros neumáticos.**  
Fuente: ENSA

### Seguridad en el horno

El horno entra en seguridad, en caso de falta de:

- Presión de gas
- Presión de aire de combustión en quemadores principales
- Presión de aire de combustión en quemadores pilotos
- Temperatura excesiva
- Corriente eléctrica

Produciéndose automáticamente las siguientes operaciones:

- Parada de todos los quemadores pilotos por cierres de las electroválvulas de aire y gas
- Cierre del registro de presión del horno
- Alarmas sonoras y luminosas

### Pasos operativos para realizar el tratamiento

1. Retirado de gomas de seguridad de las vías: Despejar el vial por el que se desplaza la solera.

20 de diciembre de 2017



**Figura 71. Gomas de seguridad. Fuente: ENSA**

2. Traslado de la solera a nave de fabricación.
3. Colocación de la pieza sobre la solera (Preparación previa del puesto).
4. Colocación de termopares para control de la temperatura según especificación.
5. Traslado de la solera al horno.
6. Colocación de gomas de seguridad en las vías.
7. Estirado conexión de termopares.
8. Subida del cierre del horno.
9. Cierre de la puerta y fijado de cilindros neumáticos.
10. Encendido del cuadro de mandos de la cabina y arranque de ventiladores.



**Figura 72. Interruptores de los ventiladores. Fuente: ENSA**

11. Apertura de válvula de gas abriendo machete general.

20 de diciembre de 2017



**Figura 73. Acometida de la entrada de gas. Fuente: ENSA**



**Figura 74. Acometida de la entrada de gas. Fuente: ENSA**



**Figura 75. Machete que permite la apertura de la conexión general del gas. Esta no se puede accionar si los ventiladores no están en marcha. Paso Nº10. Fuente: ENSA**

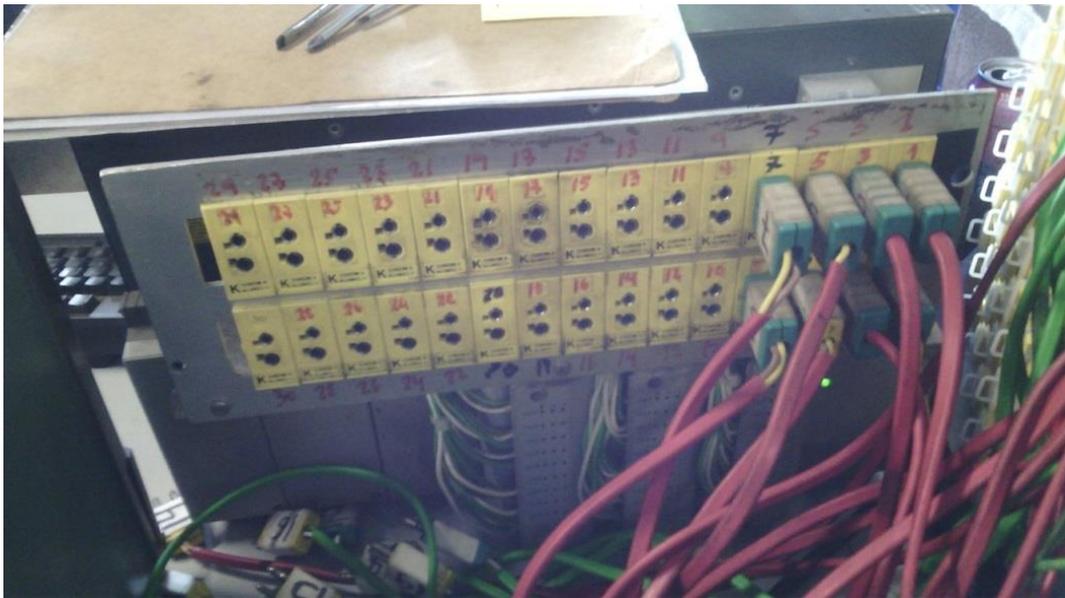
20 de diciembre de 2017

12. Prueba funcional de los TC's en registrador (Comprobar continuidad)

13. Comienzo de tratamiento

En este paso, es importante comprobar si funciona todo correctamente ya que se trata de tratamientos térmicos de recocido en los que el gradiente térmico debe ser controlado, por lo que duración total del tratamiento a efectuar puede superar con facilidad las 24 horas. Si algo falla durante el proceso es muy probable que sea por una mala comprobación al iniciar el trabajo.

14. Al comenzar el tratamiento se abre la válvula de agua para la refrigeración de la chimenea

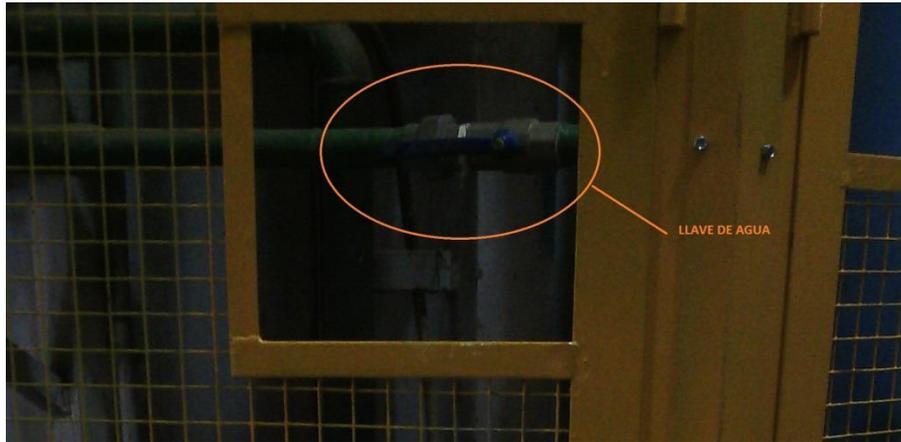


**Figura 76. Conexión del registrador analógico. Fuente: ENSA**



**Figura 77. Conexión del registrador digital. Fuente: ENSA**

20 de diciembre de 2017



**Figura 78. Paso de agua para la refrigeración de la chimenea. Fuente: ENSA**

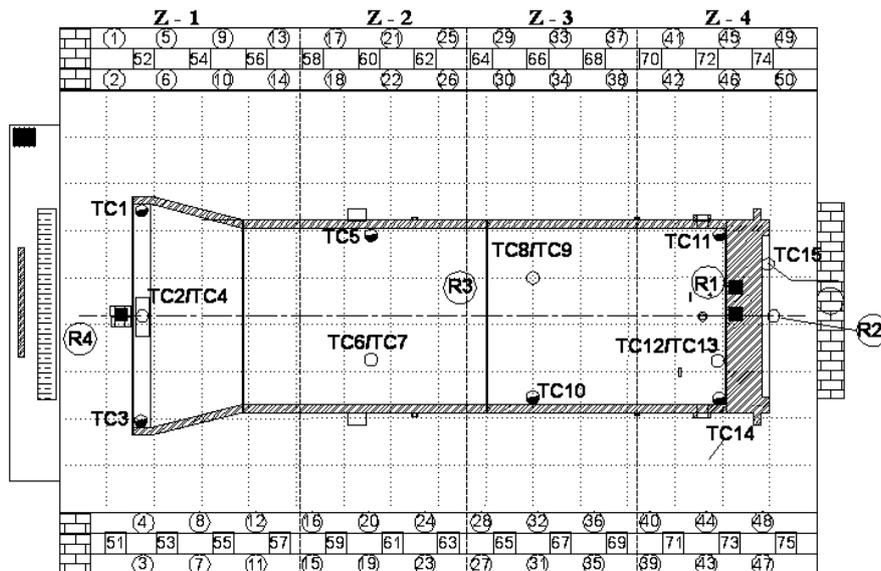
Terminado el tratamiento se apagan quemadores y ventiladores.

Se procede a la apertura de la puerta, se baja el cierre, se sueltan TC's del armario de conexión.

Se traslada la solera. Cuidado con los posibles gradientes de temperatura, es decir abrir cuando se tenga constancia de que el gradiente térmico entre el interior y exterior no suponga un riesgo para la seguridad de los operarios.

Traslado de la pieza a naves de fabricación donde antes de la descarga de la pieza se recogerán todos los TC's y sus soportes, engrasando estos a continuación para el siguiente tratamiento.

Una vez explicado cómo funciona un horno de gas convencional deberemos realizar un croquis para saber dónde situar la pieza o cupón en la solera, para reflejar qué quemadores inciden sobre qué parte de la misma, y los posibles termopares (TC's) afectados una vez empezado el tratamiento.



**Figura 79. Croquis de la pieza a tratar. Fuente: Elaboración propia.**

20 de diciembre de 2017

*3.3.2.1.1.2 Hornos de resistencias*

El calentamiento mediante resistencias eléctricas posee ciertas ventajas que se señalan a continuación:

1. Ausencia de los humos de combustión.
2. Mejores condiciones ambientales de trabajo en la zona exterior del horno.
3. Mayor seguridad para el personal.
4. Posibilidad de mantener los hornos sin vigilancia fuera de las horas de trabajo por eliminación del peligro por explosiones.
5. Sencillez en la automatización de las resistencias eléctricas.

Este tipo de hornos poseen unas resistencias eléctricas, que se calientan por el efecto Joule cediendo calor a la carga por las diversas formas de transmisión de calor.

El procedimiento a seguir, a la hora de efectuar un tratamiento térmico es exactamente igual que en los hornos de gas, lo único que varía es la forma en que se obtiene el calor para efectuar el proceso.



**Figura 80. Horno de resistencias. Fuente: Vulka.es**

*3.3.2.2 Alivio de tensiones residuales (VSR)*

Vibration stress relief (VSR) es el término general que se utiliza para referirse a la reducción de las tensiones residuales mediante tratamientos de carga cíclica. Como comúnmente aplicado, un tratamiento de VSR implica la vibración del componente en resonancia, con el fin de alcanzar amplitudes de alta tensión utilizando un equipo portátil relativamente barato en comparativa a los hornos térmicos convencionales. Varias empresas han estado aplicando un VSR durante al menos 20 años.

Todo tipo de componentes han sido sometidos a esta forma de tratamiento oscilando en tamaño desde unos pocos kilogramos a grandes conjuntos soldados de varios cientos de toneladas de masa.

20 de diciembre de 2017

Para este estudio vamos a disponer del modelo VCM 905 de la marca VSR pioneras en esta nueva técnica, que con las siglas hace referencia al término Vibratory Stress Relief.



Figura 81. Máquina VCM 905 (Distensionado por vibraciones). Fuente: ENSA

#### 3.3.2.2.1 Glosario de términos “Vibratory Stress Relief”

Para dominar la maquinaria garantizando un correcto funcionamiento es necesario saber cómo se comporta y es fundamental definir los siguientes términos.

- **Acelerómetro:** Pequeño sensor que, al serle aplicadas fuerzas “g”, emite una señal eléctrica que puede ser impresa en un osciloscopio o en un registrador de gráficos.
- **Amplitud:** El movimiento dimensional entre pico y pico.
- **Antinodo:** El punto medio entre dos nodos.
- **Ciclo:** El periodo de tiempo que requiere un movimiento completo dentro de una sucesión de movimientos regulares.
- **Amortiguación:** Pérdida de vibración al entrar en contacto con un cuerpo masivo como el suelo.
- **Frecuencia (Hz):** El número de ciclos por segundo de una vibración periódica
- **“g”:** Fuerza gravitacional ->  $1g=9.8 \text{ m/seg}^2$ .
- **Aproximación:** Ajuste de amplificación de una señal.
- **Modo:** El modelo de vibración de una componente de vibración.
- **Nodo:** El área o línea sosegada de una componente de vibración.
- **Pico:** La mayor amplitud de una respuesta resonante

20 de diciembre de 2017

- **Resonancia:** La condición de alcanzar la máxima respuesta cuando una alteración periódica, con una frecuencia igual a la del sistema, hace que esté en oscilación. En la práctica sucede cuando el movimiento elástico del componente está en concordancia con la velocidad (frecuencia) y la dirección (fase) de la vibración, la amplitud se incrementa y existe la resonancia. Ej.: Si se empuja a un niño en un columpio, empujándole antes de que llegue hasta arriba, se va frenando. En cambio, si se le empuja justo cuando comienza a bajar, acelera y aumenta la amplitud.
- **Respuesta sonante:** La condición de estar en resonancia
- **Frecuencia natural:** La frecuencia a la que aparece un pico de resonancia.



**Figura 82. Acelerómetro. Fuente: ENSA**

#### 3.3.2.2.2 Introducción y modo de ejecución

El tratamiento VSR (reducción de tensiones residuales por vibración) es un tratamiento novedoso utilizado en sustitución o complementariamente al método térmico para la estabilización de acero en fabricaciones, fundiciones y barras.

El equipo VSR que se utiliza es portátil y los componentes pueden ser vueltos a tratar en cualquier fase de fabricación dotando a esta técnica de importante ventaja, ya que las piezas no sufren ningún cambio metalúrgico al no estar sometidas a ningún calentamiento que pueda modificar la estructura interna del material.

El éxito del tratamiento VSR depende en gran medida del buen estado del equipo, así como de que el operario se atenga a los procedimientos en la secuencia a seguir.

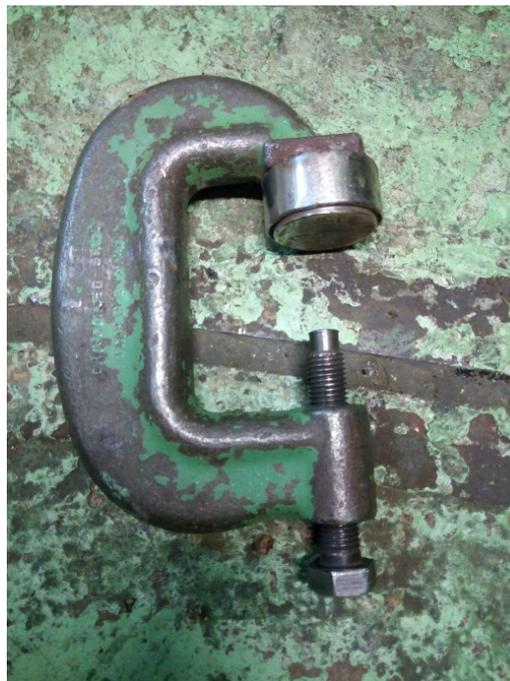
El equipo a utilizar en este estudio para la reducción de tensiones residuales por vibración será el modelo VCM 905.

Antes de proceder con el distensionado, se deberá de tener en cuenta dos reglas esenciales. La primera es aislar la pieza a distensionar del suelo. De no ser así, las vibraciones no inciden en las tensiones residuales existentes en la pieza. Por ello, se aislará la pieza a trabajar del suelo mediante tacos de goma.

20 de diciembre de 2017



**Figura 83. Tacos de goma. Fuente: ENSA**



**Figura 84. Sargenta. Fuente: ENSA**

La segunda regla a cumplir para conseguir un cierto éxito en el procedimiento es conseguir el mayor anclaje del motor vibrador con la pieza. En la práctica las sargentas de serie no anclan con total seguridad, por lo que se procede a diseñar un utillaje que mejora al anclaje que venía de serie con la máquina VCM 905 compuesto de dos sargentas.

20 de diciembre de 2017



**Figura 85. Detalle del utillaje creado fijador para la fijación de la pieza. Fuente: ENSA**

### 3.3.2.2.3 Equipo VCM 905

El manual del equipo se adjunta como anexo.

#### 3.3.2.2.3.1 Campo de aplicación

En primer lugar, hay que saber con qué materiales se va a trabajar, puesto que algunas condiciones de los tratamientos térmicos y de los procesos de refrigeración limitan la efectividad del sistema VSR.

Normalmente se pueden estabilizar los siguientes materiales:

1. Una amplia variedad de hierros fundidos y aceros blandos.
2. Aceros de baja aleación. Componentes de gran resistencia en dimensiones próximas a las finales.
3. Aceros de bonificación (recocidos o templados),
4. Aceros inoxidables, martensíticos, ferríticos o austeníticos.
5. Aleaciones de baja resistencia pueden ser tratadas, pero con poca potencia y durante breves periodos.

El proceso no será totalmente efectivo en compuestos de níquel, aluminio o titanio que hayan sido estirados.

De forma genérica, los materiales que no pueden ser estabilizados son:

1. Materiales laminados en frío, estirados o sometidos previamente a grandes esfuerzos.
2. Aleaciones de gran resistencia sin previo desgaste.
3. Materiales con poca eficacia sobre la energía elástica incorporada.

El proceso no tiene efecto sobre las tensiones introducidas por mecanizados posteriores al tratamiento, ya que estas tensiones residuales se han vuelto a producir por el procesado. El proceso VSR no produce decoloración y ninguna distorsión se puede aplicar en piezas manufacturadas.

20 de diciembre de 2017

El proceso VSR no produce cambios metalúrgicos, por lo tanto, no es apropiado para la mayor parte de trabajos de tuberías (por problemas de corrosión o de altas presiones) ni para recipientes a presión, y componentes sujetos a resquebrajamiento por frío o fatiga severa.

#### 3.3.2.2.3.2 Consideraciones a tener en cuenta

##### A) El acelerómetro

- Tipo: Dependiendo del tipo y sección de la pieza, se utiliza uno u otro.
  - HT110 (10-110 Hz), menor velocidad-mayor fuerza
  - HT220 (20-220 Hz), mayor velocidad-menor fuerza
- En fabricaciones y fundiciones férricas y no-férricas.
  - Piezas con paredes estrechas (<50mm); HT220 y HT110
  - Piezas con paredes gruesas (>50mm); HT220 y HT110
- En fabricaciones y fundiciones de aluminio:
  - Piezas con paredes estrechas (<50mm); HT220
  - Piezas con paredes gruesas (>50mm); HT220 y HT110

##### B) Soportes de sujeción

- Tipo de sujeción: Sargento forzado "G" o de cremallera para entallador. No usar nunca un sargento con bola giratoria.
- Posición: Siempre en el extremo de las piezas.

Chequear periódicamente la sujeción de las sargentas.

##### C) Soportes de apoyo

- Tipo:
  - Para piezas pequeñas (tapas, cupones, placas bases de racks...) se utilizan soportes de goma.
  - Para piezas grandes se utilizan soportes de acero con goma en la parte superior.
- Posición: Colocar los soportes separados de los extremos o esquinas.

#### 3.3.2.3 Secuencia del tratamiento

##### **Resumen de la secuencia del tratamiento Automático**

1. Antes de conectar el dispositivo excitador se deberán efectuar las soldaduras
2. Posicionar y fijar el excitador de mayor velocidad / menor fuerza HT220.
3. Posicionar el acelerómetro.
4. Si es posible, espolvorear sobre la pieza *polvo de chorro de aire o similar*.
5. Utilizar una toma eléctrica protegida RCD de 30mA. Conectar cables y soltar (G). Colocar el interruptor (U).
6. Conectar y enchufar el registrador.
7. Mantener el control auto/manual (J) hacia la izquierda, se ilumina (R) que es la velocidad mínima.
8. Situar inicialmente el control de aproximación a "en 5". Colocar el botón (D) para que la lectura sea de "g" y no de Hz.
9. Con la luz de (R) iluminada, se deberá apretar el botón AUTO (I) y comenzará la subida automática.
10. Cuando la aguja del contador de resonancias alcanza el punto máximo en la escala se deberá cambiar el control (F), a la posición media o lo que es lo



20 de diciembre de 2017

mismo, cambiar la escala "X5" para poder visualizar el rango de ciclos en el que nos encontramos.

11. Marcar las frecuencias de resonancia y figuras de modo en el componente durante la búsqueda automática.
12. Continúe en auto hasta que la luz (K) se ilumine.
13. Se deberá volver el mando (J) al mínimo. Apretar botones (0) y (S), y levantar las plumas.
14. Se corregirán las posiciones de los soportes cambiando al excitador HT 110.
15. Apretar el botón (H) e incrementar manualmente la velocidad utilizando el mando (J) hasta llegar al inicio de la primera resonancia. FIG 11.1
16. Seleccionar el tiempo de mantenimiento en meseta apropiado para la frecuencia (fig.12.3) y apretar (B).
17. Al finalizar este tiempo, la velocidad del excitador volverá a continuar incrementándose.
18. Cuando se halle por encima del pico, se procederá a apretar el botón (P) para volver a tener el control manual.
19. Se procederá a incrementar la velocidad manualmente utilizando el mando (J) hasta alcanzar el inicio del siguiente pico y repetir los puntos 16 y 18 para 2 - 4 picos. Al tratar el último pico, se puede posicionar el modo P.B. (U) para finalizar, el cual apagará la unidad una vez finalizado el tiempo elegido.
20. Colocar el mando (J) en cero y apagar (0), levantar plumas y taparlas.
21. Anotar el gráfico el N° de trabajo, fecha y la documentación pertinente que sea de carácter obligatorio por la compañía.

*Nota: Importante verificar y chequear la sujeción de las sargentas. Al vibrar fuertemente existía un riesgo de soltarse por lo que se decidió encargar un utillaje de anclaje de modo sustitutivo a las sargentas ya que existía un elevado riesgo al ejecutar el procedimiento entrañando un posible peligro para los operarios.*

### **Resumen de la secuencia del tratamiento Manual**

1. Colocar la pieza sobre soportes de goma, de forma que el peso quede bien repartido.
2. Sujetar el acelerómetro HT110 con sargentos en el extremo de la pieza.
3. Utilizar una toma eléctrica protegida RCD de 30mA. Conectar cables y soltar (G - Marcha).
4. Mantener el control auto/manual (J - potenciómetro auto/manual) hacia la izquierda y se ilumina R (Velocidad mínima).
5. Con la luz R (Velocidad mínima) iluminada, apretar el botón H (Inicio manual) e incrementar manualmente la velocidad utilizando el botón (J-potenciómetro auto/manual) hasta encontrar la primera resonancia.
6. Seleccionar el tiempo de mantenimiento apropiado para la frecuencia (Ver figura 1) y apretar (B) iniciándose el temporizador de actuación.
7. Al finalizar este tiempo, la velocidad volverá a continuar incrementándose automáticamente.
8. Se deberá apretar el botón P (cambio a manual) para volver a tener el control manual.
9. Incrementar la velocidad manualmente hasta encontrar el siguiente pico y repetir los puntos 6 y 8.



20 de diciembre de 2017

10. Al tratar el último pico, se puede posicionar el modo U (Selector de modo) para finalizar, el cual apagará la unidad una vez finalizado el tiempo elegido.

11. Colocar el mando (J) en cero y ya se puede apagar pulsando el botón (0).

Para asegurar que la pieza está distensionada correctamente, cambiar el acelerómetro a la esquina opuesta y repetir el proceso en cada arista para asegurar que el distensionado por vibraciones se ha realizado con éxito.

#### *3.3.2.4 Resonancias, nodos y modos*

Utilizando un equipo VSR moderno que disponga de varios excitadores, cualquier estructura adecuada para ser estabilizada por el sistema VSR puede ser excitada a una o varias frecuencias de resonancia. En definitiva, lo que se buscan son las frecuencias de resonancia, en especial aquellas que afectan a toda la estructura. Se las reconoce con facilidad puesto que tienen asociadas distintas áreas o líneas de quietud (que no vibran) llamados nodos.

Los nodos forman figuras que nos informan sobre las formas dinámicas de las estructuras, a las que llamaremos modos de vibración. Hay tres tipos de modos, de pandeo, torsionales y complejos.

20 de diciembre de 2017

# 4

## Estudio por elementos finitos en las tensiones residuales generadas

Se modela una soldadura estándar como hipótesis de partida, que permita el posterior estudio por elementos finitos de las diferentes metodologías que logran reducir las tensiones residuales en las mismas condiciones de partida.

El método de los elementos finitos (MEF en castellano o FEM en inglés) es un método numérico general para la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales parciales muy complejas utilizado en diversos problemas de ingeniería y física.

El MEF está pensado para ser usado en computadoras y permite resolver ecuaciones diferenciales asociadas a un problema físico sobre geometrías complicadas. El MEF se usa en el diseño y mejora de productos y aplicaciones industriales, así como en la simulación de sistemas físicos y biológicos complejos. La variedad de problemas a los que puede aplicarse ha crecido enormemente, siendo el requisito básico que las ecuaciones constitutivas y ecuaciones de evolución temporal del problema sean conocidas de antemano.

Para ello vamos a proceder a crear un modelo en SolidWorks, en el cual se va a realizar una soldadura de un cilindro sobre una base rectangular. El objetivo del modelo es homogeneizar la soldadura lo máximo posible, luego se debe modelar la secuencia completa de la soldadura para minimizar las posibles variables en la misma y tener una comparativa entre dos modelos idénticos

### 4.1 Aplicación a un caso real

#### 4.1.1 Objetivo de la aplicación

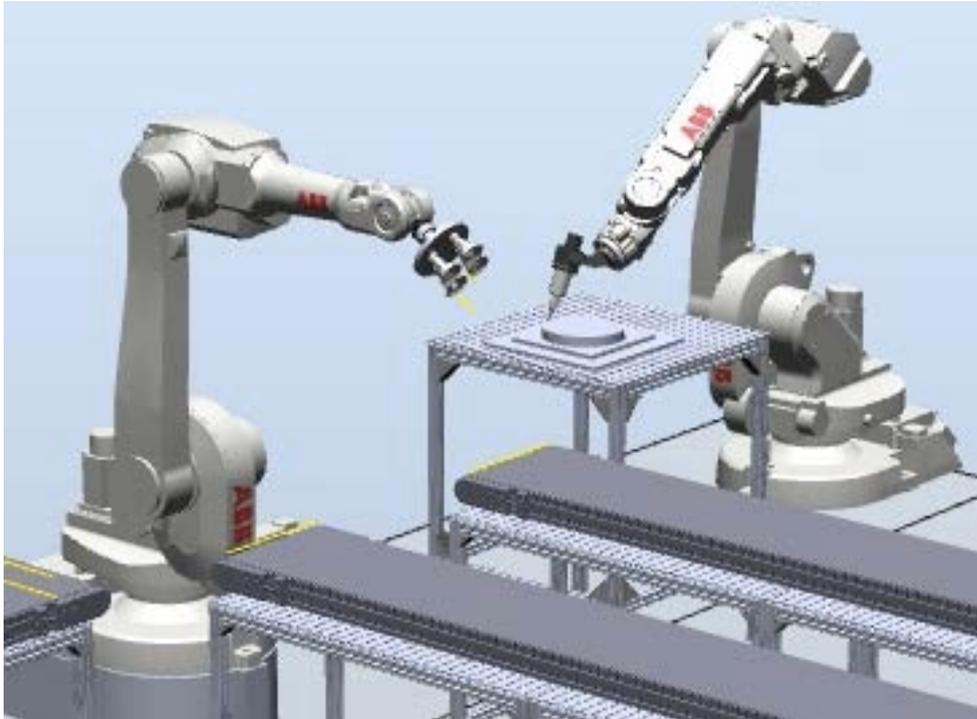
El objetivo es diseñar una estación de alimentación de piezas, ensamblaje y unión mediante soldadura de las mismas para homogeneizar al máximo la soldadura y controlar las variables rigurosamente.

Habrán dos tipos de piezas que irán suministrándose a través de dos cintas transportadoras hasta ser detectadas por los sensores que detendrán las cintas y pondrán en marcha el robot que unirá los dos tipos de piezas sobre la mesa de soldadura, a continuación, un segundo robot soldará ambas piezas, finalmente el primer robot cogerá las piezas ya soldadas y las irá depositando en una cinta de salida.

El fin de modelar esta soldadura recae en que la mano del mejor soldador experimentado no va a lograr hacer dos soldaduras iguales. Nos encontramos en la problemática de tener que automatizar la soldadura para que siempre la soldadura sea

20 de diciembre de 2017

la misma y así poder realizar la comparación en las tensiones residuales en una soldadura homogénea.



**Figura 86. Modelización soldadura. Elaboración propia.**

## 4.2 Modelización de una soldadura estándar

### 4.2.1 Justificación de la solución técnica

Como primera ventaja, este tipo de instalaciones dota a la empresa de unos ahorros en tiempo y coste para la manufacturación del producto que antes debía ser elaborada por un operario.

La inversión inicial es elevada y económicamente resultará viable a medio/largo plazo, ganando también en calidad ya que el brazo robótico está programado para hacer la soldadura con las mismas características, de este modo se ganaría calidad por los posibles errores humanos que el operario pudiera cometer.

Pero más allá de la inversión y posibles futuros ahorros, la verdadera justificación de aparecer en este estudio, es la de homogeneizar las variables existentes en la soldadura, ya que comparar dos soldaduras que no se han soldado de manera exacta no tendría ninguna validez en cuanto a la resolución del estudio comparativo.

### 4.2.2 Descripción del funcionamiento

Una vez modelado en SolidWorks los elementos que conforman la soldadura, se debe realizar un estudio de movimiento para dotarlo con unas secuencias de movimientos que unidas conforman el ciclo completo de la soldadura total.

20 de diciembre de 2017

Esta estación se pondrá en funcionamiento al pulsar el botón de marcha, que activará la cinta 1, al llegar la pieza al final de la cinta esta se parará y pondrá en marcha el brazo robot que llevara la pieza 1 hasta la zona de soldadura, al depositarla entrará en marcha la cinta 2, al llegar la pieza 2 al final de la cinta esta se parará y pondrá en marcha el brazo robot que colocará la pieza 2 sobre la 1, a continuación un segundo brazo robot unirá las piezas mediante soldadura, una vez termine la pieza resultante será llevada por el brazo robot hasta la cinta de salida, y el ciclo se repetirá hasta que se pulse el pulsador de paro.

El objetivo final es crear una soldadura que siempre tenga las mismas características, en este caso hemos optado por una soldadura de un cilindro con una base cuadrada.

Programación de Grafcet:

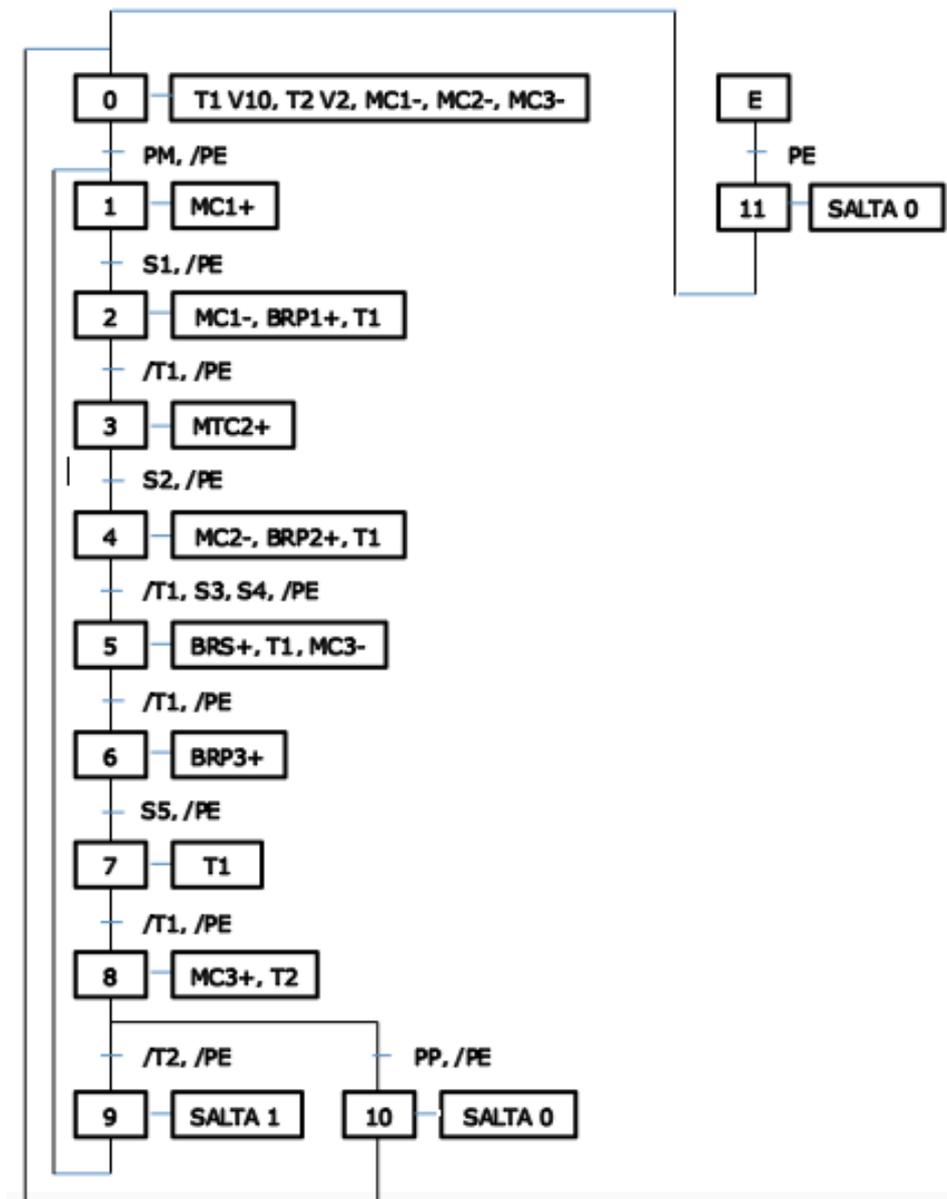


Figura 87. Grafcet secuencia. Fuente: Elaboración propia.

20 de diciembre de 2017

Tabla de correspondencia:

**Tabla 3. Nomenclatura en el Grafcet**

<b>Código</b>	<b>Elemento</b>	<b>Código</b>	<b>Elemento</b>
<b>P.M</b>	Pulsador de marcha	<b>MC3</b>	Motor cinta 3
<b>P.P</b>	Pulsador de parada	<b>BRP1</b>	Programa 1 brazo robot
<b>P.E</b>	Pulsador de emergencia	<b>BRP2</b>	Programa 2 brazo robot
<b>S1</b>	Sensor final cinta 1	<b>BRP3</b>	Programa 3 brazo robot
<b>S2</b>	Sensor final cinta 2	<b>BRS</b>	Programa 4 brazo robot soldador
<b>S3</b>	Sensor pieza 1 en mesa de soldadura	<b>AV</b>	Activar vacío
<b>S4</b>	Sensor pieza 2 en mesa de soldadura	<b>DV</b>	Desactivar vacío
<b>S5</b>	Sensor pieza en cinta 3	<b>AS</b>	Activar soldadura
<b>MC1</b>	Motor cinta 1	<b>DS</b>	Desactivar soldadura
<b>MC2</b>	Motor cinta 2		

#### 4.2.3 Seguridad

Las máquinas deben diseñarse de tal manera que no sean peligrosas para personas o bienes materiales o el medio ambiente. La meta consiste en prevenir daños físicos de cualquier tipo.

Según la directiva para máquinas MRL 2006/42/CE, es obligatorio llevar a cabo el análisis y la evaluación de riesgos en todas las máquinas. Esta evaluación redonda en la definición de metas de protección. Estas metas se alcanzan recurriendo a diversos sistemas de seguridad.

Las siguientes soluciones de seguridad permiten cumplir las metas de protección con facilidad:

- Componentes
- Circuitos
- Ingeniería

Es necesario tener en cuenta el funcionamiento seguro de la máquina, en cualquier modo y durante cualquier fase de su utilización:

- Puesta en funcionamiento.
- Modo automático/manual.
- Puesta a punto.
- Situaciones de peligro y funcionamiento de emergencia
- Protección contra puesta en marcha inesperada
- Asistencia técnica/mantenimiento

Además, debe evitarse que los fallos no redunden en la anulación de las funciones de seguridad.

#### **Medidas de seguridad con brazos robot:**

Es preciso determinar las medidas de seguridad que disminuyan el riesgo y la gravedad.



20 de diciembre de 2017

Es importante considerar que, según estudios realizados por el Instituto de Investigaciones de Seguridad en el Trabajo de Tokio, el 90% de los accidentes en líneas robotizadas ocurren durante las operaciones de mantenimiento, ajuste y programación mientras que sólo el 10% ocurre durante el funcionamiento normal de la línea.

Este dato es de gran relevancia y pone de manifiesto la gran importancia que tiene, para lograr un nivel de seguridad adecuado, el impedir el acceso de operarios al campo de acción del robot mientras éste está en funcionamiento.

La seguridad en sistemas robotizados presenta, por tanto, dos vertientes: aquella que se refiere a la seguridad intrínseca al robot y que es responsabilidad del fabricante; y aquella que tiene que ver con el diseño e implantación del sistema y su posterior utilización, programación y mantenimiento, responsabilidad del usuario.

En este sentido, se ha desarrollado la normativa europea EN 775, adoptada en España como norma UNE-EN 775 de título "Robots manipuladores".

La seguridad, que además de proporcionar a diseñadores y fabricantes un marco de trabajo que les ayude a producir máquinas seguras en su utilización, presenta una estrategia de trabajo para el desarrollo y selección de medidas de seguridad.

Esta estrategia comprende las siguientes consideraciones:

- Determinación de los límites del sistema: intención de uso, espacio y tiempo de trabajo.
- Identificación y descripción de todos aquellos peligros que pueda generar la máquina durante las fases de trabajo. Se deben incluir los riesgos derivados de un trabajo conjunto entre la máquina y el ordenador y los riesgos derivados de un mal uso de la máquina.
- Definición del riesgo de que se produzca el accidente. Se definirá probabilísticamente en función del daño físico que pueda producir.

Medidas de seguridad en cintas transportadoras:

- **Frente al atrapamiento en los tambores:** Debe impedirse la accesibilidad a los distintos elementos del tambor de "cola", mediante el carenado del conjunto a base de rejilla metálica que permita la visión de la cinta. Este carenado, además de cubrir los soportes de los tambores, los extremos de los ejes y chavetas debe prolongarse lateralmente un metro desde el tambor, a cada lado de la cinta.
- **Paradas de emergencia:** Es muy frecuente la presencia de paradas de emergencia de tirón. Al tirar del cable, se detiene el movimiento de la cinta.
- **Protección anti atrapamiento:** Evitan el acceso de partes del cuerpo a las zonas de atrapamiento de la cinta.
- **Antirretornos:** Evitan que, en caso de pérdida de corriente eléctrica o activación de la parada de emergencia, la cinta cargada de material retroceda por efecto de la inercia.

20 de diciembre de 2017

#### 4.2.4 Características de los componentes que integran la modelización

**Tabla 4. Características brazo robótico IRB 1600.**

<b>Alcance</b>	1.2 m
<b>Carga útil</b>	6kg
<b>Nº de ejes</b>	6 + 3 externos
<b>Dimensionado base del robot</b>	484 x 648 mm
<b>Altura del robot</b>	1069 mm
<b>Peso del robot</b>	250 kg
<b>Rango de trabajo eje 1</b>	+180° a -180°
<b>Rango de trabajo eje 2</b>	+136° a -63°
<b>Rango de trabajo eje 3</b>	+55° a -255°
<b>Rango de trabajo eje 4</b>	+200° a -200° def. +/-190° revolución
<b>Rango de trabajo eje 5</b>	+115° a -115°
<b>Rango de trabajo eje 6</b>	+400° a -400° def. +/-288 revolución
<b>Velocidad máxima eje 1</b>	150° /s
<b>Velocidad máxima eje 2</b>	160° /s
<b>Velocidad máxima eje 3</b>	170° /s
<b>Velocidad máxima eje 4</b>	320° /s
<b>Velocidad máxima eje 5</b>	400°/s
<b>Velocidad máxima eje 6</b>	460°/s
<b>Tensión de alimentación</b>	200-600 V, 50-60 Hz
<b>Consumo de energía a velocidad máxima</b>	0.58 kW



20 de diciembre de 2017

**Tabla 5. Características brazo robótico IRB 1600ID**

<b>Alcance</b>	1.55 m
<b>Carga útil</b>	6 kg
<b>Nº de ejes</b>	6
<b>Dimensionado base del robot</b>	484 x 648 mm
<b>Altura del robot</b>	1392 mm
<b>Peso del robot</b>	260 kg
<b>Rango de trabajo eje 1</b>	+180° a -180°
<b>Rango de trabajo eje 2</b>	+150° a -90°
<b>Rango de trabajo eje 3</b>	+79° a -238°
<b>Rango de trabajo eje 4</b>	+175° a -175°
<b>Rango de trabajo eje 5</b>	+120° a -120°
<b>Rango de trabajo eje 6</b>	+400° a -400°
<b>Velocidad máxima eje 1</b>	180°/s
<b>Velocidad máxima eje 2</b>	180°/s
<b>Velocidad máxima eje 3</b>	180°/s
<b>Velocidad máxima eje 4</b>	320°/s
<b>Velocidad máxima eje 5</b>	360°/s
<b>Velocidad máxima eje 6</b>	500°/s
<b>Tensión de alimentación</b>	200-600 V, 50-60 Hz
<b>Consumo de energía a velocidad máxima</b>	0.6 kW
<b>Distancia entre ejes</b>	2720mm
<b>Distancia entre ejes</b>	1800mm
<b>Ancho de cinta</b>	300mm
<b>Tipo de motor 4CV</b>	230/400V
<b>Ventosa</b>	ESG-60-SF-HA
<b>Forma ventosa</b>	Plana
<b>Diámetro ventosa</b>	60mm
<b>Material</b>	silicona
<b>Sensores inductivos SIED:</b>	SIED
<b>Tamaño</b>	M12
<b>Salida bifilar</b>	sin contacto
<b>Contacto</b>	cerrado en reposo



20 de diciembre de 2017

A continuación, se necesitarán los siguientes elementos:

- Tres cintas transportadoras que irán colocadas en paralelo sobre unas mesas que harán de soporte.
- Brazo robot IRB 1600 fijado sobre un soporte, es el encargado de unir las piezas y su posterior colocación en el palé.
- Brazo robot IRB 1600ID, fijado sobre un soporte, es el encargado de realizar la soldadura.
- Mesa de soldadura
- Ventosas
- Sensores
- Unidad de mantenimiento neumático
- Manguera de aire RS
- Armario de conexiones
- Siemens LOGO 12/24RC
- Cable flexible 1x25 mm<sup>2</sup>
- Pistola soldadura Bullseye.



**Figura 88. ABB bullseye.**

#### 4.2.5 Planificación del proceso

1. Anclaje al suelo de los soportes de los brazos robot.
2. Montaje de los perfiles de aluminio y anclaje al suelo de los mismos.
3. Colocación de los brazos robot en sus soportes.
4. Colocación de las cintas transportadoras sobre las mesas de aluminio.
5. Instalación de los motores de las cintas transportadoras.
6. Colocación de la mesa de soldadura.
7. Colocación del soporte de soldadura sobre la mesa de soldadura.

20 de diciembre de 2017

8. Instalación de los sensores de final de cinta de las 2 cintas transportadoras de entrada de piezas.

9. Instalación del sensor de pieza en cinta de salida.

10. Instalación del sensor de pieza 1 en posición de soldadura.

11. Instalación del sensor de pieza 2 en posición de soldadura.

12. Instalación de la herramienta de sujeción de piezas mediante vacío en el brazo robot.

13. Instalación de la pistola de soldadura Bullseye en el brazo robot.

14. Colocación de la botonera de mando.

15. Colocación de las emergencias.

16. Colocación del armario de conexiones.

17. Realización de todas las conexiones eléctricas en el armario de conexiones.

18. Realización de las conexiones neumáticas.

Para la realización de estas operaciones es necesario el uso de las herramientas y EPI'S adecuados.

Para la puesta en marcha revisar que no haya obstáculos que puedan poner en peligro los equipos o la seguridad de los operarios.

#### 4.2.6 Mantenimiento

##### 4.2.6.1 Gamas de mantenimiento

- Mantenimiento diario (Operario):

**Tabla 6. Procedimiento a seguir para el mantenimiento de la estación.**

<b>PROCEDIMIENTO PROTOCOLO Nº 1</b>		
<b>Limpieza general del exterior de la estación</b>		
<b>Condición inicial de la maquina</b>	Marcha:	Paro: X
<b>Condiciones de seguridad y EPI'S</b>		
Usar guantes y gafas de seguridad		
<b>Útiles necesarios</b>		
Brocha		
<b>Repuestos necesarios</b>		
<b>Tareas</b>	<b>Duración</b>	
Limpiar la mesa de soldadura	3min	
Limpiar lona cinta transportadora	3min	

Revisión visual del estado de la cinta y limpieza de la misma. PR1

- Mantenimiento mensual (mecánico y eléctrico):
  - Comprobación de la altura de la comba catenaria y ajustarla si es necesario. PR2 (Cinta transportadora)

20 de diciembre de 2017

- Comprobar la existencia de daños o desgaste (cortes, estrías, etc.) en la banda (superficie superior e inferior), los piñones y las guías de deslizamiento. PR3 (Cinta transportadora)
- Inspección de los amortiguadores de los ejes 2 y 3. PR4 (Brazo robot)
- Limpieza del robot completo. PR5 (Brazo robot)
- Inspección sensores. PR6
- Comprobación de maniobra eléctrica. PR7
- Cableado robot. PR8
- Mantenimiento 36 meses (mecánico):
- Inspección de las correas de temporización. PR8 (Brazo robot)
- Cambio de aceite de la caja reductora de los ejes 5 y 6. PR9 (Brazo robot)

#### 4.2.6.2 Desarrollo de procedimientos

**Tabla 7. Procedimiento a seguir para el mantenimiento de la estación.**

<b>PROCEDIMIENTO PROTOCOLO Nº 2</b>		
<b>Altura de la comba catenaria</b>		
<b>Condición inicial de la maquina</b>	Marcha:	Paro: X
<b>Condiciones de seguridad y EPI'S</b>		
Usar guantes y gafas de seguridad		
<b>Útiles necesarios</b>		
Llave plana 10		
<b>Repuestos necesarios</b>		
<b>Tareas</b>	<b>Duración</b>	
Comprobación visual comba catenaria	1 min	
Ajustar altura apretando o aflojando los tornillos laterales	3 min	
<b>PROCEDIMIENTO PROTOCOLO Nº 3</b>		
<b>Comprobación daños banda piñones guías de deslizamiento</b>		
<b>Condición inicial de la maquina</b>	Marcha: X	Paro: X
<b>Condiciones de seguridad y EPI'S</b>		
Usar guantes y gafas de seguridad		
<b>Útiles necesarios</b>		
<b>Repuestos necesarios</b>		
<b>Tareas</b>	<b>Duración</b>	
Inspección visual de la banda piñones y guías de deslizamiento	3 min	

20 de diciembre de 2017

**Tabla 8. Procedimiento a seguir para el mantenimiento de la estación.**

<b>PROCEDIMIENTO PROTOCOLO Nº 4</b>		
<b>Inspección de los amortiguadores de los ejes 2 y 3</b>		
<b>Condición inicial de la maquina</b>	Marcha:	Paro: X
<b>Condiciones de seguridad y EPI'S</b>		
Usar guantes y gafas de seguridad		
<b>Útiles necesarios</b>		
Conjunto de herramientas básicas		
<b>Repuestos necesarios</b>		
<b>Tareas</b>		<b>Duración</b>
Compruebe todos los amortiguadores para detectar posibles daños, como grietas o marcas de impacto con un tamaño superior a 1 mm.		10 min
Compruebe que los tornillos de fijación no estén deformados.		3 min
<b>PROCEDIMIENTO PROTOCOLO Nº 5</b>		
<b>Limpieza del robot completo</b>		
<b>Condición inicial de la maquina</b>	Marcha:	Paro: X
<b>Condiciones de seguridad y EPI'S</b>		
Usar guantes, gafas de seguridad		
<b>Útiles necesarios</b>		
Aspirador, trapo, detergente suave		
<b>Repuestos necesarios</b>		
<b>Tareas</b>		<b>Duración</b>
Limpiar exterior brazo robot		10 min
<b>PROCEDIMIENTO PROTOCOLO Nº 6</b>		
<b>Inspección sensores</b>		
<b>Condición inicial de la máquina</b>	Marcha: X	Paro:
<b>Condiciones de seguridad y EPI'S</b>		
Usar guantes y gafas de seguridad		
<b>Útiles necesarios</b>		
<b>Repuestos necesarios</b>		
<b>Tareas</b>		<b>Duración</b>
Inspección visual del estado de los sensores.		3 min

20 de diciembre de 2017

**Tabla 9- Procedimiento a seguir para el mantenimiento de la estación.**

<b>PROCEDIMIENTO PROTOCOLO Nº 7</b>		
<b>Limpieza maniobra eléctrica</b>		
<b>Condición inicial de la máquina</b>	Marcha:	Paro: X
<b>Condiciones de seguridad y EPI'S</b>		
Usar guantes y gafas de seguridad		
<b>Útiles necesarios</b>		
Desengrasante dieléctrico, trapos		
<b>Repuestos necesarios</b>		
<b>Tareas</b>	<b>Duración</b>	
Limpieza componentes eléctricos.	10 min	
<b>PROCEDIMIENTO PROTOCOLO Nº 8</b>		
<b>Cableado robot</b>		
<b>Condición inicial de la máquina</b>	Marcha:	Paro: X
<b>Condiciones de seguridad y EPI'S</b>		
Usar guantes y gafas de seguridad		
<b>Útiles necesarios</b>		
<b>Repuestos necesarios</b>		
<b>Tareas</b>	<b>Duración</b>	
Inspeccione visualmente los cables de control que unen el manipulador al armario de control. Busque daños por abrasión, cortes o aplastamiento.	10 min	
Reemplace el cableado si observa desgastes u otros daños.		
<b>PROCEDIMIENTO PROTOCOLO Nº 9</b>		
<b>Cambio de aceite caja reductora ejes 5 y 6</b>		
<b>Condición inicial de la máquina</b>	Marcha:	Paro: X
<b>Condiciones de seguridad y EPI'S</b>		
Usar guantes y gafas de seguridad		
<b>Útiles necesarios</b>		
Aceite lubricante, conjunto herramientas básicas		
<b>Repuestos necesarios</b>		
<b>Tareas</b>	<b>Duración</b>	
Mueva el robot hasta un punto en la que el brazo superior quede orientado en una posición casi horizontal y con el eje 4 en la posición de calibración.	1 min	
Retire los tapones de aceite.	2 min	
Drene el aceite de la caja reductora.	5 min	
Llene el aceite de la caja reductora hasta que el nivel de aceite llegue al orificio del tapón de aceite del otro lado de la muñeca.	5 min	
Monte el tapón de aceite.	2 min	

20 de diciembre de 2017

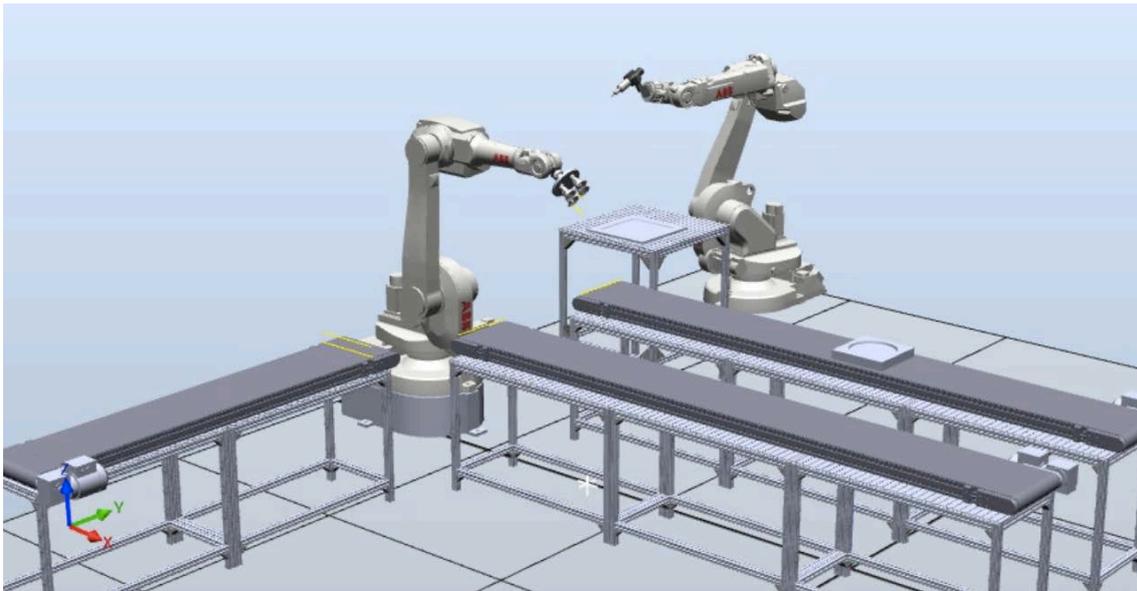
Los procedimientos de protocolo son las listas de comprobación con todos los pasos a efectuar para garantizar un perfecto mantenimiento y uso de la estación de soldadura.

#### 4.2.6.3 *Gestión de repuestos*

Es la lista de los elementos que siempre deberían estar en stock por una posible avería.

- 3 sensores SIED-M12B-ZO-K-L
- 2 m manguera de aire RS 774-7021
- m cable flexible 1x25 mm<sup>2</sup> RZ1-K 0,6/1Kv
- 3 ventosas ESG-60-SF-HA
- 6000x300 lona PVC
- 1 ABB bullseye

Una vez detallada toda la estación de soldadura, procedimiento para el ensamblaje, mantenimiento, medidas en su totalidad y uso se debe detallar el coste total de la instalación.



**Figura 89. Ensamblaje total en SolidWorks.**

20 de diciembre de 2017

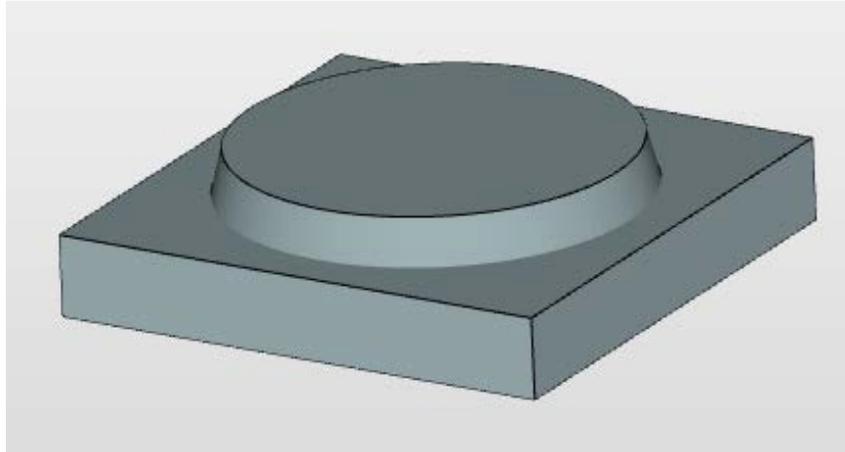
4.2.7 Presupuesto

Cantidad	Nombre artículo	Nº de referencia	Precio
96000mm	Perfil 6 30x30 L, natural	0.0.419.06	1207.36
128	Kit escuadra 6 30x30	0.0.419.67	253.44
26	Tuerca 6 St M5 zincado	0.0.419.43	4.94
900x400mm	Perfil 6 60x12 L, natural	0.0.478.0.7	386.24
14	Tornillo cabeza Allen DIN 912 M5x20		2.28
12	Tornillo cabeza Allen DIN 912 M5x30		2.29
8	Tornillo cabeza Allen DIN 286 M18x50		2.40
1	Mesa de soldadura		210
1	Acoplamiento herramienta robot		125
4	Ventosa de sujeción por vacío ESG	ESG-60-SF-HA	500
5	Sensores inductivos SIED	SIED-M12B-ZO-K-L	89.5
1	Soporte mesa de soldadura		130
2	Soporte brazo robot		560
2	Cinta transportadora Minitrans 65	MT-H65-L2720-B0300	3600
1	Cinta transportadora Minitrans 65	MT-H65-L1800-B0300	1400
1	Robot IRB 1600		42000
1	Robot IRB 1600ID		45000
1	ABB bullseye		800
1	Unidad de mantenimiento neumático	96MACP200-1/4	33.70
1	Siemens LOGO 12/24RC	EAN:6940408100091	122.93
5m Ø4mm	Manguera de aire RS	774-7021	2.37
1	Arm metal 1600x800x300 FK IP65	FK 102	930.91
20m	Cable flexible 1x25 mm2	RZ1-K 0,6/1Kv	60.81
<b>TOTAL</b>			<b>97424.17</b>
<b>TOTAL+IVA</b>			<b>114960.52</b>

20 de diciembre de 2017

#### 4.3 Cálculo de tensiones residuales

En la segunda parte de este trabajo, se procederá a elaborar el estudio por elementos finitos a la pieza resultante de la estación de soldadura del punto anterior.



**Figura 90. Pieza soldada**

La pieza a analizar será sometida a revenido mediante un tratamiento térmico y un distensionado por vibración con la máquina VCM905.

Para realizar el estudio comparativo se tomará como referencia la conclusión de un congreso celebrado en Rio de Janeiro en 2004, por la Asociación Brasileña de Soldadura, en el cual llegaron a la conclusión de que mientras las muestras que habían sido tratadas con calor reflejan una disminución de la resistencia a la tensión y un aumento de la elongación, como era de esperar, el método de vibración prácticamente no altera esos valores.

Bajo la anterior premisa, se entiende que, con una disminución de la resistencia a la tensión en toda la pieza, y, por ende, un aumento de la elongación o deformación, la pieza tenderá a poseer diferentes propiedades tanto en reposo sin la acción fuerzas externas, como con ellas.

Para la realización del estudio por elementos finitos se utilizará un software de libre acceso llamado "SimScale". Es mencionable encontrar un buen software libre que realice estudios de todo tipo desde la nube, por lo que no se debe hacer ninguna instalación, exceptuando un pequeño software llamado "Para-view" para ejecutar la simulación.

En definitiva, se van a simular dos situaciones iguales en una soldadura efectuada siempre de la misma forma, debido a la automatización de la misma.

La comparativa recae en variar el módulo de elasticidad de un caso a otro aplicándole la misma carga y presión. Bajo las mismas cualidades de la soldadura, la única diferencia en la pieza es el tratamiento post-producción realizado.

#### **Estudio por elementos finitos estático**

20 de diciembre de 2017

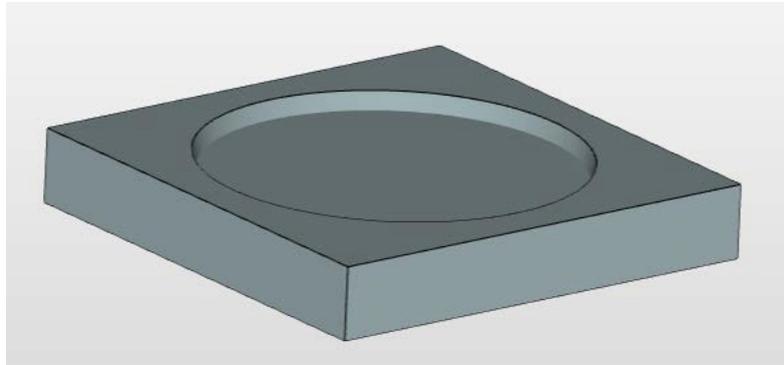
Este tipo de análisis estático se utiliza para determinar los desplazamientos, tensiones, esfuerzos y fuerzas en estructuras o componentes que no varían en el tiempo causados por las restricciones aplicadas y las cargas constantes; se ignoran los efectos de inercia y amortiguación.

Un análisis estático puede ser lineal o no lineal. Los tipos de no linealidades incluyen: grandes deformaciones, plasticidad, híper-elasticidad, contacto físico.

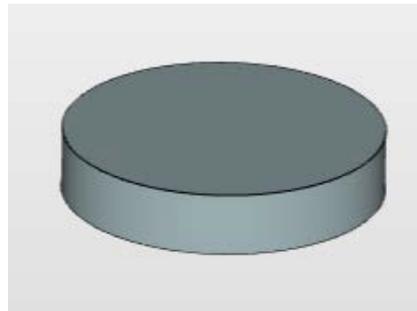
### **Elaboración en el estudio de elementos finitos**

*Elaborar un archivo CAD*

El archivo a subir será el de la pieza resultante entra la soldadura de la pieza 1 y pieza 2. Se debe conformar el total, para someter a elementos finitos la unión soldada.



**Figura 91. Base de la pieza soldada**

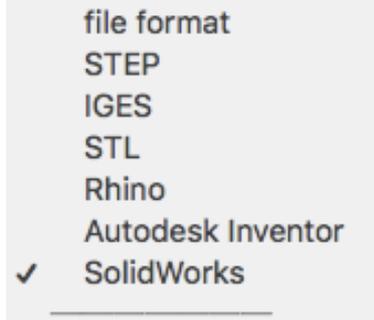


**Figura 92. Pieza superior de la soldadura.**

*Importar archivo CAD*

En este caso, al haber modelado la estación de soldadura, se dispone de la soldadura diseñada en SolidWorks, como un archivo “.SLDPRT”.

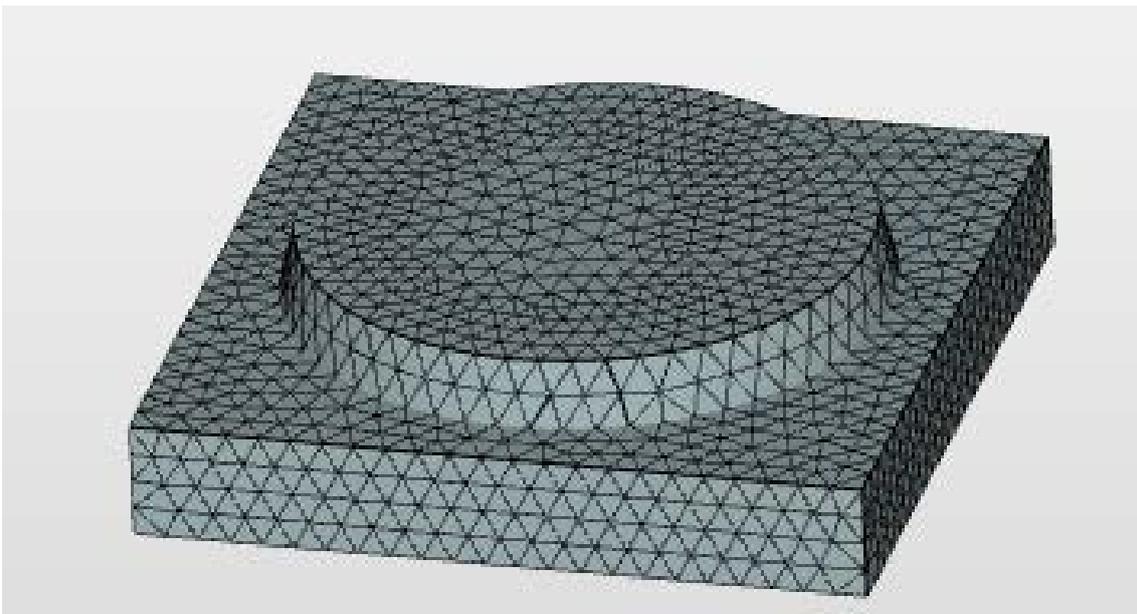
20 de diciembre de 2017



**Figura 93. Tipología en los archivos Cad.**

### *Creación del mallado o mesh*

Una vez se tenga el archivo resultante en el software, se debe crear el proyecto de estudio para poder obtener un mallado que se amolde a la forma de la soldadura.



**Figura 94. Mallado estructural en la pieza soldada.**

Este mallado, está conformado por nodos, elementos de primera dimensión, elementos de segunda dimensión y elementos de tercera dimensión. Cada uno de estos en orden corresponden a los puntos, rectas, planos, y volúmenes.

20 de diciembre de 2017

## Mesh Properties

Nodes	3503
1D elements (edges)	315
2D elements (faces)	3310
3D elements (volumes)	15518

**Figura 95. Características del mallado.**

En este caso, para el conformado del mallado, el software ha ejecutado la iteración en las anteriores unidades por cada tipo de elemento.

```

Check:1 -- Entity (n0:id) 6:#8 Type:(LENGTH_UNIT,NAMED_UNIT,SI_UNIT)
Parameter #2 (prefix) is not an enumeration
load internal triangle rules
Face 1 / 8 (parameter space projection)
Surface meshing done
load internal triangle rules
Face 2 / 8 (parameter space projection)
Surface meshing done
load internal triangle rules
Face 3 / 8 (parameter space projection)
Surface meshing done
load internal triangle rules
Face 4 / 8 (parameter space projection)
Surface meshing done
load internal triangle rules
Face 5 / 8 (parameter space projection)
Surface meshing done
load internal triangle rules
Face 6 / 8 (parameter space projection)
Surface meshing done
load internal triangle rules
Face 7 / 8 (parameter space projection)
Surface meshing done
load internal triangle rules
Face 8 / 8 (parameter space projection)
Surface meshing done
Optimize Surface 1
Optimize Surface 2
Optimize Surface 3
Optimize Surface 4
Optimize Surface 5
Optimize Surface 6
Optimize Surface 7
Optimize Surface 8
Check subdomain 1 / 1
3310 open elements

```

20 de diciembre de 2017

```

Meshing subdomain 1 of 1
3310 open elements
Use internal rules
3310 open elements
Delaunay meshing
number of points: 1657
blockfill local h
number of points: 4698
Points: 4698
Elements: 28435
0 open elements
Num open: 0
free: 0, fixed: 28435
SwapImprove
0 swaps performed
0 open elements
Num open: 0
free: 0, fixed: 28435
SwapImprove
0 swaps performed
0 degenerated elements removed
Remove intersecting
Remove outer
tables filled
outer removed
3310 open elements
4505 points, 22966 elements
0 open elements
0 open faces
start tetmeshing
Use internal rules

0 open elements
Success !
4505 points, 22966 elements

```

Otra importante cualidad a tener en cuenta en el mallado, es el grado de finura que se quiera dar a la pieza resultante. Cuanta más finura, mayores recursos para iterar necesitará el ordenador a fin de generar el estudio por elementos finitos.

Para este estudio, se ha conferido una resolución intermedia para la creación del mallado.

#### 4.3.1.1 *Diseño de la simulación*

En esta parte del estudio por elementos finitos se deben introducir todas las variables que definan el mallado anteriormente creado.

Con el mallado creado, se le conferirá que tipo de material es, para que nuestro elemento tenga las propiedades propias del mismo material.

20 de diciembre de 2017

- Lead
- Magnesium
- Nickel
- PA - Polyamide
- PET - Polyethylene Tere...
- PLA - Polylactic acid
- Platinum
- PP - Polypropylene
- PVC - Polyvinyl Chloride
- Rubber
- Silicon
- Silver
- Steel
- Tin
- Titanium
- Wood

Density [kg/m <sup>3</sup> ]	7870
Young's modulus [N/m <sup>2</sup> ]	205000000000
Poisson's ratio	0.28

Figura 96. Elección del material en el mallado.

En ambos casos el material será acero, y por defecto se cumplimentan las características físicas del material escogido. Es en este apartado donde se deben incluir las características propias de cada elemento, después de haber realizado el tratamiento térmico y el distensionado por vibración, ya que la elongación varía de un caso al otro.

Es importante al meter los datos entre los dos casos, diferenciar el módulo de Young o módulo de elasticidad en función de la longitud; es un parámetro que caracteriza el comportamiento de un material elástico, según la dirección en la que se aplica una fuerza.

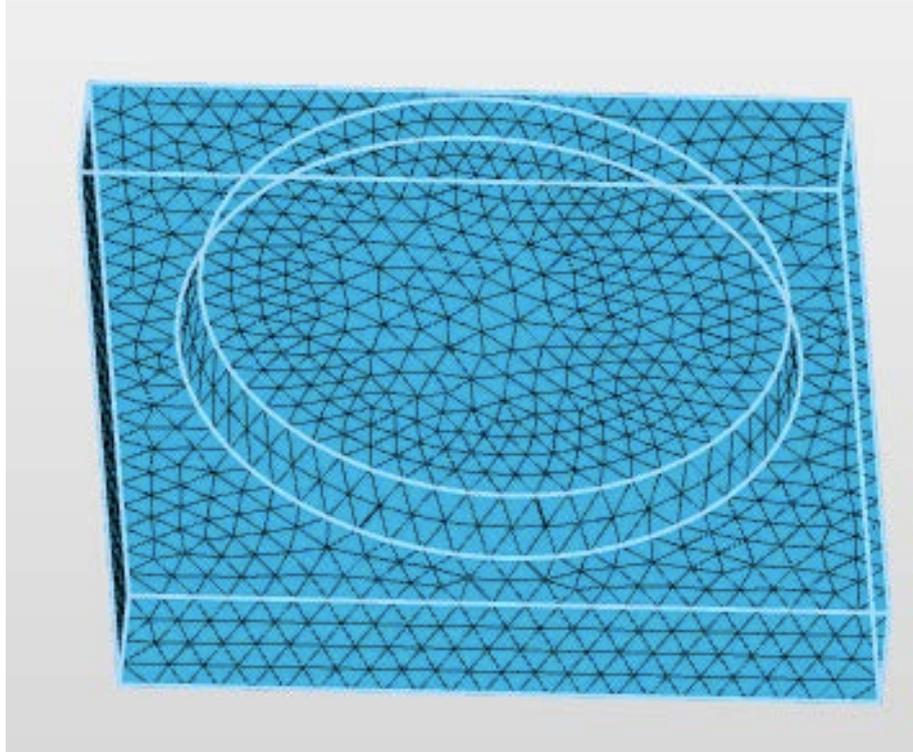
Al variar dicha elongación en el apartado "Young's modulus" el valor debe ser variado para ver qué comportamiento tiene en un caso y en otro.

En el caso de efectuar el estudio para la pieza tratada térmicamente, el módulo de Young será:

Young's modulus [N/m <sup>2</sup> ]	195000000000
-------------------------------------	--------------

De esta manera, cada pieza se comportará de manera distinta a la hora de efectuar las cargas.

20 de diciembre de 2017

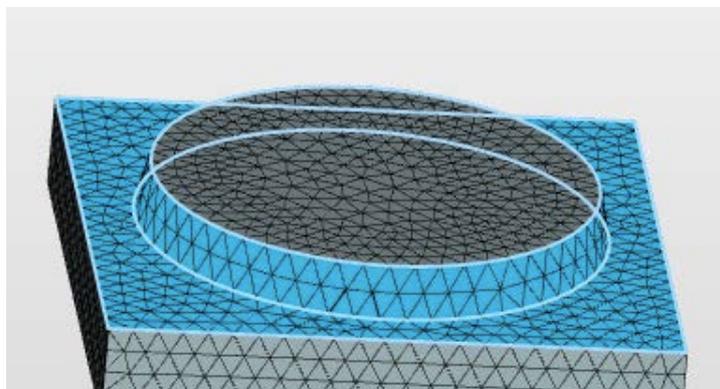


**Figura 97. Asignación del material a la pieza soldada.**

Conferimos a nuestra pieza de la soldadura qué tipo de material es. En este caso no se han modificado los datos que aparecen por defecto, ya que se trata del estudio por elementos finitos en el caso de realizar el distensionado por vibración, una vez finalizada la soldadura.

Conferido qué tipo de material se tiene, con todas las cualidades definidas, se deben de introducir las fuerzas a actuar, apoyos, o factores necesarios para saber cómo va a comportarse la pieza ante ese estrés introducido.

Hasta ahora, no se ha ejecutado ninguna fuerza o presión a dichas piezas. Para la resolución por elementos finitos, se expondrán ambas piezas a presiones de 20 MPa en las zonas señaladas en la imagen a continuación:



**Figura 98. Presión ejercida a la pieza soldada.**

A su vez, se tienen que poner ciertas restricciones para someter a presión la pieza, que en nuestro caso será la base actuando como soporte fijo.

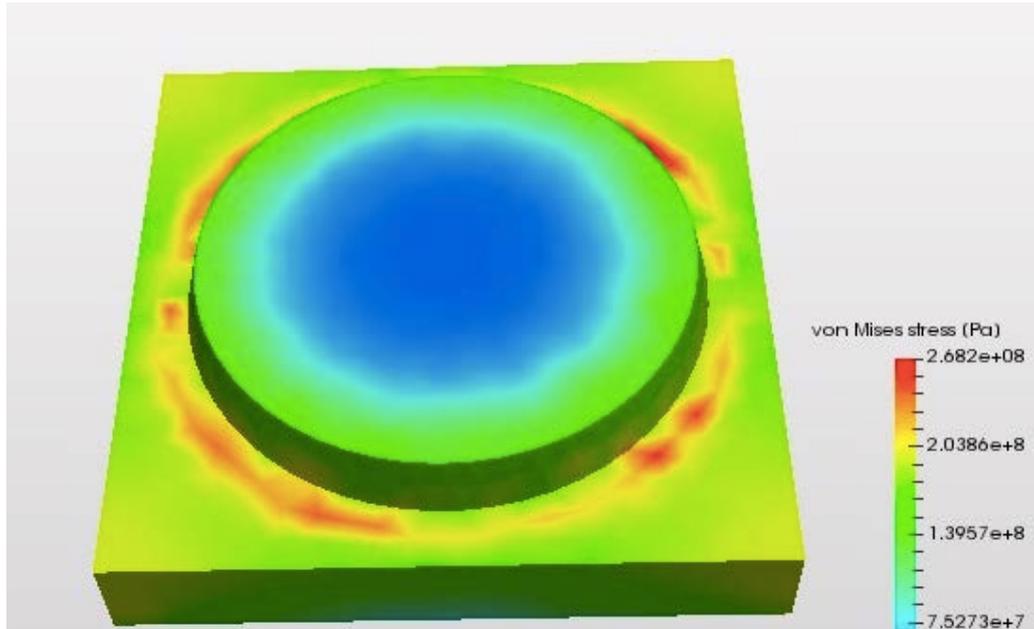
20 de diciembre de 2017

4.3.1.2 *Visualización en los resultados*

**Caso Vibratory Stress Relief**

La tensión de Von Mises y el criterio de fallo elástico propone que un material dúctil sufrirá fallo elástico cuando la energía de distorsión elástica rebase cierto valor.

En el caso en el que no se ha modificado el módulo de Young se obtiene:



**Figura 99. Von Mises estrés en el caso de efectuar el distensionado por vibración.**

20 de diciembre de 2017

### Caso en el Tratamiento Térmico

En esta segunda hipótesis, se ha modificado el módulo de Young, hasta los valores mínimos de este parámetro que puede aceptar el acero. Estos valores son:

▼ Details

Directional dependency	Isotropic
▼ Details	
Young's modulus [N/m <sup>2</sup> ]	195000000000
Poisson's ratio	0.28
Density [kg/m <sup>3</sup> ]	7870

Figura 100. Variaciones en el caso del tratamiento térmico.

Tras realizar el estudio por elementos finitos y analizar las tensiones equivalentes de Von Mises se tiene que:

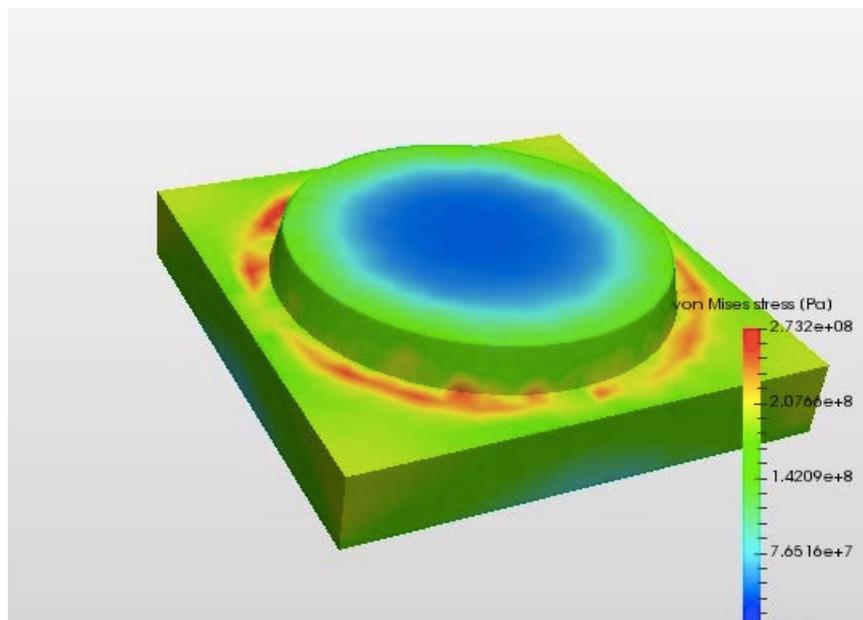


Figura 101. Von Mises estrés en el caso de efectuar el tratamiento térmico.

20 de diciembre de 2017

# 5

## Conclusión

Se realiza un análisis comparativo de los métodos de reducción de tensiones residuales en base a los resultados obtenidos en el estudio y documentación contrastada.

Seguidamente procedo a enumerar las conclusiones a las que he llegado tras leer una buena cantidad de documentación y fundamentalmente escuchar a muchísimas personas con gran experiencia en el alivio de tensiones residuales.

La primera conclusión es que ninguno de los tratamientos que existen informa en relación a las tensiones que se han eliminado. Luego es relativamente complicado realizar una comparación en cuanto a efectividad, si esta no se puede cuantificar.

VSR 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. No he tenido acceso a esta técnica ya que sería la más óptima para hacer este estudio.

El distensionado por vibración es una técnica que no se puede manifestar como una alternativa al resto de tratamientos pero presenta una serie de ventajas clave en relación a los tratamientos térmicos, ya que se puede llevar a cabo en cualquier momento del proceso de fabricación, manteniendo las propiedades del material y la pieza dentro de tolerancias.

Entre las diferencias se puede destacar que se observa que mientras las muestras que habían sido tratadas con calor reflejan una disminución de la resistencia a la tensión y un aumento de la elongación, como era de esperar, el método de vibración prácticamente no altera esos valores, no se templean, normalizan o endurecen por calor ni modifica las propiedades mecánicas del material.

En segundo lugar, las energías absorbidas en la prueba de impacto son prácticamente las mismas. Ninguna de las muestras se rompió, lo que indica que el material soldado es dúctil porque tiene una cantidad considerable de ferrita, como se puede observar en las micrografías.

La disminución en la dureza resultante de ambos tratamientos fue similar, lo que indica una reducción efectiva de tensiones residuales.

A las conclusiones a las que he llegado tras leer una buena cantidad de documentación y este estudio son:

1. El distensionado por vibraciones debe ser un método complementario al

20 de diciembre de 2017

alivio de tensiones mediante tratamientos térmicos, no debe ser nunca un método sustitutivo.

2. Tanto la eficacia en el distensionado por vibración, como en los tratamientos térmicos, es aún una incógnita por resolver, luego deben ser técnicas complementarias, nunca sustitutivas.
3. Cuando el objetivo es buscar la estabilidad dimensional durante el proceso de mecanizado la eficacia en el alivio de tensiones es incuantificable.
4. La efectividad en el alivio de tensiones no es total, tanto con el tratamiento como con el distensionado por vibración obtenemos un aliviado de tensiones parcial. No se puede cuantificar el grado de éxito.
5. El tratamiento térmico debe ser obligatorio como parte del proceso en la manufactura de la fabricación hasta que no se demuestre que el distensionado puede ser sustitutivo.

**Tabla 10. Conclusiones entre ambas técnicas.**

<b>Método</b>	<b>Alivio de tensiones residuales por tratamiento térmico</b>	<b>Alivio tensiones residuales por distensionado por vibración</b>
<b>Tiempo</b>	Alto (Horas incluso días)	2 horas como máximo
<b>Automatización</b>	Muy alto grado de automatización	Potencialmente alto
<b>Espacio utilizado</b>	Grande	Pequeño
<b>Movilidad</b>	Elevado, necesarias infraestructuras para el transporte	Poca o ninguna
<b>Costes</b>	Equipos : Muy elevado	Equipos: Bajo
<b>Efectos medioambientales</b>	Dependiendo el tipo de horno, normalmente altos	Bajos

En definitiva, 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 mismo.

La conclusión obtenida de este trabajo puede alentar a otros investigadores a considerar seriamente la posibilidad de una investigación más a fondo del método de vibración para alivio de la tensión.

20 de diciembre de 2017

# 6

## Bibliografía

Se enumeran todos los libros, manuales, artículos, páginas web y fuentes bibliográficas que se han citado y consultado a lo largo de la realización de este estudio.

- Angel Alfonso Fernández, L. F. (2000). *Práctica y problemas de siderurgia*. Oviedo: Summa.
- Barrero, J. A. (1971). *Acero especiales y otras aleaciones*. Madrid: Dossat.
- C. A. Walker A. J. Waddell D. J. Johnston, U. o. (1994). VIBRATORY STRESS RELIEF – AN INVESTIGATION OF THE UNDERLYING PROCESSES. 51-58.
- Cheung, Z. y. (1967). *The Finite Element Method in Structural and Continuum Mechanics Hardcover*. Northwestern: Zienkiewicz.
- Claxton, R. L. (1991). Vibratory stress relieving of welded fabrications. *Welding and Metal Fabrication*, 541–543.
- Dawson, R. (1975). *Residual stress relief by vibration*. Liverpool . UK.
- Diaz, M. d. (2001). *Las vibraciones mecánicas y su aplicación al mantenimiento predictivo*. Caracas: ISID.
- Elorz, J. A.-S. (2004). *Aceros, Metalurgia Física, Selección y Diseño*. Madrid: Dossat.
- Esteban, J. M. (1963). *Conocimiento ensayo y tratamiento de los materiales*. Barcelona: Ediciones Cedel.
- Esteban, J. M. (1978). *Tecnología del acero*. Barcelona: Ediciones Cedel.
- John L. Feirer, J. R. (2000). *Metal tecnología y proceso*. Madrid: Paraninfo Thomson learning.
- Malishev, A., Nikolaiev, C., & Shuvalov, Y. E. (1967). *Tecnología De Los Metales*. Moscow: Mir.
- Metalmecánico, I. T. (2012 ). *Unidad de materiales y tratamientos superficiales*.
- Morejón, E. P. (2002). *Facultad de Ingeniería Mecánica Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas*. La habana: Centro de Investigación de Soldadura (CIS).
- Riera, J. M. (2001). Tensiones residuales en alambres de acero trefilado. *Departamento de Ciencia de Materiales E.T.S.I. de Caminos, Universidad Politécnica de Madrid*.
- Wozney, G. C. (1968). *An investigation of vibrational stress relief in steel*. Miami, FL.

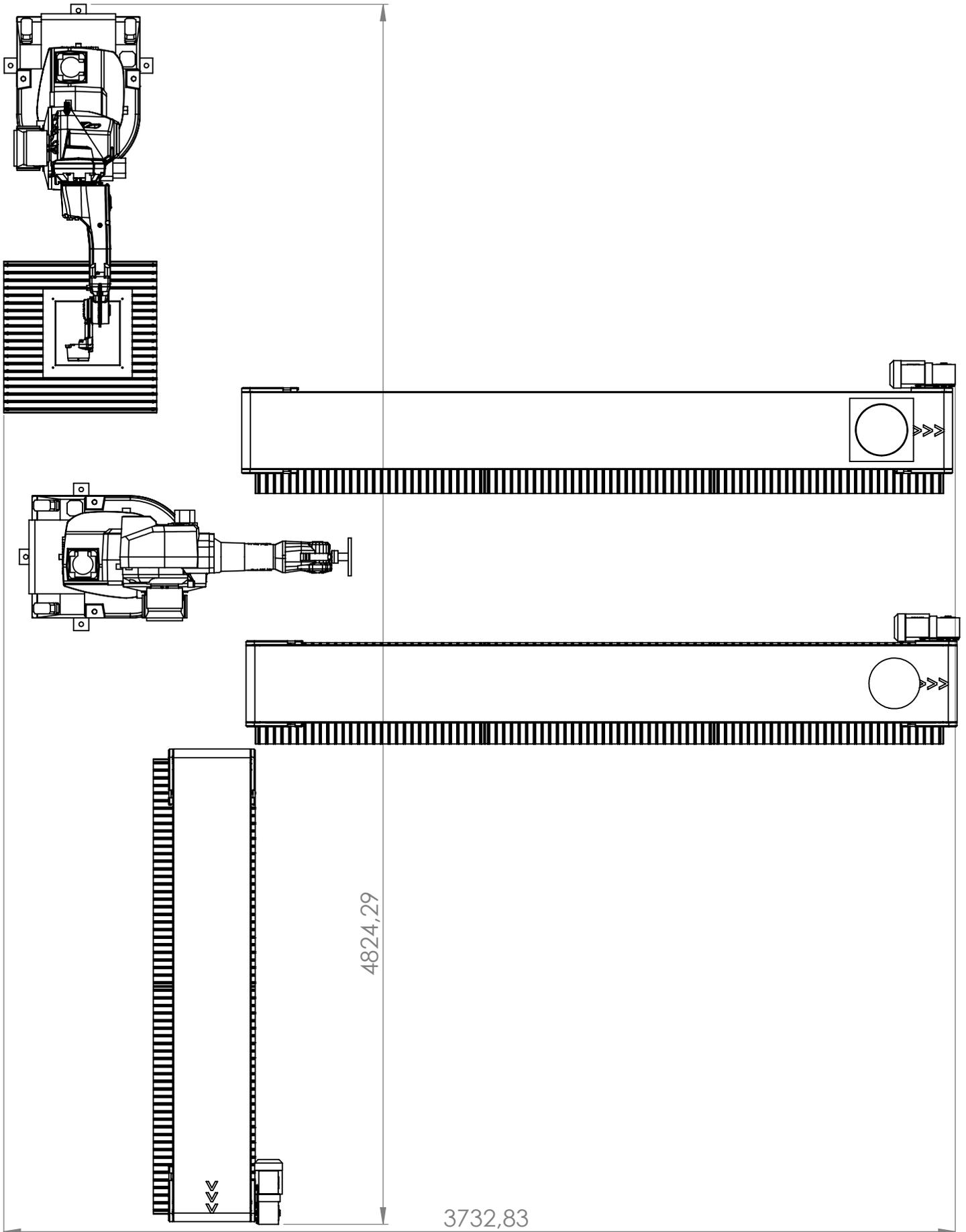
20 de diciembre de 2017

# 7

## Anexos

---

Se adjuntan todos aquellos documentos que permitan una mejor comprensión de determinados aspectos relativos a este estudio.



	NOMBRE	FECHA	ESTUDIO:	TÍTULO:
DIBUJ.	Diego Pérez Husillos	20/11/17	Estudio comparativo sobre el alivio de tensiones residuales mediante vibraciones (técnica VSR) en comparativa a los tratamientos térmicos convenciones	Planta de Estación Soldadura
VERIF.				
APROB.				
FABR.				
CAUID.				
			N.º DE DIBUJO	A4
			Dimensionalidad estación soldadura	ESCALA:1:20
			PESO:	HOJA 1 DE 1

## VCM 905

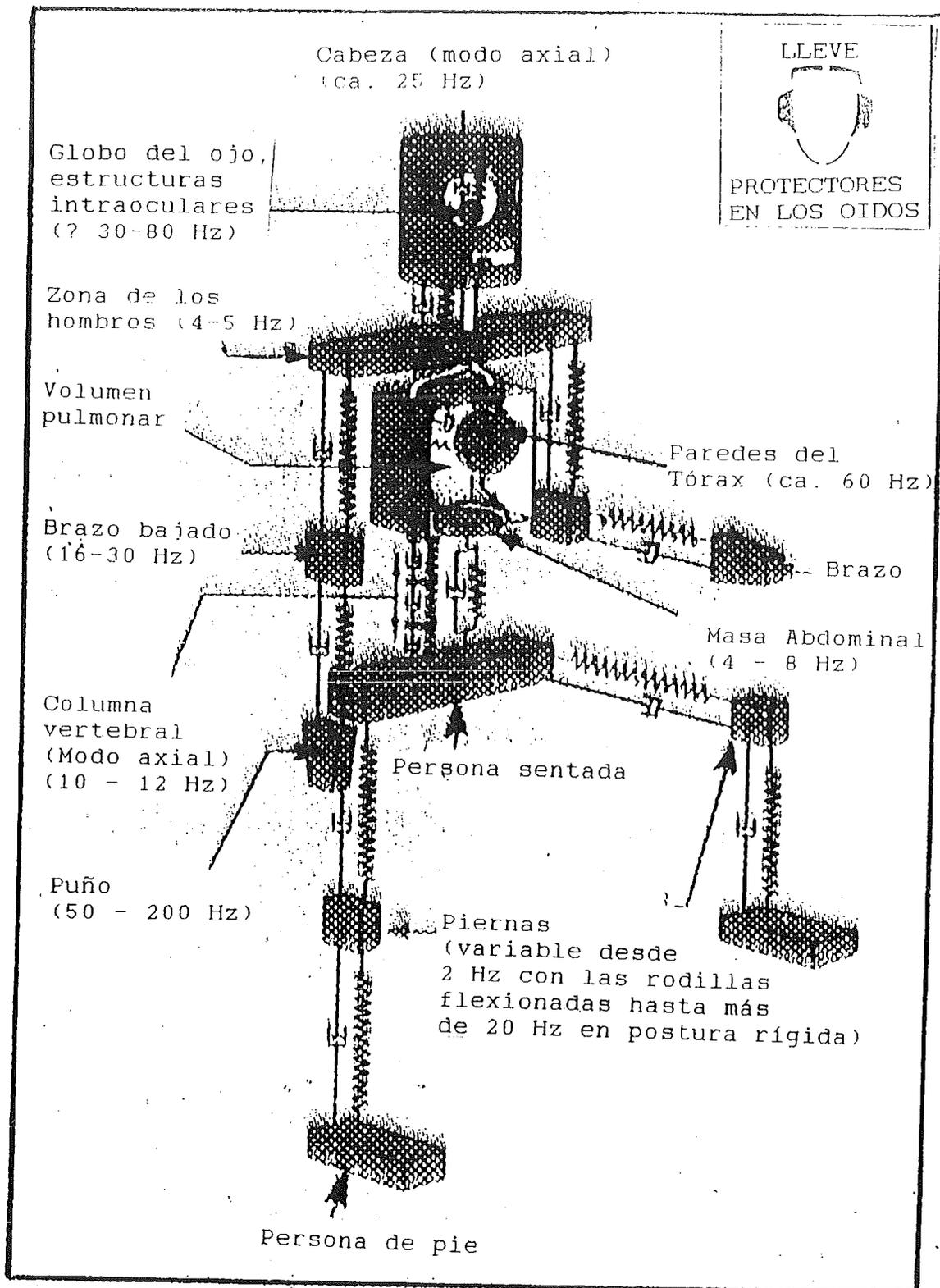
### MAQUINA PARA LA REDUCCION DE TENSIONES POR VIBRACION MANUAL DEL OPERARIO & INSTRUCCIONES DE MANTENIMIENTO

**Vibratory Stress Relieving Company**  
**13A Shrub Hill Industrial Estate**  
**Worcester WR4 9EL**  
**England**  
**Tel: +44 (0) 1905 731810**

#### Directrices de la Comunidad Europea CE

De acuerdo con la Directriz 89/392/CEE, corregida por las Directrices 91/368/CEE y 93/44/CEE, concernientes a la seguridad de la maquinaria y la Directriz 93/68 CEE. el equipo VCM905 es suministrado con una hoja de datos, en la cual se incluye toda la información requerida por estas directrices. En este manual se incluyen instrucciones de seguridad y de mantenimiento adicionales.

En contemplación de las Directrices 89/336/CEE, corregida por 91/263/CEE y 92/31/CEE en cuanto a la Compatibilidad Electromagnética, se incluye al final de este manual una copia del Certificado de Conformidad para el VCM905.



SEGURIDAD-NIVEL DE RUIDO DEL EXCITADOR & VIBRACION DEL COMPONENTE

El nivel de presión acústica medio originado por los excitadores puede ser menor de 70 dB (A) a una distancia de 1 metro. Es básicamente la aplicación la que lo puede modificar. El operario puede influir significativamente en el nivel de ruido cuando el equipo esté en uso. Tanto el Manual del Operario como el Apéndice de Mantenimiento dan reglas para minimizar el ruido, y el operario debería hacer lo posible para conseguirlo.

NO SE SIENTE NI SE SITUE ENCIMA DE UN COMPONENTE EN VIBRACION, NI PERMITA QUE NADIE LO HAGA. EVITE QUE LAS UÑAS ENTREN EN CONTACTO CON ALGUN COMPONENTE EN VIBRACION. EVITE EXTREMOS AFILADOS Y REBABAS - LLEVE PROTECCION EN LAS MANOS.

## INDICE

### Pág.

- 4. Glosario
- 6. Introducción y Notas del Operario
- 7. Resumen de la Secuencia del Tratamiento
- 8. Area de Aplicación
- 9. Resonancia, Nodos y Modos
- 12. Sosteniendo el componente
- 17. El papel del Excitador, Colocación y Ajustado
- 23. Sargentas
- 24. Acelerómetro - Función y Posicionamiento
- 25. Empleo de registrador gráfico (impresora)
- 28. Funcionamiento del Equipo
- 34. Tratamiento mesa de vibración
- 36. Bibliografía
- Apéndice I - Ejemplos de grupos de componentes estandar
- Apéndice II - Asimiento. Manera de acoplar
- Apéndice III - Notas de Mantenimiento
- Apéndice IV - Certificados

## DIAGRAMAS

### Fig.

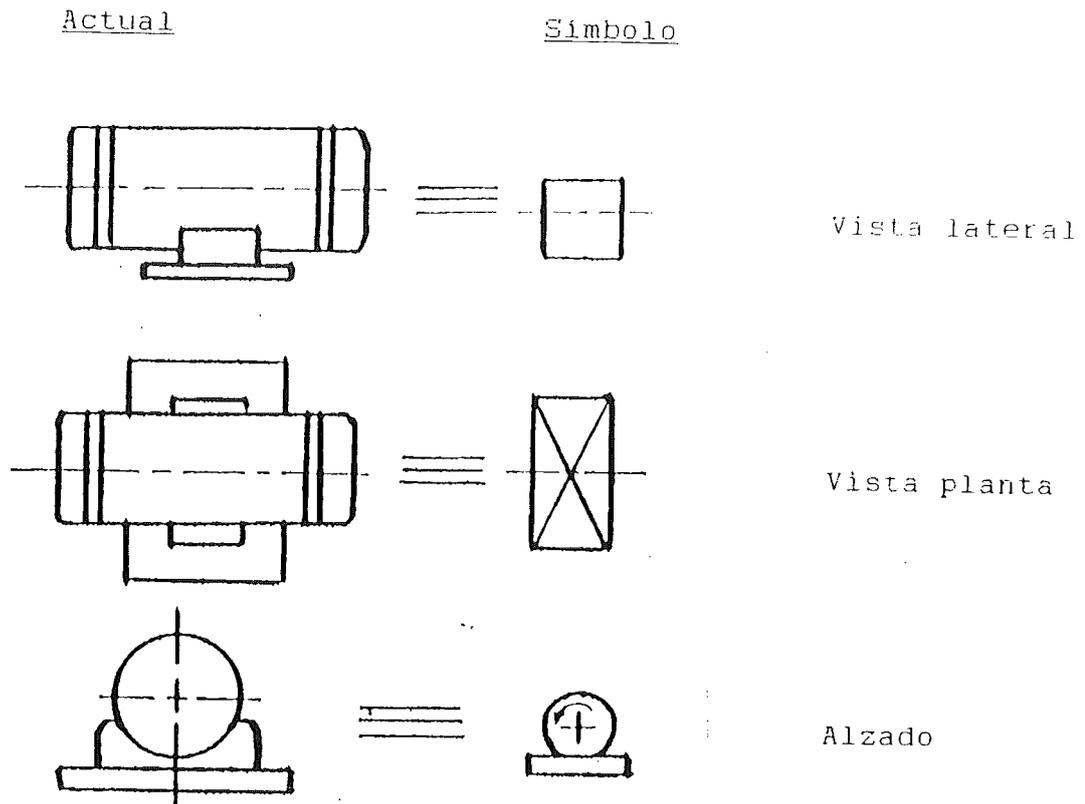
- 1.1 Símbolos empleados en este Manual
- 5.1 Nodos: Modificando sus posiciones en componentes flexibles
- 5.2 Efectividad del proceso mejorada mediante la obtención de más de un modo
- 6.1 Condiciones de Sostenimiento : Posición inicial típica para chapas
- 6.2 Figuras de modo: Efectos de rigidez y volumen
- 6.3 Figuras de modo: Efectos de rigidez y volumen
- 7.1 Colocación del Excitador
- 7.2 Excitador: Orientación con respecto a las líneas de nodos
- 8.1 Excitador: Aplicación en laminados, tubos y barras- ver 13.1
- 8.2 Modificando la posición en tubos y barras
- 11.1 Aspectos del registramiento gráfico
- 11.2 Aspectos del registrador gráfico
- 11.3 Instrucciones de conexión
- 12.1 Detalles de la consola VCM905 - panel frontal
- 12.2 Detalles de la consola VCM905 - panel trasero
- 12.3 Curvas del tiempo de duración de los ciclos de trabajo . .
- 12.4 D-g-F Nomograma
- 13.1 Tabla de vibración : Modos en tubos y barras

## GLOSARIO DE TERMINOS

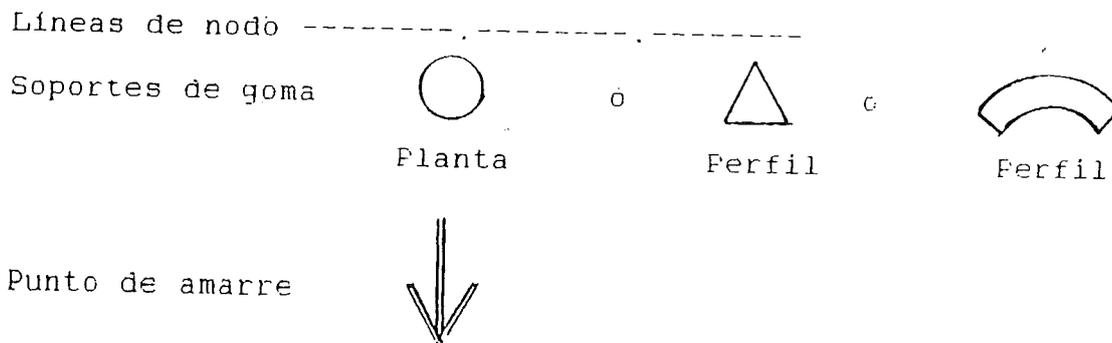
Acelerómetro	Pequeño sensor que, al serle aplicadas fuerzas g, emite una señal eléctrica que puede ser impresa en un osciloscopio, registrador de gráficos, etc
Amplitud	El movimiento dimensional entre pico y pico (p-p)
Antinodo	El punto medio entre dos nodos
Ciclo	El periodo de tiempo que requiere un movimiento completo dentro de una sucesión de movimientos regulares
Amortiguación	Pérdida de vibración al entrar en contacto con un cuerpo masivo como el suelo
Frecuencia(Hz)	El número de ciclos por segundo de una vibración periódica
"g"	Fuerza gravitacional - 1g= 32,2 pies/seg/seg Métrico 1g= 9,8 m/seg/seg
Aproximación	Ajuste de amplificación de una señal
Modo	El modelo de vibración de un componente
Nodo	El área o línea sosegada de un componente en vibración
Pico	La mayor amplitud de una respuesta resonante
Resonancia	La condición de alcanzar la máxima respuesta cuando una alteración periódica, con una frecuencia igual a la del sistema, hace que este entre en oscilación
Resonancia (práctica)	Cuando el movimiento elástico del componente está en concordancia con la velocidad (frecuencia) y la dirección (fase) de la vibración, la amplitud se incrementa y existe la resonancia. Como cuando se empuja a un niño en un columpio, si se le empuja antes de que lleque hasta arriba, se va frenando. Si se le empuja justo cuando comienza a bajar; se acelera y aumenta la amplitud.
Respuesta resonante	La condición de estar en resonancia
Frecuencia natural	La frecuencia a la que aparece un pico de resonancia

Fig. 1.1

SIMBOLOS UTILIZADOS EN ESTE MANUAL



ARRIBA: Representación del vibrador



## INTRODUCCION

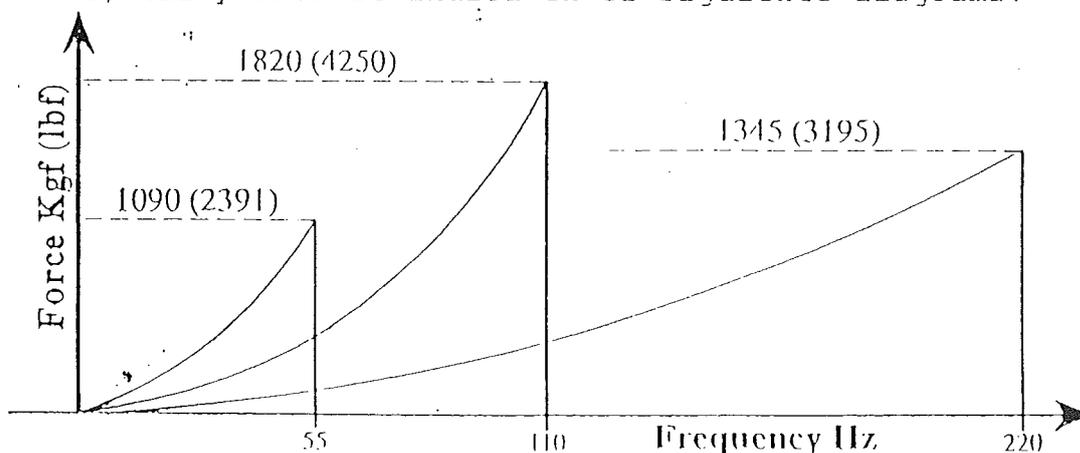
El sistema VSR. reducción de tensiones por vibración, es un tratamiento ampliamente utilizado en sustitucion al método térmico para la estabilización de fabricaciones, fundiciones y barras, cuando la estabilización del componente y la precisión resultan de gran importancia.

El equipo VSR es portátil y los componentes pueden ser vueltos a tratar en cualquier fase de fabricación. Al no producirse un calentamiento, las piezas no sufren ningun cambio metalúrgico, por lo que no está permitido para el tratamiento de recipientes a presión, etc. El operario debería hacerse siempre la siguiente pregunta: porque necesita el componente que le sean reducidas tensiones - para obtener mayor precisión o por motivos metalúrgicos?

## NOTAS DEL OPERARIO

El éxito del tratamiento VSR depende en gran medida del buen estado del equipo, así como de que el operario se atenga a los procedimientos y pricipios incluidos en esta manual. No hacer nunca uso del equipo en una zona peligrosa. Observar las notas sobre seguridad. Mantener el área de trabajo, suelo, etc limpio, seguro y libre de cargas móviles.

Aunque la teoría del proceso pueda parecer compleja, esto no interesa al operario, quien debe procurar siempre obtener la respuesta correcta de los componentes en tantos modos como sea posible, situando y ajustando el excitador de tal forma que no sea necesario emplear más corriente de la recomendada. Además, debería desplazar los soportes hasta colocarlos bajo las líneas de nodos para que se acomoden a las resonancias obtenidas. Estos son tres excitadores disponibles actualmente, el HT55, 110 y 220. El n<sup>o</sup> informa sobre la velocidad máxima nominal de cada excitador, tal y como se indica en el siguiente diagrama:



## RESUMEN DE LA SECUENCIA DEL TRATAMIENTO

Aproximación básica - ver figuras 11.1, 12.1 y pág. N°( )

1. Efectuar las soldaduras necesarias antes de enchufar el excitador.
  2. Posicionar y fijar el excitador de mayor velocidad / menor fuerza HT220 (ver pág. 17).
  3. Posicionar el acelerómetro (ver pág. 24).
  4. Si es posible, espolvorear sobre la pieza polvo de chorro de arena o similar.
  5. Utilice un enchufe protegido RCD de 30mA. Conectar cables y soltar (G). Poner interruptor (U) en CONT.
  6. Conectar y enchufar el registrador. Si no se van a utilizar, elevar las plumas y ponerles sus tapas, puesto que se secan si se dejan en contacto con el papel. Cubrir también la impresora.
  7. Mantener el control auto/manual (J) a tope a la izquierda, se ilumina (R) "velocidad mínima". Nota! La lectura mínima en la esfera es de 1, no de 0. No forzar la esfera. Las posiciones 1-11 en la esfera representan aprox. 5-55 Hz utilizando HT55, 10-110 Hz con HT110 y de 20-220 Hz con el excitador HT220.
  8. Situar inicialmente el control de aproximación a "en 5". Colocar el botón (D) para que la lectura sea de "g" y no de Hz.
  9. Con la luz (R) iluminada, apretar el botón AUTO (I) - comienza la subida automática.
- NOTA: NO VOLVER A PONER EL EQUIPO EN MARCHA HASTA PASADO UN MINUTO
10. Cuando la aguja del contador de resonancias alcanza el punto máximo en la escala, cambiar el control (F) a la posición media o "x5" con el fin de mantener la lectura dentro de la escala.
  11. Marcar las frecuencias de resonancia y figuras de modo en el componente durante la búsqueda automática.
  12. Continue en auto hasta que la luz (K) se ilumine (o siga las normas de su compañía).
  13. Vuelva el mando (J) al mínimo. Apretar botones (O) y (S), levantar las plumas.
  14. Corrija las posiciones de los soportes, y cambie al excitador de mayor fuerza/menor velocidad- coloque el HT110
  15. Apretar el botón (H) e incrementar manualmente la velocidad utilizando el mando (J) hasta llegar al inicio de la primera resonancia (ej. T1 = 66 Hz Fig. 11.1).
  16. Seleccionar el tiempo de mantenimiento en meseta apropiado para la frecuencia (fig. 12.3) y apretar (B).
  17. Al finalizar este tiempo, la velocidad del excitador volverá a continuar incrementándose.
  18. Cuando se halle encima del pico, apretar el botón (P) para volver a tener el control manual.
  19. Incremente la velocidad manualmente utilizando el mando (J) hasta alcanzar el inicio del siguiente pico y repetir los puntos 16 - 18, para 2 - 4 picos. Al tratar el último pico, se puede posicionar el modo P.B. (U) para finalizar, el cual apagará la unidad una vez finalizado el tiempo elegido.
  20. Colocar el mando (J) en cero y apagar (O), levantar plumas y taparlas
  21. Anotar en el gráfico el N° de trabajo, fecha, etc, siguiendo las normas de la compañía

NOTA: Estas instrucciones son solamente una guía general, pudiendo ser supeditadas por las normas de cada compañía. Por favor, lea las notas en la fig. 11.1.

Chequee periódicamente la sujeción de las sargentas. Nadie debería colocarse próximo a ellas cuando el equipo esté funcionando. Para la operación manual utilice el mando (J) y proceda tal y como se detalla arriba.

## CAMPO DE APLICACIONES

En primer lugar hay que saber con que materiales se va a trabajar. Algunas condiciones de los tratamientos térmicos y de los procesos de refrigeración limitan la efectividad del sistema VSR.

Normalmente se pueden estabilizar los siguientes materiales:

1. Una amplia variedad de hierros fundidos y aceros blandos.
2. Aceros de baja aleación, componentes de gran resistencia en dimensiones próximas a las finales.
3. Aceros de bonificación (recocidos ó templeados)
4. Aceros inoxidable; martensíticos, férricos o austeníticos.
5. Aleaciones de baja resistencia pueden ser tratadas, pero con pequeña fuerza y breves periodos (prácticamente sólo con el excitador de 220 Hz en exploración).

NOTA: El proceso no será totalmente efectivo en compuestos de níquel, aluminio ó titanio que hayan sido estirados (ó bonificados) para aumentar sus propiedades físicas. En estos casos, repetir la estabilización antes del acabado final.

En general, los siguientes materiales no pueden ser estabilizados:

1. Materiales laminados en frío, estirados ó sometidos previamente a grandes esfuerzos.
2. Aleaciones de gran resistencia sin previo desbaste.
3. VSR tiene poco efecto sobre la energía elástica incorporada.

NOTA: es evidente que el proceso no tiene efecto sobre las tensiones introducidas por mecanizados posteriores al tratamiento. Será necesario repetir el tratamiento antes del mecanizado de acabado en piezas de gran precisión. También el estabilizado térmico exige su repetición en estos casos. Como el proceso VSR no produce decoloración y ninguna o mínima distorsión, se puede aplicar de nuevo en piezas terminadas.

## IMPORTANTE

El proceso VSR no produce cambios metalúrgicos; por lo tanto no es apropiado para la mayor parte de trabajos de tuberías (por problemas de corrosión o de altas presiones) ni para recipientes a presión, y componentes sujetos a resquebrajamiento, por frío o fatiga severa.

Si tiene que estabilizar una estructura que sobrepase los límites de su experiencia, no dude en consultarnos.

## RESONANCIAS, NODOS Y MODOS

Utilizando un equipo VSR moderno que disponga de varios excitadores, cualquier estructura adecuada para ser estabilizada por el sistema VSR puede ser excitada a una o varias frecuencias de resonancia. En definitiva, lo que nosotros buscamos son estas frecuencias de resonancia, en especial aquellas que afectan a toda la estructura. Se las reconoce con facilidad puesto que tienen asociadas distintas áreas o líneas de quietud (que no vibran) llamadas nodos. Generalmente no nos interesan las resonancias de partes tales como paneles, etc.

Los nodos forman figuras que nos informan sobre las formas dinámicas de las estructuras, a las que llamaremos modos. Hay tres modos básicos - de pandeo, torsionales y complejos. El material pesado en polvo esparcido sobre la estructura se concentrará sobre las líneas de nodos. Si estas líneas están más o menos paralelas entre sí, denotan un modo de pandeo, y si están en ángulo recto entre sí, un modo torsional. Véanse en la fig. 6.1 los diagramas correspondientes. Si no responden a estos esquemas, se trataría probablemente de un modo compuesto. La óptima posición de los soportes de goma es bajo los nodos (ver. pág. 17).

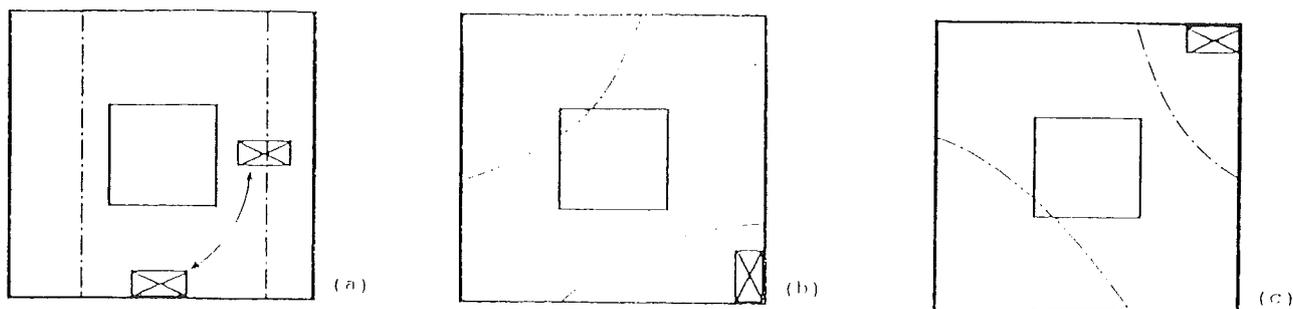
Lo único que puede dificultar la obtención de resonancias claras sería situar el excitador sobre un nodo o los soportes bajo los antinodos. Pero si se siguen las indicaciones de este manual, el operario obtendrá todos los modos posibles con facilidad y rapidez. Algunas resonancias pueden durar tan sólo unos pocos ciclos y un segundo operario podría no detectarlas, por lo que resulta esencial aumentar poco a poco la velocidad. Operando de esta forma, anotando las variaciones del indicador de resonancias y tomando nota del movimiento del polvo sobre la superficie de la estructura, el operario detectará fácilmente las resonancias. El tiempo de exploración con el VSR modelo VCM 905 es de 20 minutos, desde la velocidad mínima a la máxima (con el VCM 80 era de 10 minutos).

Para atravesar un pico de resonancia, sería necesario exceder momentáneamente el amperaje máximo admitido. Esta posibilidad es permisible, el aparato dispone de una doble protección contra sobrecargas.

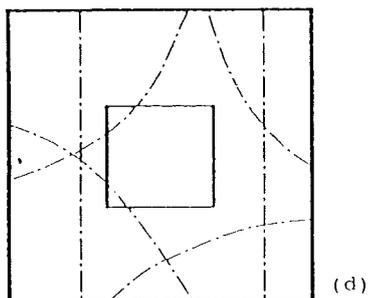
Si ocurriera una sobrecarga, el botón "reset" debe ser pulsado antes de volver a empezar. En ocasiones, el pulsar el botón de aumento de energía (Q) puede facilitar el paso sobre un pico conflictivo. Si no basta con ello, hay que desplazar el excitador hacia el nodo y/o inhibir la vibración de la estructura a la resonancia ya tratada calzando una cuña de madera (y quitar la cuña una vez sobrepasado el pico de resonancia).

Fig. 5.1

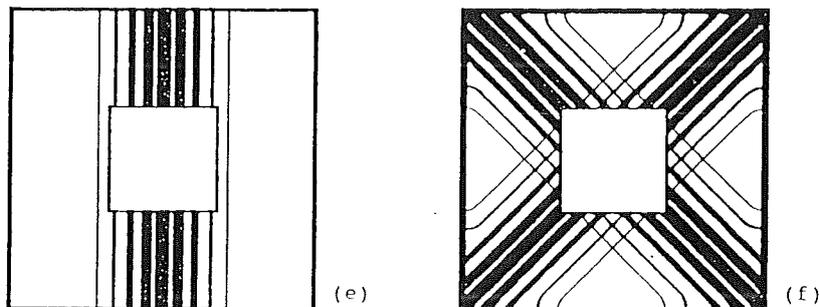
NODOS: Modificación de la posición en chapa delgada para obtener mejores resultados



Las figuras a, b, y c muestran como las figuras de modos varían según donde se coloque el vibrador sobre una chapa pulida cortada por oxicorte.



La figura d muestra el conjunto de las líneas de nodos superpuestas. Areas sin movimiento en un caso pueden ser zonas de vibración en otro caso. Se obtiene un tratamiento más uniforme gracias a que el esfuerzo máximo impuesto cíclicamente ocurre en los antinodos.



La fig. e muestra las áreas teóricas de máximo a mínimo esfuerzo cíclico asociado con un tratamiento como el representado en a.

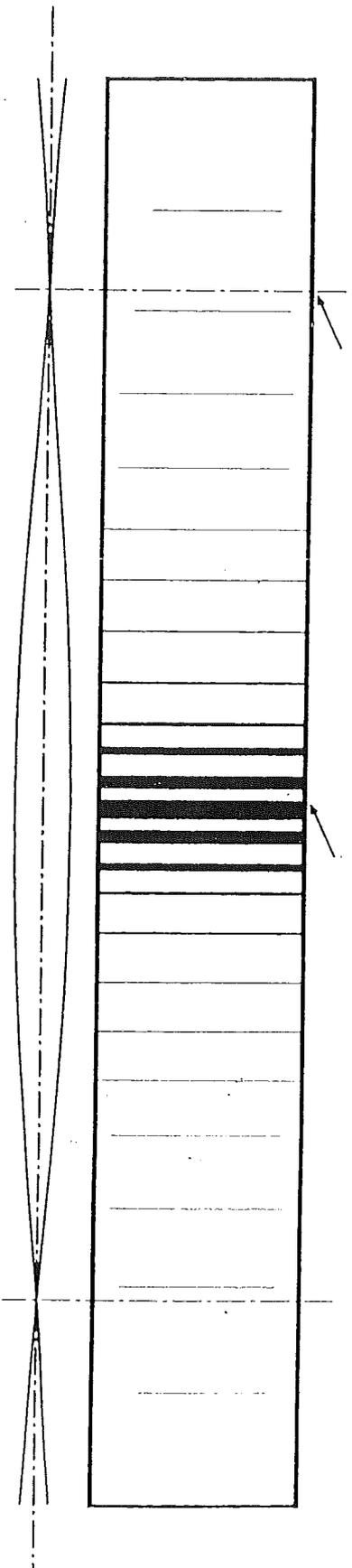
La fig. f muestra como, con un poco más de tiempo, se puede obtener una figura de esfuerzos cíclicos mucho más uniforme que la obtenida en b y c. Evidentemente en el caso límite de tener que rectificar una placa excepcionalmente, delgada y exacta, la superposición de todos los modos podría generar un resultado incluso más estable y exacto.

Para las claves de los simbolos ver fig. 1.1

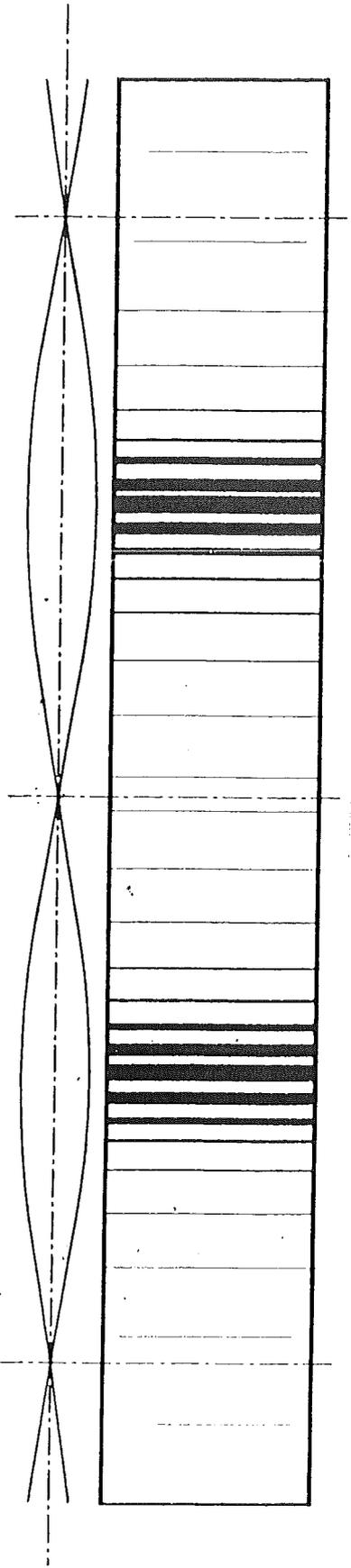
Fig. 5.2 Eficacia del proceso aumentada mediante la obtención de más de un modo de vibración

Esfuerzo cíclico mínimo

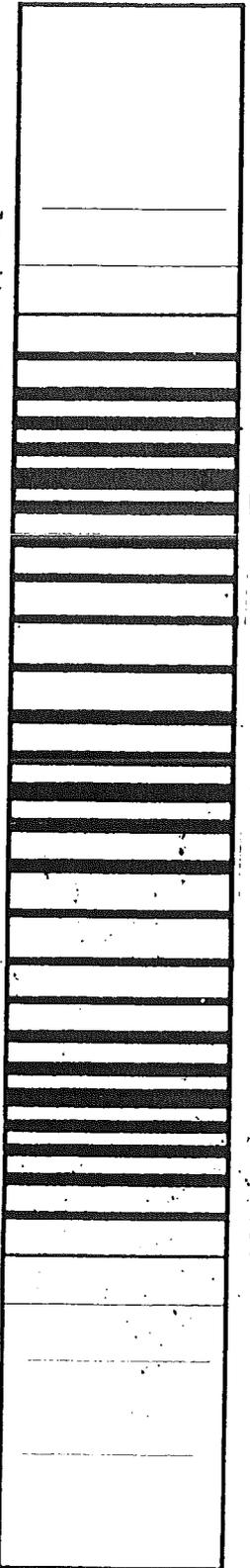
Esfuerzo cíclico máximo



a) Arriba: Planta y vista lateral de una viga en su 1er modo de pandeo, mostrando las áreas de mayor y menor esfuerzo cíclico impuesto.



b) Arriba: Planta y vista lateral de una viga en su 2º modo de pandeo, mostrando las áreas de mayor y menor esfuerzo cíclico impuesto.



Arriba: Superposición de a y b mostrando una mayor cobertura

## COLOCACION DEL COMPONENTE

Palabras clave: Respuesta resonante. Hz. Amortiguación. Nudo (ver glosario)

El objetivo es posicionar cada soporte de sujeción de tal forma que el peso quede bien repartido, con lo que se asegura que las deflexiones estáticas sean mínimas, permitiendo que durante la resonancia tenga lugar el máximo movimiento dinámico. A esto contribuye el tipo correcto de soporte de aislamiento, con poco contacto con el componente. Decida en que forma colocar el componente, teniendo en cuenta la seguridad y conveniencia del emplazamiento del excitador. Un operario nuevo debería prestar atención a las fig. 6.1 a 6.3.

La mayoría de los componentes son colocados sobre soportes de goma. La posición y tipo del soporte tan sólo es crítico en piezas de precisión, ya que aquí hay que intentar siempre posicionar los soportes exactamente bajo las líneas de nodos de los pequeños componentes, o como máximo en un margen de  $\pm 5$  cms. Mantener el área de contacto tan pequeña como sea posible para minimizar la amortiguación y permitir el máximo movimiento. En componentes muy pequeños se emplean mesas de vibración (pág.34).

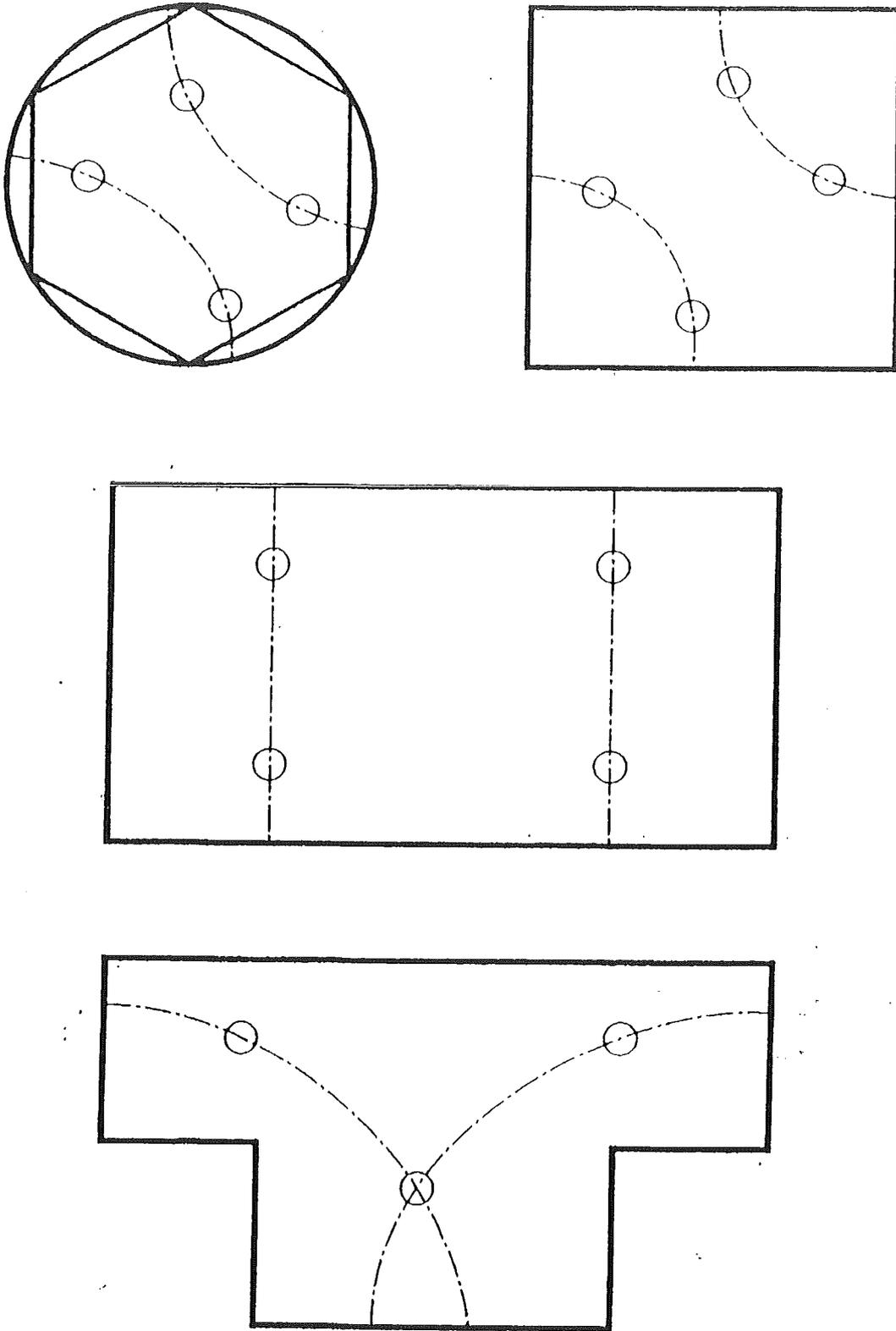
Resultan esenciales aislantes de buena calidad y apropiados para el peso del componente, ya que las líneas de nodo sólo aparecen cuando el componente ha entrado o está a punto de entrar en resonancia (pág. 9). Por este motivo es necesario colocar los soportes correctamente. Esto se consigue teniendo una idea de como la pieza va supuestamente a responder (ver fig. 6.1 a 6.3). Las líneas de nodo se harán visibles, incluso estando los soportes mal colocados, si se esparce polvillo seco sobre las superficies del componente (siempre y cuando estas no esten pegajosas). Aprenda mediante el estudio de la disposición de las líneas de nodos y compruebe si los soportes de goma podrían haber sido colocados en puntos comunes a más de un modo. Esta es una buena práctica, ya que empleando los aislantes correctos la potencia del VCM905 es tal que consigue superar cualquier emplazamiento incorrecto.

Algunos componentes como aros de gran diámetro de pequeña sección de corte se tratan mejor sujetando el excitador con rodillos de apoyo al diámetro interno ó externo del aro y suspendiendo el conjunto desde un soporte con una cuerda atada al vibrador.

Quando se traten vigas, el excitador debería ser primeramente colocado con sus piquetas en cruz (a través), y después longitudinalmente, con el fin de excitar de una forma óptima tanto los modos de pandeo horizontal y vertical como los modos torsionales.

Fig. 6.1

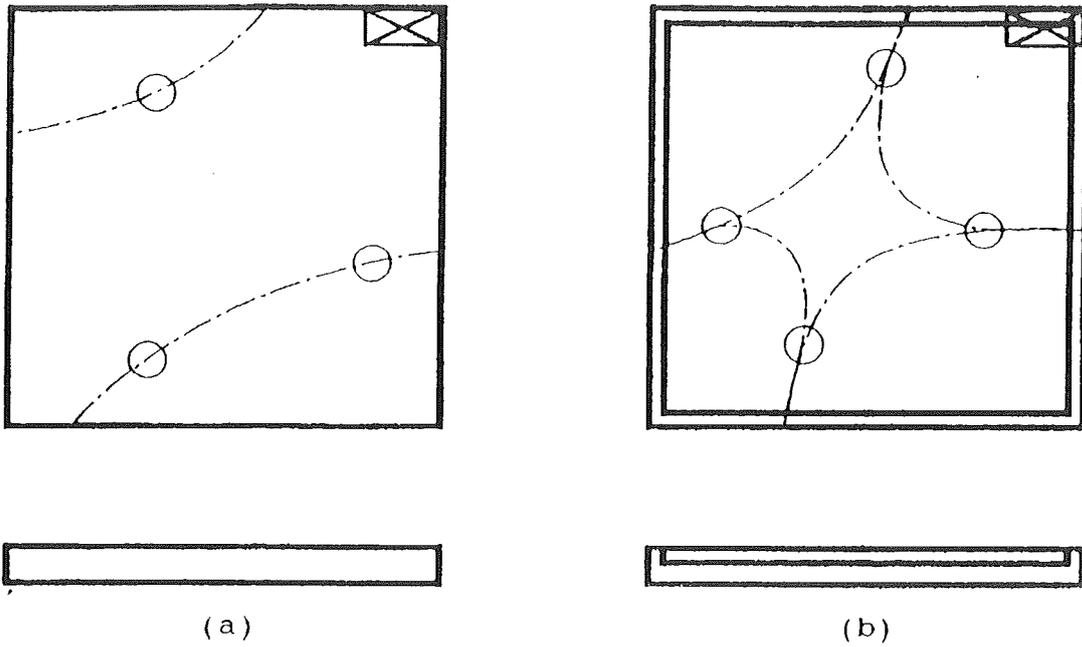
CONDICIONES DE LOS SOPORTES: Posiciones iniciales típicas para chapas



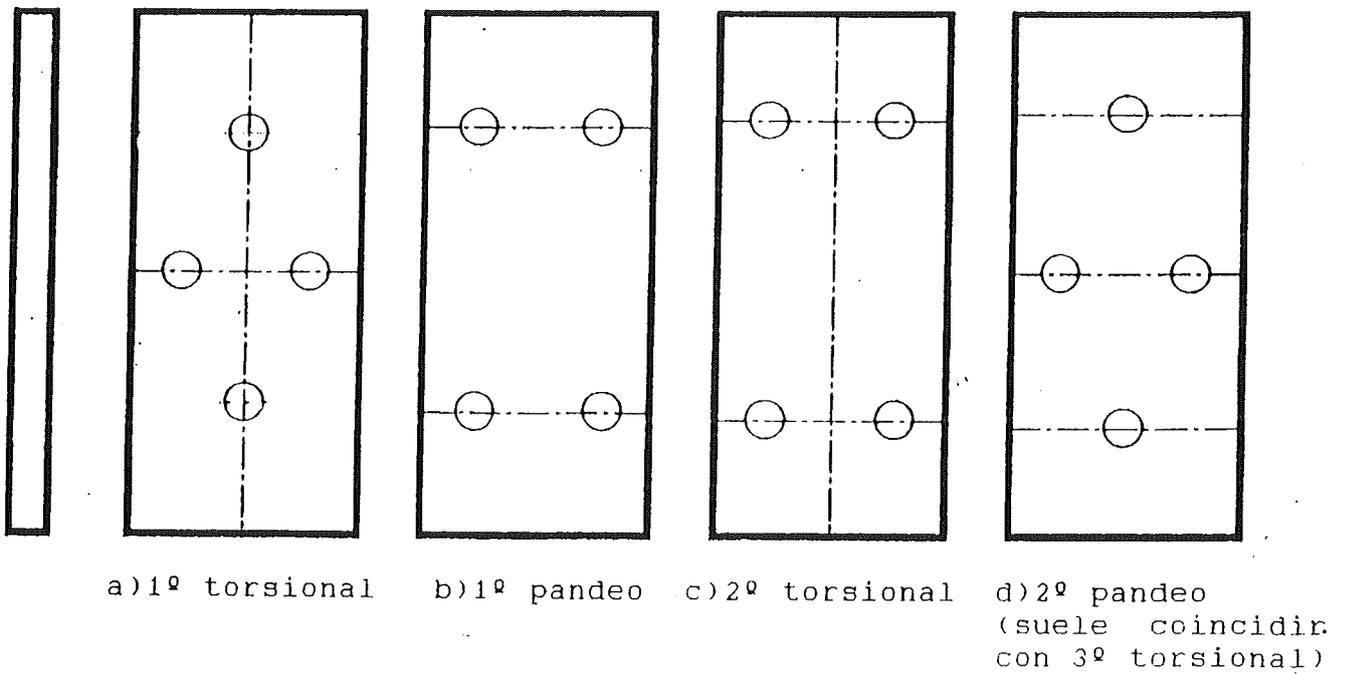
Para las claves de los símbolos ver fig. 1.1

Fig. 6.2

FIGURAS MODALES: Efectos de masa & rigidez

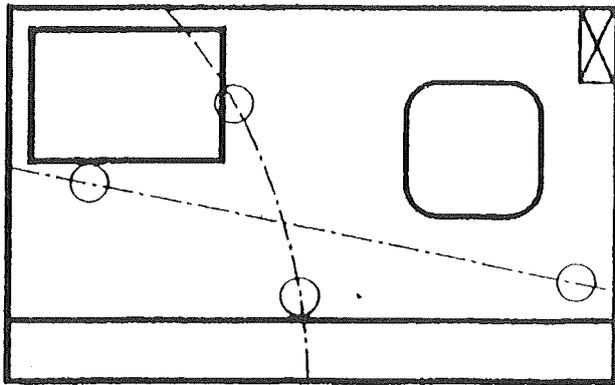


FIGURAS MODALES: Modos típicos hallados en chapas

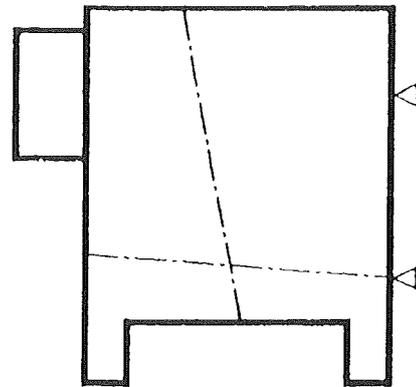


FIGURAS MODALES: Efectos de masa & rigidez

a) Los efectos de la masa en la figura modal y en la posición de los nodos

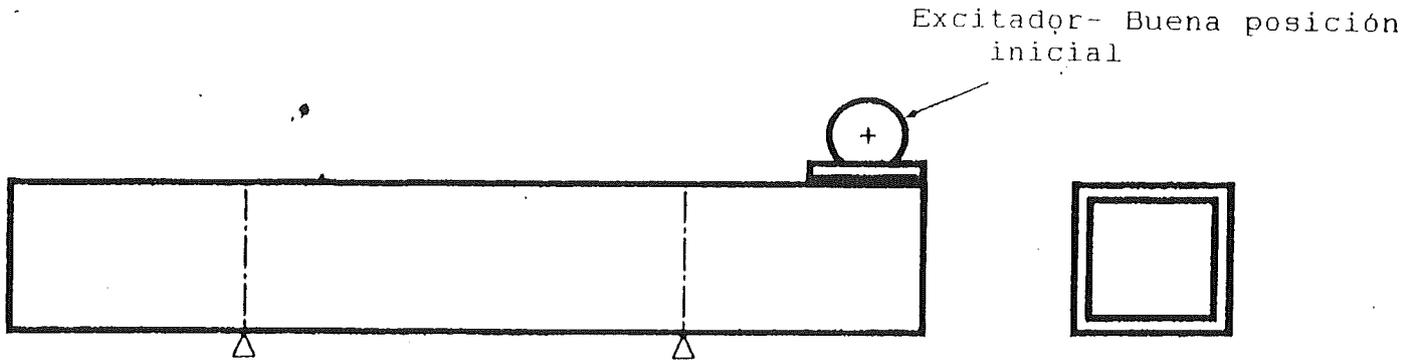


Planta



Vista lateral

b) Viga simple - más flexible que en el caso (c)



c) Viga compleja - menos flexible que en (b)

Note que al aumentar la rigidez, los nodos se han movido hacia el exterior

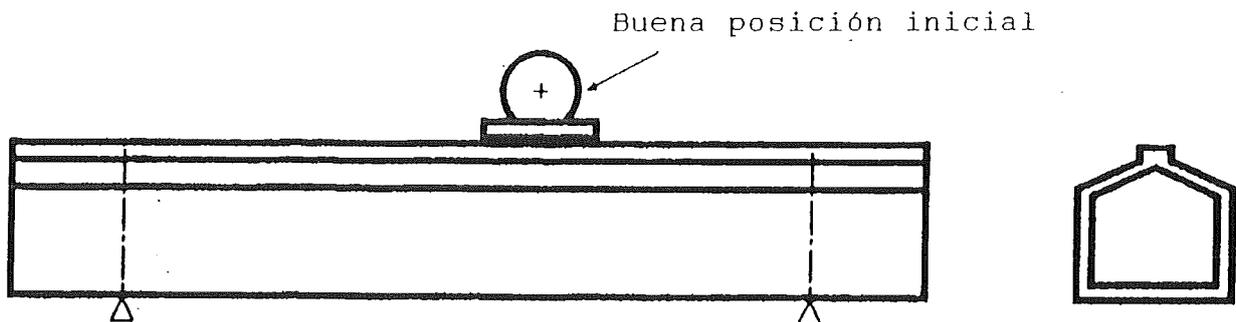
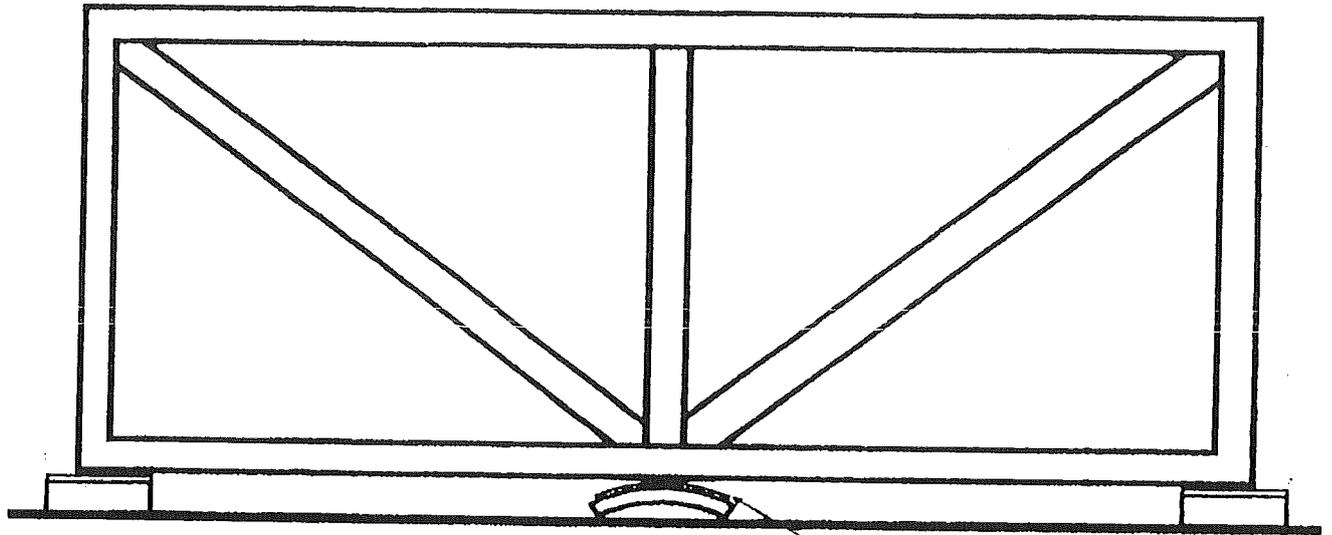


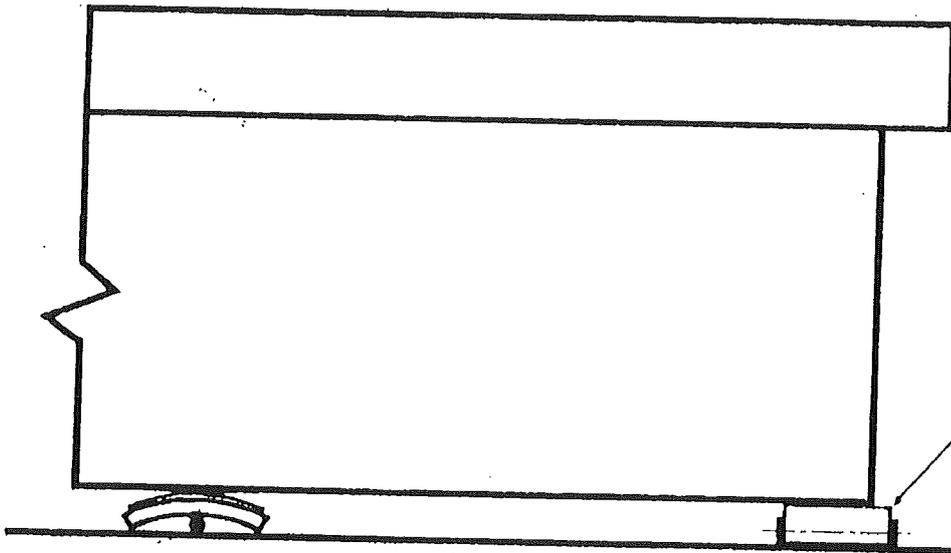
Fig. 6.4

COLOCACION DE COMPONENTES LIGEROS Y PESADOS



a) Componente ligero

En componentes muy ligeros coloque un soporte de goma entre el segmento de tubo y el componente



b) Componente pesado

En componentes muy pesados, para evitar que el taco de goma quede aplanado, colocar un tubo de acero bajo este.

## EL PAPEL DEL EXCITADOR, EMPLAZAMIENTO Y AJUSTE

Palabras clave: Resonancia, frecuencia, modo, nodo (ver glosario)

La función del excitador de carga especial es asegurar una determinada velocidad constante durante el proceso, para que el componente pueda entrar en uno ó más estados de resonancia. El operario no tiene control acerca de donde se producen las resonancias. Estas vienen determinadas por el tamaño, peso y detalle estructural del componente. El equipo las busca y encuentra automáticamente.

El excitador produce un campo vectorial rotatorio. Sujetándolo rigidamente al componente, la fuerza y movimiento son aplicados al componente en forma de onda sinusoidal. Cuando la frecuencia del movimiento se aproxima a una de las frecuencias resonantes del componente, la respuesta del componente comienza a ser desproporcionadamente grande en comparación con la fuerza impuesta por el excitador. Durante el lento incremento del movimiento (de naturaleza de pando o de giro torsional), este ejerce progresivamente mayores tensiones en el campo de tensiones residuales del componente. En los lugares en los que las tensiones impuestas y las residuales se suman, tanto microscópica- como macroscópicamente, se produce una reducción y redistribución de las tensiones debido a varios factores complejos. (ver bibliografía - pág. 36). Finalmente es esta condición de resonancia la que buscamos, pero antes estas tensiones altas deben ser bajadas durante el periodo de mantenimiento en meseta a una velocidad constante hasta alcanzar el pico. El proceso, utiliza normalmente tanto el excitador de mayor velocidad/menor fuerza de HT220 como el de menor velocidad/mayor fuerza HT110 de tal forma que las tensiones altas puedan ser bajadas y redistribuidas de una forma progresiva y segura. Usualmente se suele dejar montado el excitador excepto cuando se han de tratar componentes extremadamente ligeros ó frágiles - ver App. III para detalles del ajuste. Asegúrese siempre de que las caperuzas finales del excitador están en buenas condiciones y bien colocadas antes de su puesta en marcha.

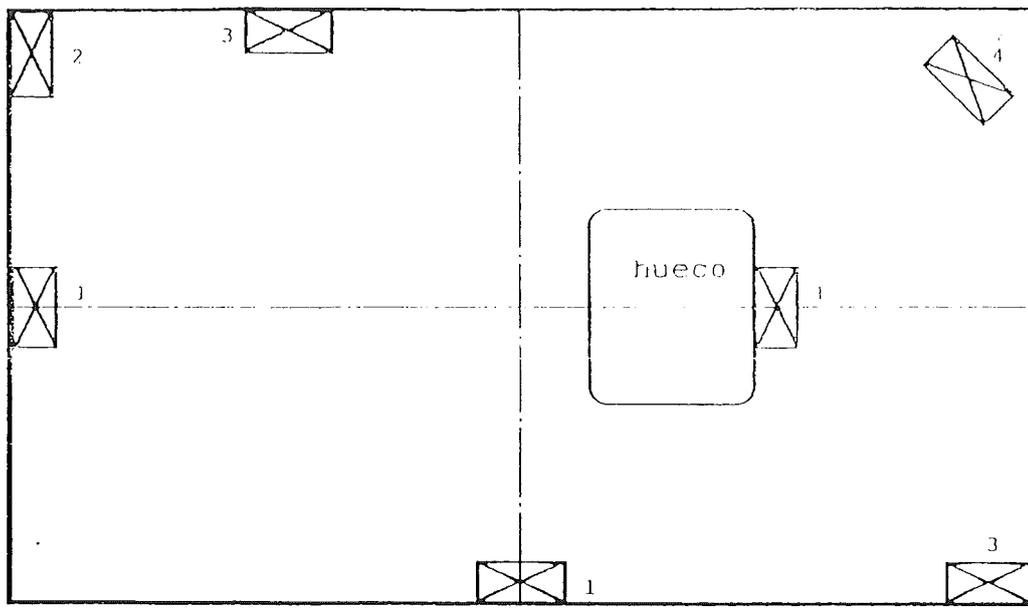
Sin embargo, componentes de aluminio con secciones huecas (RHS) y componentes reducidos de acero dulce con secciones huecas (MS RHS- típicamente 25 mm sq.) son tratados sólamete utilizando el excitador HT220; por ser componentes críticamente tensionados y quebradizos (ver ejemplo de las especificaciones de la compañía en apéndice 1.)

### NOTA PRACTICA

El cuerpo del excitador es de hierro fundido maleable. Más que sujetarlo directamente con las sargentas resulta mejor proteger la base y esparcir la carga usando una pieza con hoyuelos de relleno de 12 mm. Esto también ayuda a las sargentas a aguantar más, ya que no necesitan estar tan fuertemente sujetas. A altas velocidades en superficies pulidas, un espaciador de metal suave evitará que se patine. Asegure siempre que las sargentas estan bien alineadas antes de sujetarlas, moviéndolas de lado a lado durante el amarre.

Fig. 7.1

a) COLOCACION VIBRADOR - para componentes en 1er modo de torsión



NOTA: La posición 1 es la mejor para la vida del vibrador, pero la 2 y 3 son mejores en principio para la fase 1 de mín. a máx auto scanner

b) COLOCACION VIBRADOR - para componentes en 1er modo de pandeo

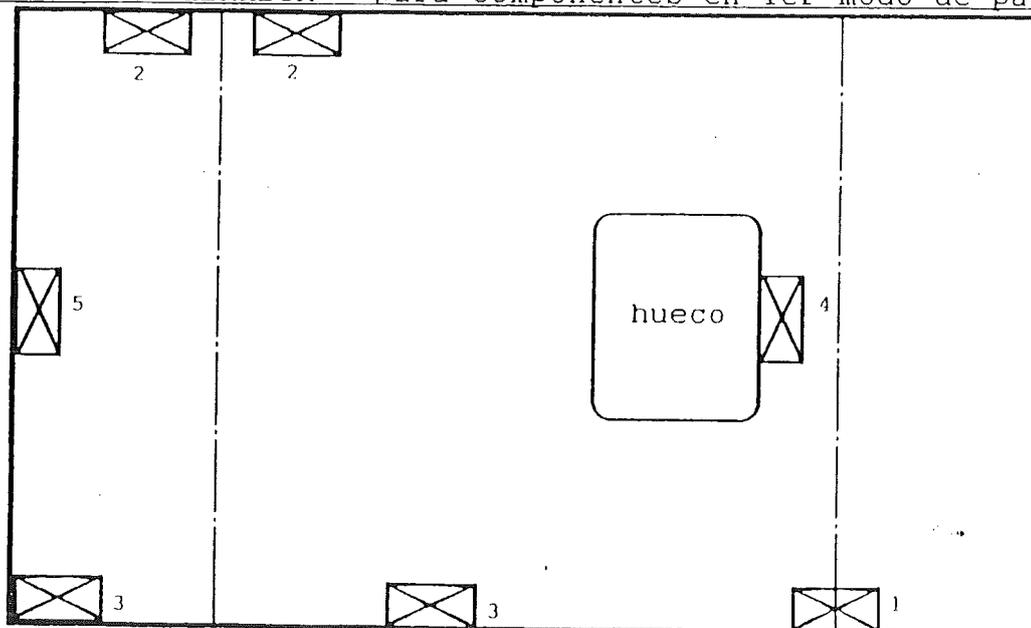
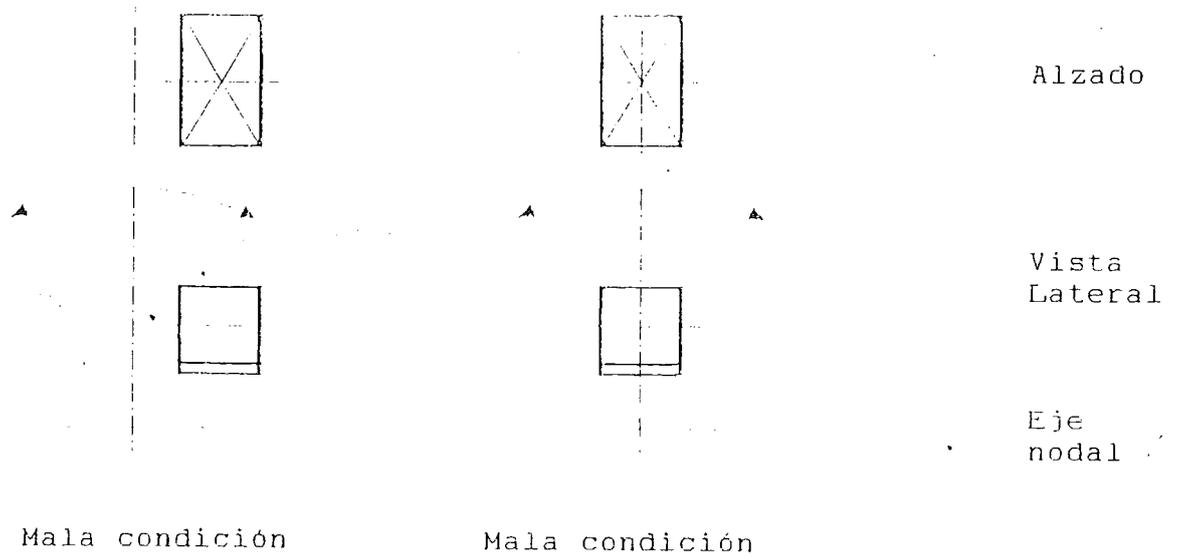
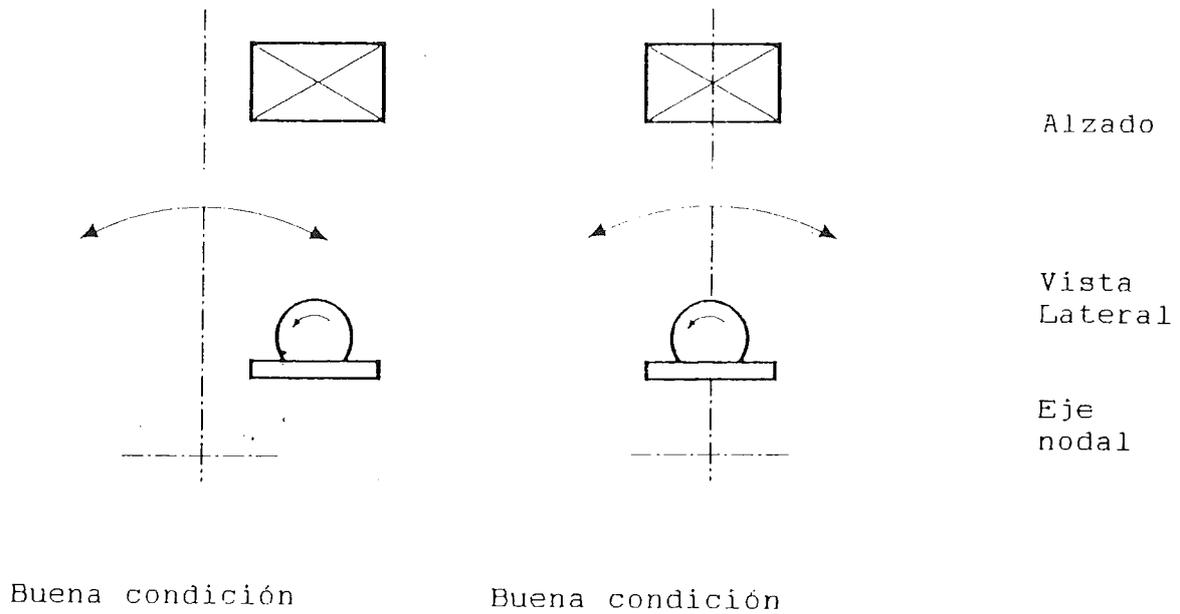


Fig. 7.2

VIBRADOR - ORIENTACION RELATIVA A LAS LINEAS DE NODOS

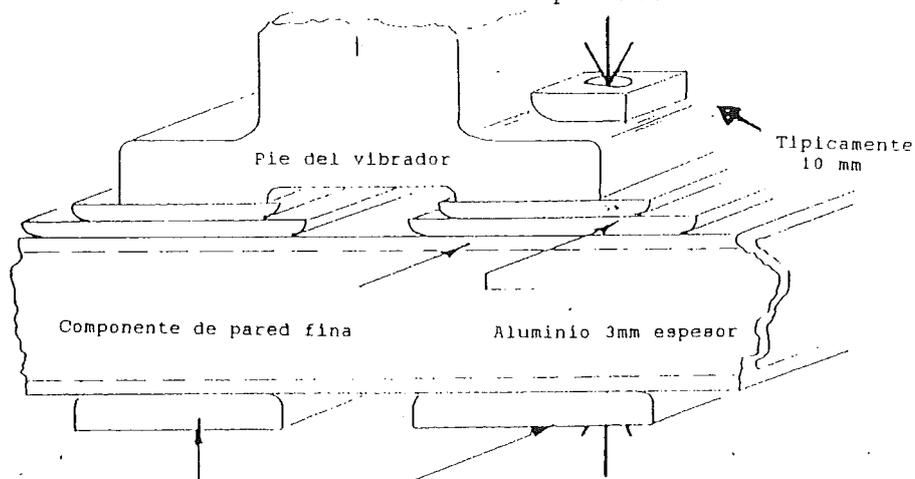


REGLA: El eje del vibrador debería estar paralelo a la línea nodal más cercana - Esto prolonga la vida del vibrador y reduce el ruido



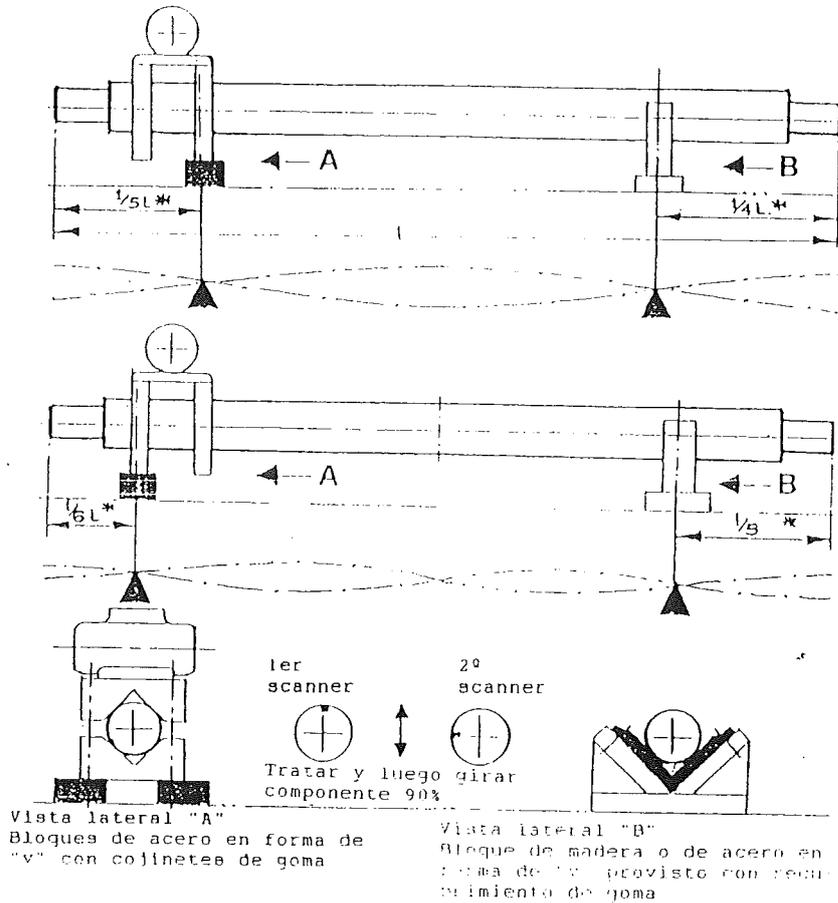
Componentes como barras, rodillos, ejes, etc. son tratadas en principio de la misma manera que componentes lisos o de tipo base de máquinas. Aplicar todas las reglas y consideraciones generales. Antes de intentar entender en detalle cada aspecto del VSR, adquiera comprensión y confianza utilizando una lámina de aprox. 1m x 2m x 25mm ó bien una barra de diámetro 100mm x 4m. Tubos de pared fina ó secciones deberían tener siempre el punto de transición de rigidez (bloque en la base del vibrador) a flexibilidad (componente en vibración) ramificado con láminas radiadas de fino aluminio (ver abajo), fig. 13.1 y Apéndice II. Para el tratamiento de pequeñas barras fáciles de elevar, ver fig. 13.1. Para el tratamiento de barras pesadas y componentes de tipo rodillo, ver fig. 8.1 y 8.2. Nota: Inicialmente, en caso de duda, siga las simples reglas del principiante: - Coloque el excitador en ó cerca de un extremo (ó esquina - ver fig. 7.1 a posición 2). Coloque los soportes de goma separados de los extremos (ó esquinas - ver fig. 6.1 a 6.3). En rodillos y ejes ver fig. 8.1 y 8.2. Los nodos y los antinodos serán visibles observando el movimiento de las partículas de material pesado esparcidas sobre la superficie. Coloque los soportes de goma bajo los puntos de quietud (nodos) y modifique la posición del vibrador siguiendo las directrices generales.

Cuando se traten vigas, el excitador debería ser primeramente montado con su eje transversal, y más tarde con su eje longitudinalmente, para excitar ambos modos de pandeo vertical y horizontal y modos torsionales. Ver fig. 7.1 y 7.2. Los excitadores pueden ser montados en cualquier plano pero es preferible con el eje del motor horizontal. Si hay posibilidad de elegir entre una fina, media o ancha sección, elija la media o ancha antes que la débil sección fina. (El posicionamiento del excitador debería asegurar siempre un buen anclaje del mismo - ver fig. 7.2). Generalmente los vibradores son colocados a pleno peso, pero están provistos con pesos ajustables en ambos extremos. Ver Apéndice III "Procedimiento de uso del vibrador" para el procedimiento de ajuste de los pesos.



Aluminio de 10 mm espesor (anchura de RHS) para repartir la carga de la sargenta

Fig. 8.1



\* Condición de colocación inicial aproximada. Ver nota en pág. 20.

1. Colocacion como en (a) arriba, obtiene resonancia, ajustar los soportes a las líneas de nodos. Se restablece la resonancia y tratar a 4000 ciclos.
2. Soltar los bloques metálicos, girar 90º, volver a sujetar y a tratar como arriba (1).
3. Atravesar la 1ª resonancia e intentar llegar hasta la 2ª (b si es posible (utilizando hasta ahora el vibrador de HT220). Repetir (1) y (2).

NOTA: Si se prefiere, la 1ª y la 2ª resonancia pueden ser tratadas antes de girar el eje pero los soportes han de ser reposicionados cada vez.

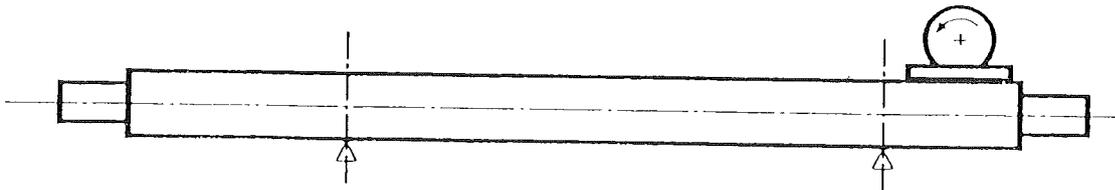
4. Cualquier resonancia por debajo de los 110Hz puede ser tratada con el excitador de HT110, girando el componente para alcanzar scan 2 a 90º a scan 1. Esto consigue un tratamiento uniforme.

NOTA: Si tan sólo se encuentra una resonancia por debajo de HT110, utilice solamente el vibrador de HT110. Siguiendo los principios de la fig. 5.2, modificando la posición de los nodos como en la fig. 8.2 se consigue una mayor exactitud - raramente hecho en la práctica.

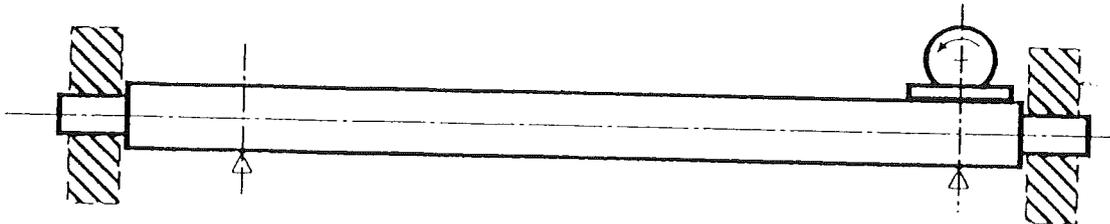
Fig. 8.2

COMPRENDIENDO LOS EFECTOS DE LA DISTRIBUCION DE MASAS

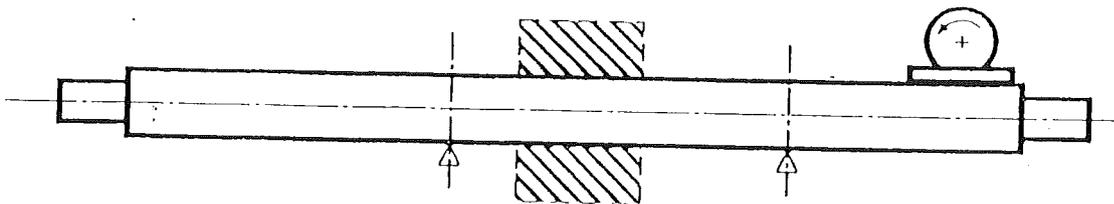
NOTA: En todos los componentes de tipo barra redondos o cuadrados, observe los procedimientos ilustrados en fig. 13.1 acerca del scan 1 y scan 2. Además, aplique los principios de la fig. 5.2



- a) Posiciones de los nodos: con sólo la masa del vibrador como influencia modificadora



- b) Posiciones de los nodos: componente con masas en los extremos



- c) Posiciones de los nodos: componente con masa central

Soporte siempre en la línea nodal, o en un área lo más cercana posible, obteniendo así el máximo esfuerzo cíclico impuesto. Esto asegura el máximo beneficio del proceso.

NOTA: CUIDADO: ASEGURE QUE CAMBIOS REPENTINOS EN LA SECCION TIENEN UN RADIO GENEROSO EN LA RAIZ (BASE)

## SARGENTAS

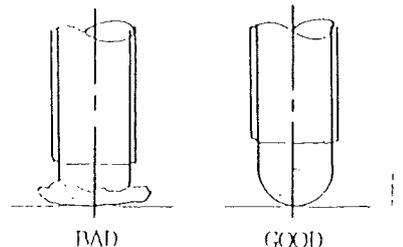
Al escoger sargentas para usar con el VSR hemos de tener en cuenta los siguientes aspectos:

1. Tienen que resistir la máxima fuerza centrífuga del excitador más la presión de las sargentas y una considerable fuerza "g" cuando estén en resonancia.
2. Resultan mejores las sargentas forjadas "G" de gran calidad, usualmente con tornillo de cabeza cuadrada. Si se utilizan sargentas de anaqueil pesado, las barras de torno han de ser quitadas o su traqueteo será recogido por el acelerómetro, causando "ruido" en el trazado del registrador.
3. No use nunca sargentas con final bola/giratoria - pueden fallar y romperse.
4. Si son fabricados bloques "V" especiales, asegúrese que sean robustos y estén bien soldados. Limite las áreas de contacto con el componente a 25 - 40mm. Cuando utilice barras roscadas o tacos, asegúrese de que se ha empleado el doble del engranaje normal de filete y el doble del tamaño normal del filete, para reducir el estiramiento y pérdida de carga y vibración bajo severas condiciones de trabajo. Use un paso de rosca mínimo de 20mm de diámetro (ver fig. 13.3 y 13.4). Inspeccione de forma regular el "uso" y "desgarro" de los artículos fabricados en su empresa.

NOTA: Chequee periódicamente el apretado de las sargentas durante el tratamiento entre picos.

Sargentas típicamente apropiadas son:

- a) Sargentas "G" de metal forjado marca "Lion".
- b) Sargentas de cremallera para entallador (escultor)



NO SE LO HAGA USTED MISMO

Podemos suministrarles de stock sargentas "G" extra en 4", 5" y 6" a precios más bajos que la mayoría de los suministradores de herramientas (sólo en el Reino Unido)

EL EQUIPO HA DE SER REVISADO DE FORMA REGULAR POR UN INGENIERO COMPETENTE. TOMA PRECAUCIONES CONTRA EL RIESGO DE QUE SE ROMPAN O SUELTEN LAS SARGENTAS

ES UNA BUENA PRACTICA EL REPARTIR LA CARGA IMPUESTA POR LAS SARGENTAS SOBRE LOS ANCLAJES DEL VIBRADOR USANDO UN BLOQUE AGUJERADO DE RELLENO (p.e. de aluminio o acero rápido de 12mm de espesor). ESTA PRACTICA TAMBIEN EVITA EL DAÑAR LOS ANCLAJES DEL VIBRADOR .

## EL ACELEROMETRO - FUNCION Y EMPLAZAMIENTO

El acelerómetro está firmemente acoplado al componente, perpendicular a la respuesta prevista. Con el botón (D) puesto para leer "g" (en posición OUT), al sacudir el cristal en el acelerómetro da una señal mV proporcional a la fuerza "g". La señal es amplificada y mostrada en el contador de resonancias (E - fig. 12.1) y en el registrador gráfico. La magnitud de esta lectura puede ser variada, independientemente de la fuerza de la señal, manipulando el control de sensibilidad (F). Alternativamente, se puede obtener un efecto similar variando la distancia del acelerómetro al nodo. NOTA: No deje nunca que el cable resuene.

El acelerómetro debería ser colocado en un área del componente de improbable vibración, independientemente de la estructura global y no dónde se suponga que ha de estar un nodo. El extremo de la estructura principal resulta ideal. Una lectura de un pico indica entonces una respuesta resonante del conjunto. Comience con el control de sensibilidad (F) en la posición -- 5 y cambie a la mitad o a posición x 5 cuando se aproxime a un pico para mantener la lectura dentro de la escala. Algunas compañías tienen normas que especifican que escalas son las mejores para un determinado grupo de componentes.

Además de la lectura de frecuencia aprox. obtenible utilizando el mando de control manual (J), cuando la fuerza de la señal del acelerómetro es mayor de 3 - 5 "g" se puede conectar el contador de Hz/g (E) para que lea con mayor exactitud la frecuencia soltando (liberando) el botón (D). (Para leer "g", volver a presionar el botón).

Las líneas de nodo se harán visibles si se esparcen partículas en grano de material pesado sobre la superficie seca, indicando estas el modo. Cuando cada modo haya sido establecido, marque la posición de las líneas nodales utilizando un marcador (tiza), y anote la frecuencia del pico.

NOTA: Evite que las partículas rechinen (zumben), ya que esto podría provocar que resonancias fantasmas fueran registradas en el contador de resonancias y en la impresora, originando confusión.

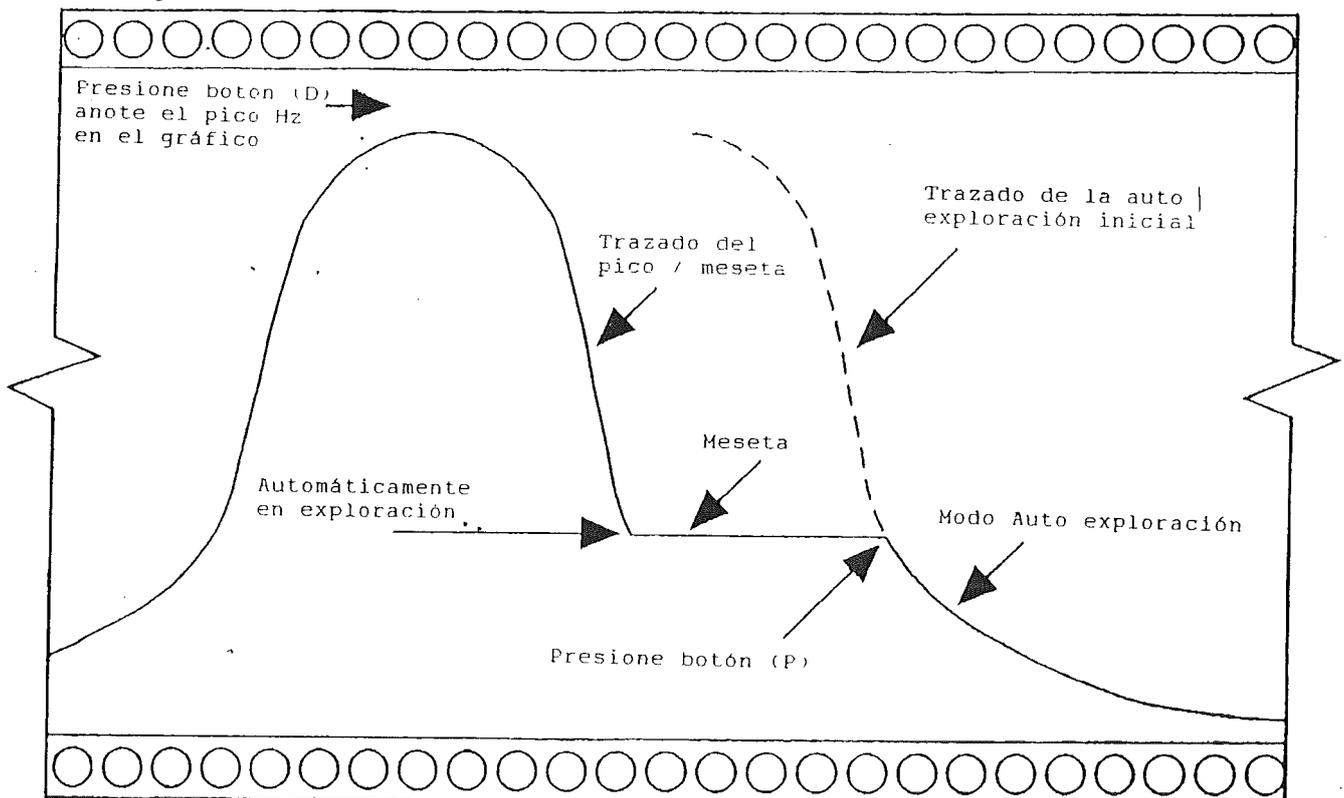
## USO DEL REGISTRADOR GRAFICO

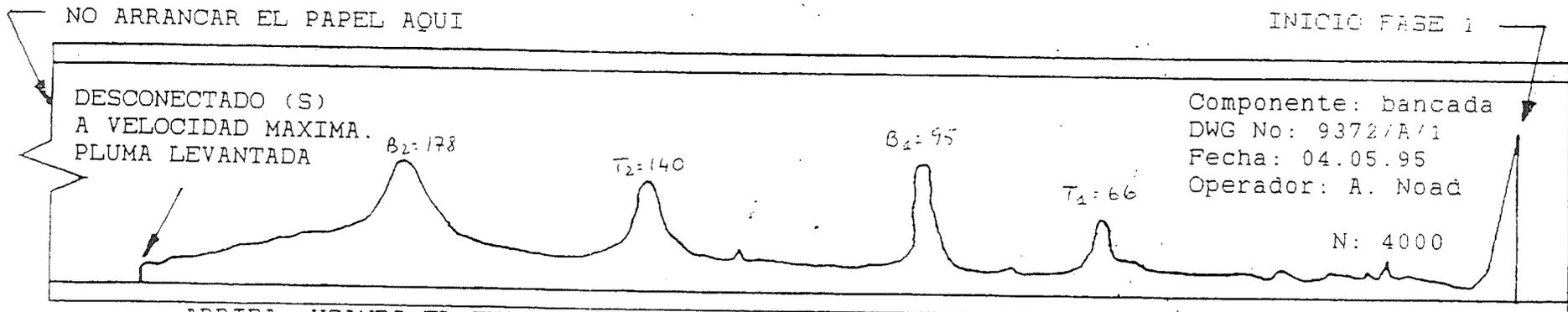
Como consecuencia de la amplia implantación de normas de calidad tales como BS5750, ha aumentado la demanda de comprobantes del tratamiento, del método de despliegue e identificación del componente. La fig. 11.1 muestra una representación del gráfico producido con el método VCM905. Convenientemente comentado, se transforma en una fiable herramienta de certificación de calidad, además de contener útiles datos de diseño. Los requerimientos suelen variar entre compañías, pero algunas normas típicas se hallan expuestas en el Apéndice 1.

A pesar de que el uso del registrador gráfico es recomendado en este manual, el proceso también puede ser exitoso sin él, especialmente en componentes simples o una vez que el operario ya se ha familiarizado con el método. Sin embargo, el registrador gráfico podría ser considerado esencial como ayuda en el adiestramiento del nuevo operario o cuando muchos operarios se encargan de una forma intermitente, no siendo ninguno de ellos experto.

Obviamente, cuando un lote de componentes idénticos sea tratado, las normas de la compañía deberían permitir que tan solo el primero del lote sea registrado gráficamente con los datos empleados, para asegurar que el resto son tratados correctamente.

Fig. 11.4 muestra los controles del registrador que consideramos standard. A todas las unidades VCM905 se les puede conectar un registrador compatible. Si Ud. está planeando conectar uno por su cuenta, por favor chequee primeramente con nosotros la compatibilidad de la impedancia.



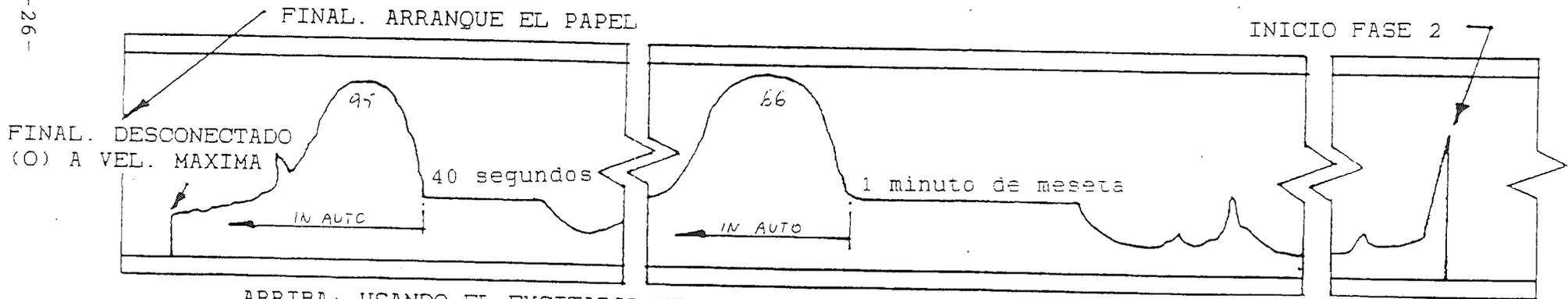


ARRIBA: USANDO EL EXCITADOR HT220 PARA EFECTUAR UNA EXPLORACION INICIAL

Lo típico es que la primera resonancia sea de modo torsional, ej.  $T_1 = 66$  Hz, la segunda de pando, ej.  $B_1 = 95$  Hz, la tercera torsional, ej.  $T_2 = 140$  Hz etc. Las normas de la compañía suelen establecer el tratamiento de entre 2 y 4 picos.

NOTA: Si tan solo se dispone de un vibrador, las fases 1 y 2 serán llevadas a cabo con el mismo.

-26-



ARRIBA: USANDO EL EXCITADOR HT110 PARA EFECTUAR EL PICO/VALLE

NOTA: Si las normas de la compañía establecen que todos los picos han de ser tratados, entonces debería haber sido dejado el vibrador HT220, pasado a manual a 110 HZ y ejecutado el ciclo pico/meseta, seguido por el HT110 (como se muestra arriba).

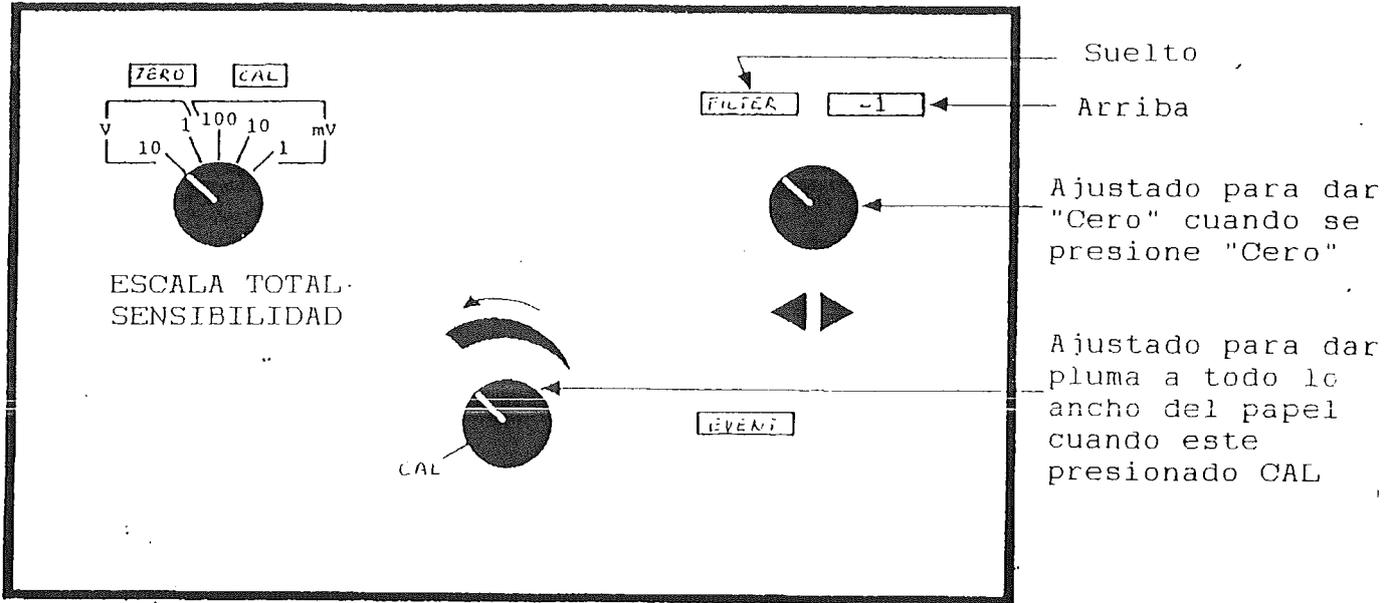
NOTA 1: Debido al gran incremento de fuerza del vibrador HT110 con respecto al HT220, pueden aparecer picos en esta región que no fueron detectados en la 1ª fase de exploración. En este caso manténgase en meseta y trátelos como al resto de los picos.

REGISTRADORES GRAFICOS

El registrador gráfico incluye "Instrucciones de Uso" en forma de manual del fabricante. Sin embargo, las siguientes notas podrían ser de utilidad.

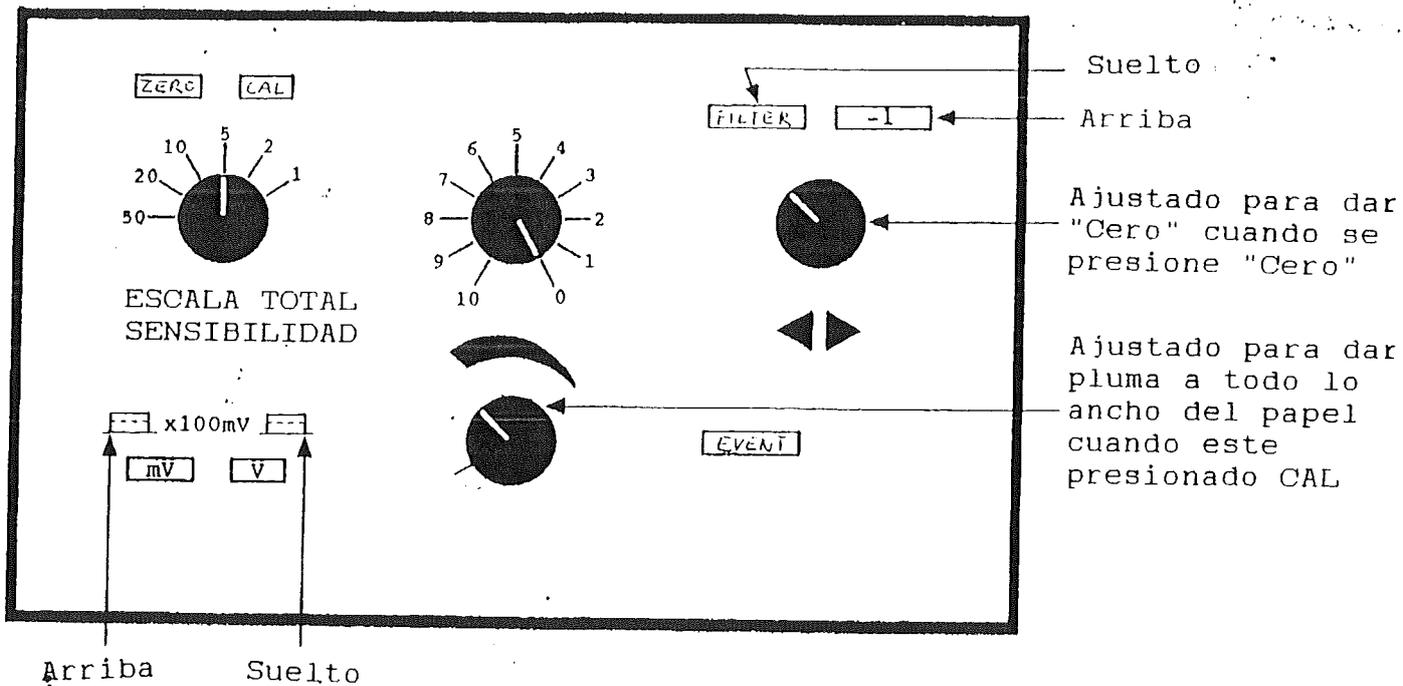
J.J. Impresora Lloyd, Gráfico 1000/1002 & 450 Modelos

Típicas condiciones de puesta en marcha inicial:



J.J. Impresora Lloyd, Gráfico 2000/2002 Modelos

Típicas condiciones de puesta en marcha inicial:



OPERACION DE ESTABILIZADO V.S.R CON EL EQUIPO VOM905

Aproximación básica: lea en conjunto con 12.1

1. Efectue las soldaduras necesarias SIN conectar el excitador.
  2. Coloque y asegure el excitador de mayor velocidad / menor fuerza HT220 (ver pág. 17).
  3. Posicionar el acelerómetro (ver pág. 24).
  4. Si es posible, espolvorear sobre la pieza polvo de chorro de arena o similar.
  5. Utilize un enchufe protegido RCD de 30mA. Conectar cables y soltar (G). Poner interruptor (U) en CONT.
  6. Conectar y enchufar el registrador. Si no se van a utilizar, elevar las plumas y ponerles sus tapas, puesto que se secan si se dejan en contacto con el papel.
  7. Mantener el control auto/manual (J) a tope a la izquierda, se ilumina (R) "velocidad mínima". NOTA: La lectura mínima en la esfera es de 1, no de 0. No forzar la esfera. Las posiciones 1-11 en la esfera representan aprox. 5-55 Hz utilizando HT55, 10-110 Hz con HT110 y de 20-220 Hz con el excitador HT220.
  8. Situar inicialmente el control de aproximación a "-en 5". Colocar el botón (D) para que la lectura sea de "g" en vez de Hz.
  9. Con la luz (R) iluminada, apretar el botón AUTO (I) - comienza la subida automática.
- NOTA: NO VOLVER A PONER EL EQUIPO EN MARCHA HASTA PASADO UN MINUTO
10. Cuando la aguja del contador de resonancias alcanza el punto máximo en la escala, cambiar el control (F) a la posición media o "x5" con el fin de mantener la lectura dentro de la escala.
  11. Marcar las frecuencias de resonancia y figuras de modo en el componente durante la búsqueda automática.
  12. Continúe en auto hasta que la luz (K) se ilumine (o siga las normas de su compañía).
  13. Coloque el mando (J) al mínimo. Apretar botones (O) y (S), levantar las plumas.
  14. Corrija las posiciones de los soportes, y cambie al excitador de mayor fuerza / menor velocidad - coloque el HT110.
  15. Apretar el botón (H) e incrementar manualmente la velocidad utilizando el mando (J) hasta llegar al inicio de la primera resonancia (ej. T1= 66Hz Fig. 11.1).
  16. Seleccionar el tiempo de mantenimiento en meseta apropiado para la frecuencia (fig. 12.3) y apretar (B).
  17. Al finalizar este tiempo, la velocidad del excitador volverá a continuar incrementándose.
  18. Cuando se halle encima del pico, apretar el botón (P) para volver a tener el control manual.
  19. Incremente la velocidad manualmente utilizando el mando (J) hasta alcanzar el inicio del siguiente pico y repetir los pasos 16-18, para 2 - 4 picos. Al tratar el último pico, se puede posicionar el modo P.B. (U) para finalizar, el cual apagará la unidad una vez finalizado el tiempo elegido.
  20. Colocar el mando (J) en cero y apagar (O), levantar plumas y taparlas.
  21. Anotar en el gráfico el N° de trabajo, fecha, etc, siguiendo las normas de la compañía.

NOTA: Estas instrucciones son solamente una guía general, pudiendo ser supeditadas por las normas de cada compañía. Por favor, lea las notas en la fig. 11.1.

Chequee periódicamente la sujeción de las sargentas. Nadie debería colocarse próximo a ellas cuando el equipo este funcionando. Para la operación manual utilice el mando (J) y proceda tal y como se detalla arriba.

## ATENCIÓN

### INSTRUCCIONES DE CONEXION

La consola VCM905 debería ser conectada a un enchufe en la pared RCD. Debido a una sobrecarga en la capacidad de la consola, esta podría fallar una o dos veces estando el aparato encendido. Después de volver a encenderla, si el RCD continúa fallando es que existe un fallo. Consulte a un buen electricista antes de continuar con el proceso. Si aún así continúa fallando, no intente manipular la consola. Informe del asunto a la compañía VSR.

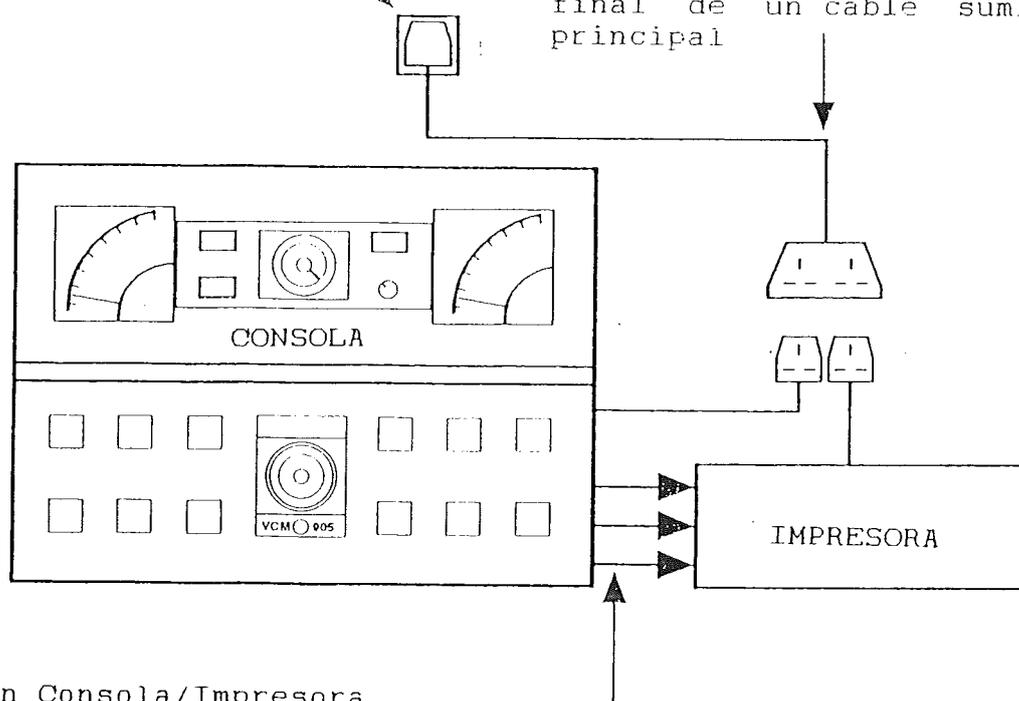
Fax: 07 - 44 1905 754590 ó Tfno: 07 - 44 1905 452800

NOTA: El suministro principal ha de ser entre 220/240 V, 1 fase, 50/60 Hz.

Fig. 11.3

Su enchufe de pared  
Tipo RCD de 30mA

NO quite los enchufes de clavija  
Acople el enchufe conector  
suministrado con la consola al  
final de un cable suministrador  
principal



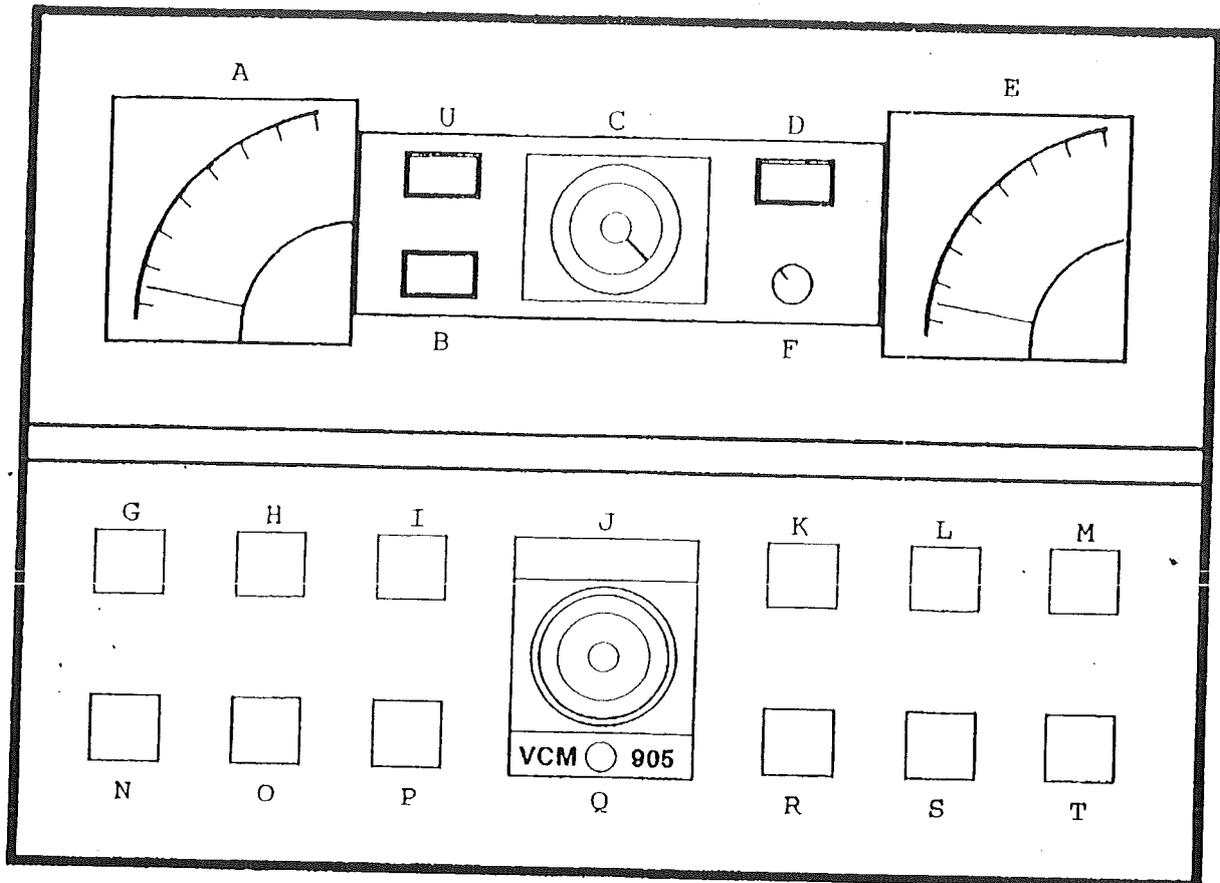
#### Conexión Consola/Impresora

Antes del encendido conecte:

- a la consola: Enchufe de clavija grande al enchufe "Señal Impresora"  
Enchufe de clavija pequeño al enchufe "Encendido Impresora"
- a la impresora: Enchufe de clavija rojo al enchufe rojo "+"  
Enchufe de clavija negro al enchufe negro "-"  
Enchufe de clavija pequeño al enchufe "eleva plumas"

Fig. 12.1

FISONOMIA DE LA CONSOLA VCM905



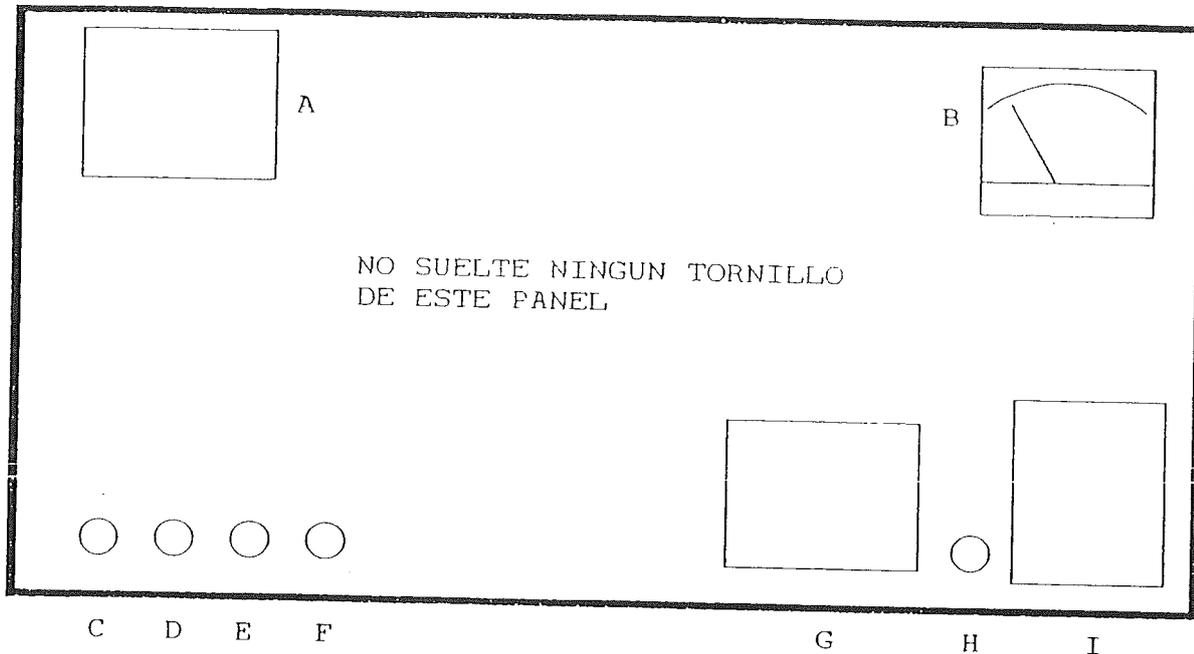
- |                                     |                              |
|-------------------------------------|------------------------------|
| A. Amperímetro                      | L. Luz Amplificador resonan. |
| B. Temporizador de inicio de tiempo | M. Luz de caída motor        |
| C. Selector de tiempo               | N. Desconectado              |
| D. Selector de frecuencia ó de "g"  | O. Parada                    |
| E. Contador de frecuencia y de "g"  | P. Cambio a manual           |
| F. Selector de aprox. señal reson.  | Q. Botón subida de fuerza    |
| G. Marcha                           | R. Luz de velocidad mínima   |
| H. Inicio manual                    | S. Interruptor Amplif. reso. |
| I. Inicio automático                | T. Parada de emergencia      |
| J. Potenciómetro auto/manual        | U. Selector de modo          |
| K. Luz de velocidad máxima          |                              |

NOTA:

1. Suministro de 240V - utilice enchufes protegidos RCD
2. Solamente está permitido a personal eléctrico cualificado quitar las cubiertas. Abrir la consola sólo cuando la unidad lleve un mínimo de 5 minutos desconectada de la red principal - peligro de descarga de 700 VOLT
3. Si se pierde algún tornillo de las cubiertas, comuníquelo inmediatamente al supervisor.

Fig. 12.2

PANEL POSTERIOR DE LA CONSOLA VCM905



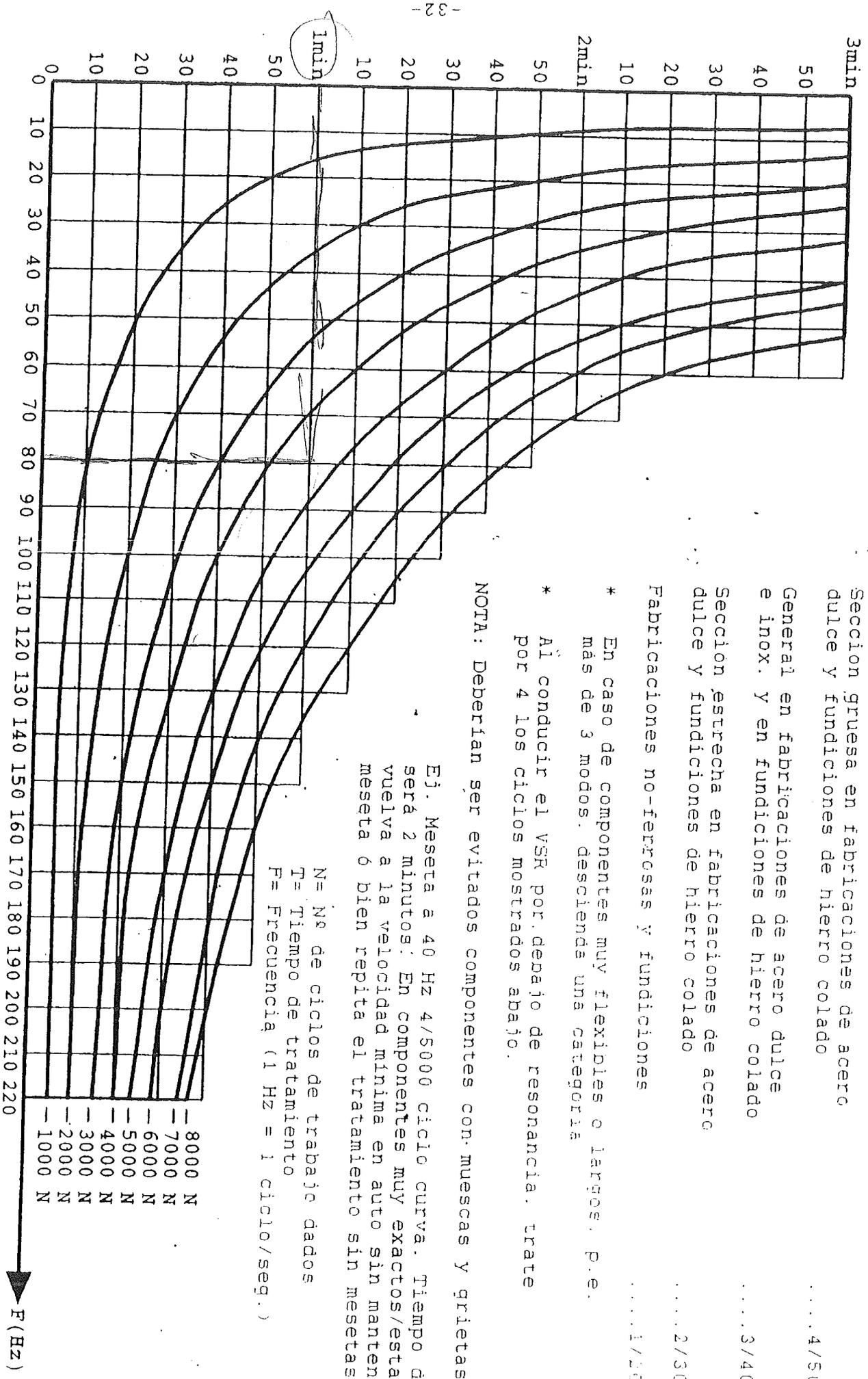
CLAVES:

- A. Datos de identificación
- B. Voltímetro de entrada principal (220/240 v)
- C. Encendido Impresora
- D. Señal Impresora
- E. Acelerómetro (entrada de señal)
- F. Interruptor para el medidor de Hz/g
- G. Placa de recomendaciones
- H. Cable de entrada principal
- I. Enchufe del excitador

NOTA:

1. Suministro de 240V - utilice enchufes protegidos RCD
2. Solamente está permitido a personal eléctrico calificado quitar las cubiertas. Abrir la consola sólo cuando la unidad lleve un mínimo de 5 minutos desconectada de la red principal - peligro de descarga de 700 VOLT
3. Si se pierde algún tornillo de las cubiertas, comuníquelo inmediatamente al supervisor.

Fig. 12.3: CICLOS DE TRABAJO / CURVAS DE TIEMPO DE ... ANENCIA EN MESAETA



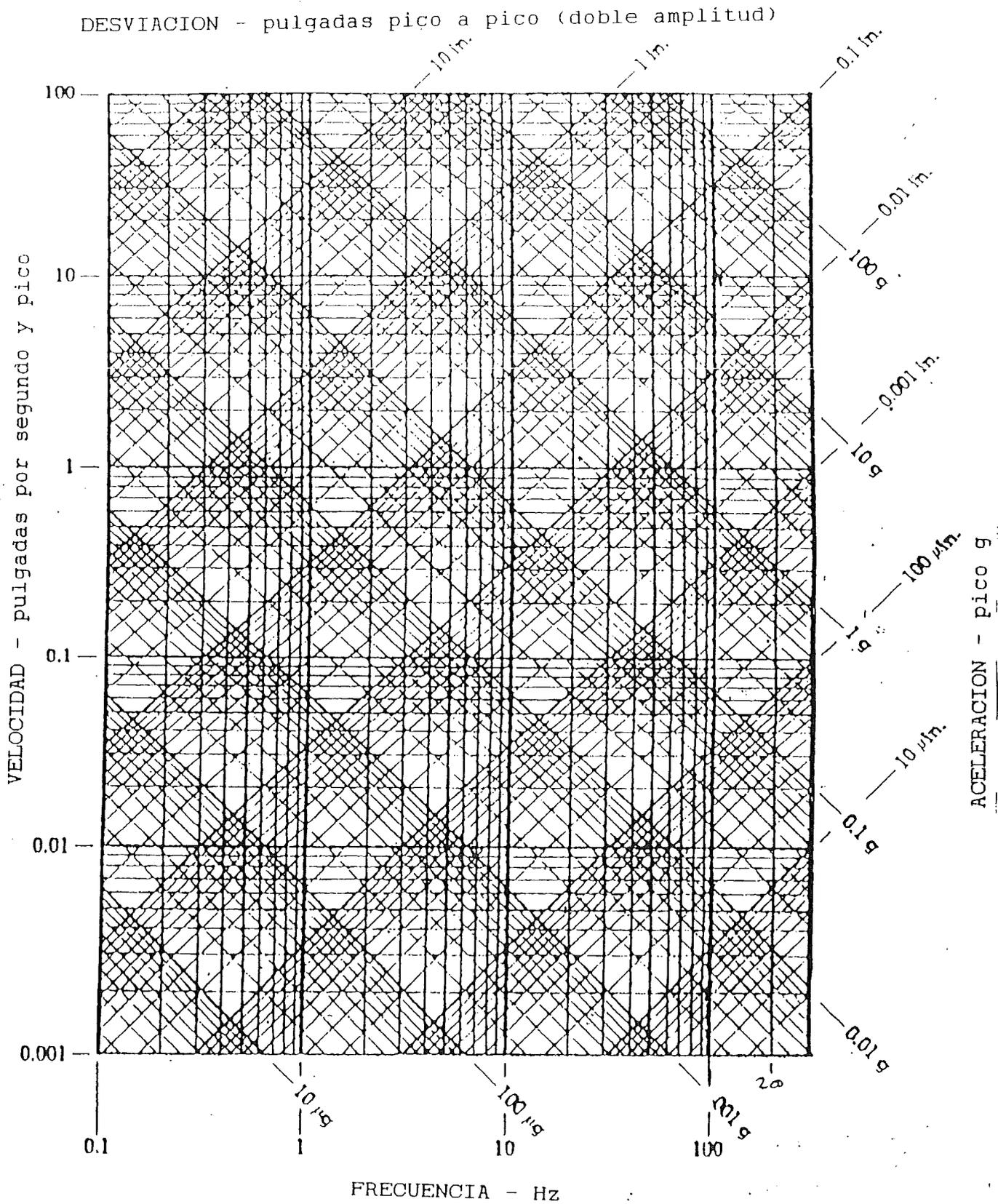
- Sección gruesa en fabricaciones de acero dulce y fundiciones de hierro colado ..... 4/5000
- General en fabricaciones de acero dulce e inox. y en fundiciones de hierro colado ..... 3/4000
- Sección estrecha en fabricaciones de acero dulce y fundiciones de hierro colado ..... 2/3000
- Fabricaciones no-ferrosas y fundiciones ..... 1/2000
- \* En caso de componentes muy flexibles o largos. P.e. más de 3 modos. descienda una categoría
- \* Al conducir el VSR por debajo de resonancia. trate por 4 los ciclos mostrados abajo.

NOTA: Deberían ser evitados componentes con muescas y grietas

Ej. Meseta a 40 Hz 4/5000 ciclo curva. Tiempo de meseta será 2 minutos: En componentes muy exactos/estables, vuelva a la velocidad mínima en auto sin mantenerse en meseta ó bien repita el tratamiento sin mesetas.

Fig. 12.4

Nomógramo fuerza "g"



## TRATAMIENTO EN LA MESA DE VIBRACION

Aplicar a los componentes montados en la mesa de vibración las mismas consideraciones generales que a los otros.

La misma mesa necesita un diseño específico y el método y la posición de la sujeción del componente son de suma importancia. La mayoría de los componentes son sujetados en una pequeña área de contacto con un bloque espaciador (típicamente de 25x25x12 para pequeños componentes y 50x50x12 para piezas más grandes). La posición óptima para este bloque es en línea con el centro de gravedad del componente. Este procedimiento permite que el componente sea excitado hasta la respuesta resonante inducida por una superficie individual, manteniendo la deflexión estática en el mínimo. Si la pieza es alargada, sujetarla a un nodo y apoyar los otros nodos sobre soportes de goma o aislantes similares. En el caso de que fueran permitidas dos o más superficies para la vibración, ondas entrecrocándose podrían originar problemas. Además, con tan sólo un punto de amarre, el componente está libre para relajarse tal y como requiere la descarga de tensiones. No sujete nunca a través de una sección hueca; esto imposibilitaría el movimiento y causaría más tensiones. Algunas piezas flexibles han de ser sujetadas con el extremo de la mesa en el plano vertical para prevenir pandeos.

Varias unidades pueden ser tratadas simultáneamente si se emplea una mesa rematada rigidamente para tratar un lote de componentes idénticos. Asegúrese de que el posicionamiento de cada uno sea lo más idéntico posible al de los demás, y utilice una llave inglesa para sujetar las mordazas. Sin embargo, tan sólo el trazado de un componente es posible utilizando este método.

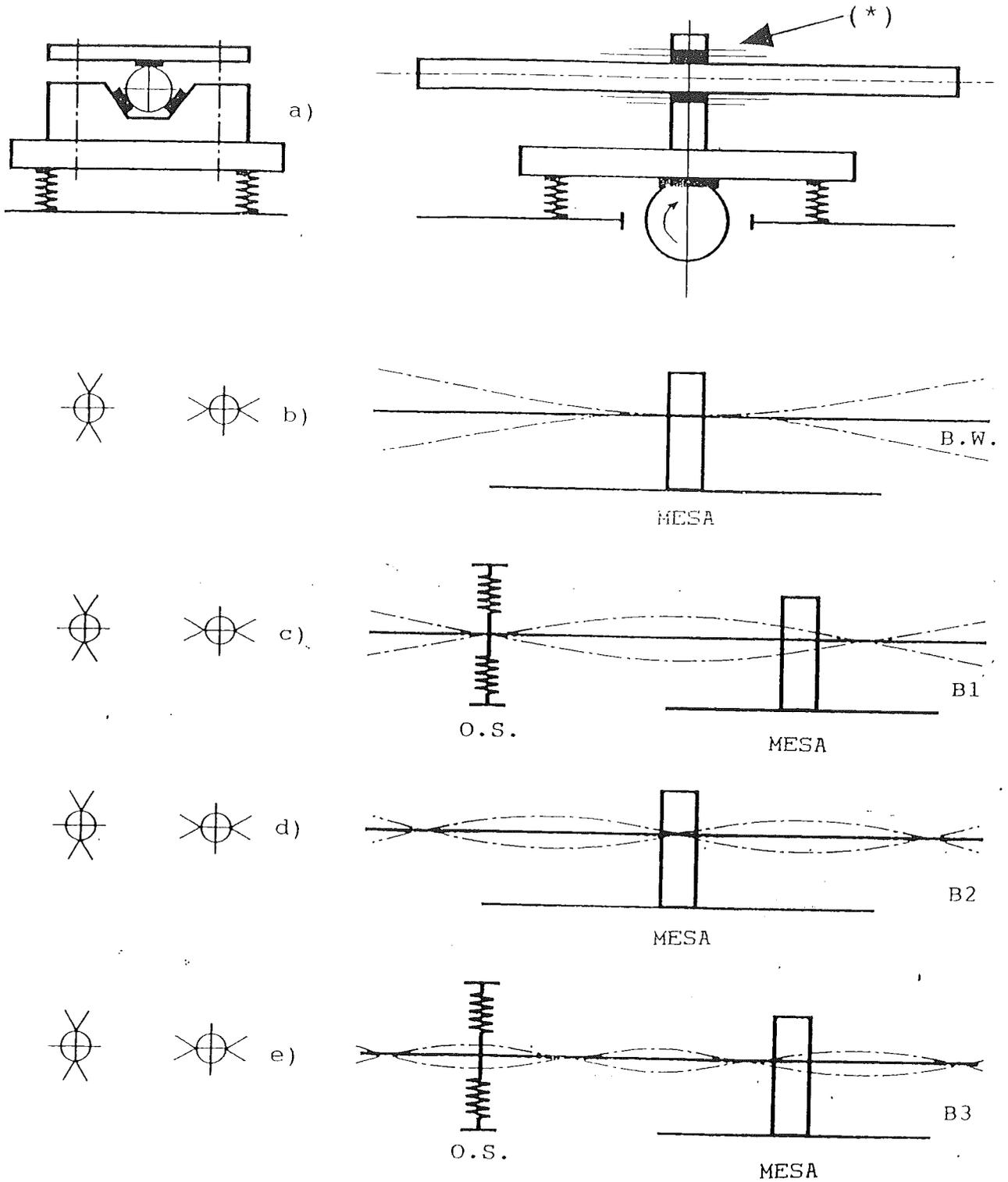
Calcule todo mucho más robustamente que lo habitual, p.e. pernos y tuercas de 20 - 25mm de diámetro, mordazas de 50mm de espesor y 50mm de anchura. Emplee discos de cuero o goma esféricos lubricados bajo las tuercas para reducir el esfuerzo y fatiga de las mismas. Sea consciente de que las tuercas se pueden romper durante el apretado y tome las precauciones oportunas.

Una mesa vibratoria debería ser de poca masa y muy rígida, de construcción soldada en acero rápido. Las soldaduras deberían ser de buena calidad, teniendo en cuenta la dura tarea de la mesa. Debería tener una respuesta resonante entre 0 y 200 Hz y esto debería ser señalado en la mesa (ver fig. 13.5 apéndice 11). Los soportes para la mesa pueden ser tanto muelles de compresión encajonados en goma situados sobre tacos de acero, muelles de caucho huecos o similar. Nosotros podemos tanto suministrar la mesa completa como informar de donde se pueden obtener los materiales.

NOTA: PERMITA QUE UN INGENIERO CHEQUEE REGULARMENTE EL EQUIPO. SEA CONSCIENTE DEL PELIGRO QUE SUPONDRIA QUE UNA MORDAZA O TUERCA SE ROMPIERA

Fig. 13.1

MESA DE VIBRACION - Modos en un eje o barra



- ) Componente sobre bloque en forma de "v"
- ) Movimiento "alas de pájaro" (B.W)
- ) 1er movimiento de pandeo (B1)
- ) 2º movimiento de pandeo (B2)
- ) 3er movimiento de pandeo (B3)

O.S. - Soporte auxiliar aislado  
 - Dirección de la vibración

 - Recubrimiento blando de las cuñas en forma de "v"

\* ) NOTA: Gradue siempre la unión de rigidez/flexibilidad tal y como se muestra en (a)

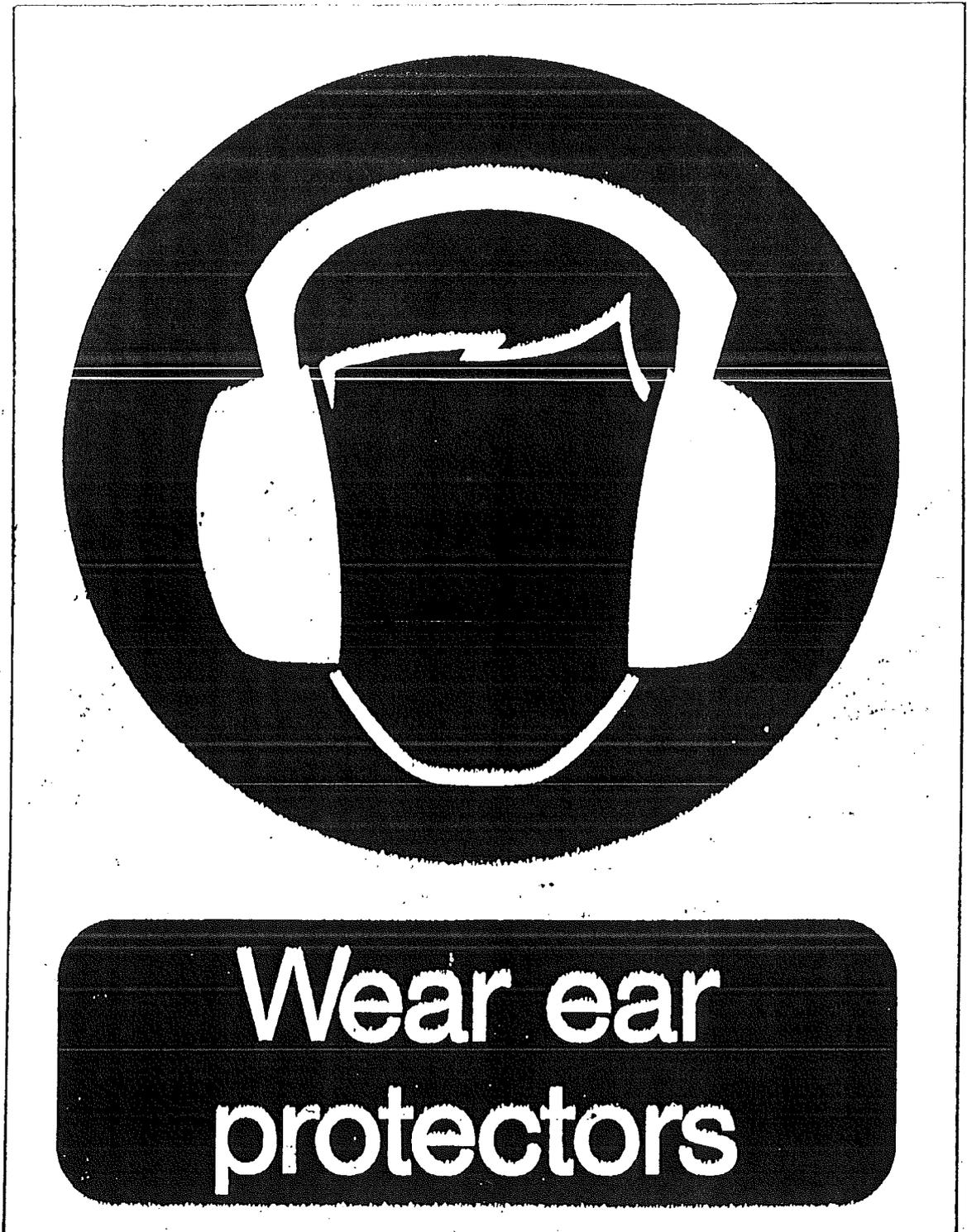
## BIBLIOGRAFIA

Ya que existen en el mercado tantos libros de texto elementales acerca de la vibración, lo mejor para el lector es seleccionar su propio nivel de interés y de comprensión. No existe ningún libro acerca del VSR (reducción de tensiones mediante vibración), y los informes de investigaciones disponibles confunden más que clarifican: algunos han sido muy relevantes, otros no (Ref. 9-fué específicamente elaborado para solucionar esta situación).

1. KAZIMIROV A.A. et al Automatic Welding, 27(7), 1974, 35-40.
2. CLAXTON R.A "Vibrations give relief in times of strees"  
"Vibraciones consiguen reducción de tensiones"  
Metalworking Production, 120(5), 1976, 89-92,150
3. CLAXTON R.A. y SAUNDERS G.G. "Vibratory Stress Relief"  
"Reducción de tensiones mediante vibracion"  
Metallurgist and Materials Technologist, 8(12), 1976, 55-66.
- 4 STRACHAN R.W "Report on the efficiency of vibrational stress relief"- "Informe sobre la eficacia de la reducción de tensiones mediante vibración" General Dynamics (Electric Boat Div.n.) Report U413-68-059, Abril 1968
5. CLAXTON R.A. y SAUNDERS G.G. "VSR - A current state-of-the-art appraisal"  
"VSR-Estado actual de la valoración del método"  
Documento 29. Proceedings of the Welding Institute's International conference on "Residual Stress in Welded Constructions and their effects" -Procedimientos de la Conferencia Intl. del Instituto de Soldaduras sobre "Tensiones residuales en Construcciones Soldadas y sus efectos" Noyiembre 1977 London.
6. CLAXTON R.A. Proceedings of the Institute of Metallurgical Technicians Association Annual Conference - Procedimientos de la Conferencia Anual del Instituto de Técnicos Metalúrgicos - Verano 1979. Birmingham
- 7 DAWSON & MOFFAT "Vibratory stress relief- A fundamental study of its effectiveness" "VSR - Estudio básico de su efectividad" Journal of Eng. Materials and Technology, Abril 1980, Vol. 102/169
8. JESENSKY M "Vibratory lowering of residual stresses in weldments"  
"Reducción por vibración de tensiones residuales en soldaduras" Proceedings of the Intl. Conference; Sofia, Bulgaria 1987 for the Intl. Inst. of Welding
9. CLAXTON R.A. "Vibratory Stress Relieving - an Effective Alternative to Thermal Treatment for Component Stabilisation?"  
"VSR - efectiva alternativa al tratamiento térmico para el estabilizado de componentes?" Parts 1 and 2. Heat Treatment of Metals 1991.2 p. 53-59 and 1991 p. 85-89
10. CLAXTON & LUPTON "Vibratory stress relieving of welded fabrications"  
"Reducción de tensiones en fabricaciones soldadas" - Welding & Metal Fabrication, December 1991

APENDICE I

EJEMPLOS DE MODELOS DE COMPONENTES/COMPANÍA



Procedimiento del proceso VSR: 920711173.2 Fabricaciones y fundiciones no-férricas

1. La reducción de tensiones por vibración (VSR) debería ser especificada por los delineantes o por un permiso escrito como conforme con los requerimientos BS5750.
2. VSR tiene ventajas e inconvenientes igual que el proceso térmico (TSR) y esto ha de ser tenido en cuenta al considerar la necesidad de reducir las tensiones. Existe literatura técnica disponible para ayudar al cliente en su elección. Línea de ayuda para el VSR Tfno +44 1905 452800 Fax +44 1905 754590
  - 2.1 VSR resulta apropiado en los casos en los que el único criterio para la reducción de tensiones es la estabilidad durante el mecanizado y servicio. Para una máxima estabilidad, la reaplicación antes del mecanizado final puede dar mejores resultados que el tratamiento térmico - especialmente después del fresado.
  - 2.2 VSR no modifica la condición metalúrgica de los componentes. Esto podría ser una ventaja o una desventaja, dependiendo de cada circunstancia. VSR no afecta adversamente a la rigidez del material - el método térmico sí.
3. El proceso VSR ha de ser entendido y empleado responsablemente:
  - 3.1 VSR es normalmente aplicado una vez, por ejemplo, antes o después del mecanizado vasto (en bruto).
  - 3.2 Para componentes de aluminio con secciones huecas (RHS) o fabricaciones con paredes estrechas, el excitador de 10-220 Hz (HT220) debería ser usado como mínimo por encima de la gama de frecuencia 10-150Hz, tratando en aproximadamente la base y el punto medio de la respuesta resonante por un período de 1 - 2 ciclos. El operario ha de tener cuidado de no romper el RHS con las sargentas. Debería ser usada en tubos de un diámetro superior a 50 mm una pieza de separación de aluminio para repartir la carga de la sargenta. También en todos los RHS y RSJ debería ser insertada una delgada pieza de aluminio entre la base del excitador y el componente, sobresaliendo 10 mm por debajo del pie del vibrador para aligerar la conexión de flexión y rigidez. Ej. 25x3x100 mm - 2 Unidades.
  - 3.3 Para fabricaciones y fundiciones con paredes gruesas, en principio se ha de usar el excitador HT 220 (10-220 Hz) por encima de la gama de frecuencia 10-150Hz. Debería ser excudriñado entre 10 y 110 Hz en auto sin mantenerse en meseta y entonces insistir tanto en la base como en el punto medio del flanco creciente para cada respuesta resonante subsecuente por un período de 2-3 ciclos. Una vez completada esta operación y retornada la velocidad al mínimo, cambiar al excitador HT110 (10-110Hz), ajuste la posición de los soportes, y examine como antes insistiendo en cada respuesta resonante durante 2-3 ciclos hasta que la velocidad máx. sea alcanzada. El proceso se habrá completado.

Si se dispone de un registrador gráfico o de una impresora, se ha de anotar manualmente en el gráfico el tipo de excitador, los tiempos de insistencia en meseta, encendido y apagado y cualquier anomalía.
  - 3.4 Pequeños componentes no flexibles que no entren en resonancia en la gama 0-220 Hz son tratados mediante VSR sub-resonante utilizando el excitador HT110, montado normalmente debajo de la mesa de vibración. El tratamiento se da durante 5-6 ciclos, cerca de la base y de nuevo tan alto como sea posible en el flanco de la primera resonancia.
4. Inspección. Se ha de obtener un certificado del test para cada operación que muestre el área donde se colocó el vibrador y las frecuencias, modos y tipo de equipo empleado.

Consideraciones adicionales:

Edición no. 940822

The Vibratory Strees Relieving Co., England

Procedimiento del proceso VSR: 920711143.2. Armaduras ferríticas y no-ferríticas

1. La reducción de tensiones por vibración (VSR) debería ser especificada por los delineantes o por un permiso escrito como conforme con los requerimientos BS5750.
2. VSR tiene ventajas e inconvenientes igual que el proceso térmico (TSR) y esto ha de ser tenido en cuenta al considerar la necesidad de reducir las tensiones. Existe literatura técnica disponible para ayudar al cliente en su elección. Línea de ayuda para el VSR Tfno +44 1905 452800 Fax +44 1905 754590
  - 2.1 VSR resulta apropiado en los casos en los que el único criterio para la reducción de tensiones es la estabilidad durante el mecanizado y servicio. Para una máxima y exacta estabilidad, la reaplicación antes del mecanizado final puede dar mejores resultados que el tratamiento térmico - reduciendo las tensiones del mecanizado.
  - 2.2 VSR no modifica la condición metalúrgica de los componentes. Esto podría ser una ventaja o una desventaja, dependiendo de cada circunstancia. VSR no afecta adversamente a la rigidez del material - el método térmico sí.

El proceso VSR ha de ser entendido y empleado responsablemente:

- 3.1 El excitador es montado sobre bases corredizas metálicas en el extremo de la armadura, con el componente apoyado sobre bloques de goma.
- 3.2 Para armaduras con paredes estrechas (menos de 50 mm), una pieza de aluminio de unos 3 mm debería ser insertada entre la base corrediza metálica y el componente, sobresaliendo 10 mm a cada lado de la base. Esto distribuye la presión de las sargentas y protege la superficie del componente.
- 3.3 En principio se ha de usar el excitador HT 220 (10-220 Hz), por encima de la gama de frecuencia 10-150Hz. Debería ser excudriñado entre 10 y 110 Hz en auto sin mantenerse en meseta y entonces insistir tanto en la base como en el punto medio del flanco creciente para cada respuesta resonante subsecuente por un periodo de 2-3 kciclos. Una vez completada esta operación y retornada la velocidad al mínimo, cambiar al excitador HT110 (10-110Hz), y examine como antes insistiendo en cada respuesta resonante durante 2-3 kciclos hasta que la velocidad máx. sea alcanzada. El proceso se habrá completado..

Si se dispone de un registrador gráfico o de una impresora, se ha de anotar manualmente en el gráfico el tipo de excitador, los tiempos de insistencia en meseta, encendido y apagado y cualquier anomalía.

- 3.4 El procedimiento explicado en el pto. 3.3 se ha de repetir con el excitador girado en 90°, p.ej., inicialmente N.S. (norte-sur) para 3.3 y despues E-W (este-oeste) para 3.4. Obviamente, si no hay modos a baja frecuencia no se emplea el excitador HT110.
4. Inspección. Se ha de obtener un certificado del test para cada operación que muestre el área donde se colocó el vibrador y las frecuencias, modos y tipo de equipo empleado.

Consideraciones adicionales:

Edición no. 940822

The Vibratory Strees Relieving Co., England

Procedimiento del proceso VSR: 920/111/3.2 - Fabricaciones y Fundiciones de Aluminio

1. La reducción de tensiones por vibración (VSR) debería ser especificada por los delineantes o por un permiso escrito como conforme con los requerimientos BS5750.
2. VSR tiene ventajas e inconvenientes igual que el proceso térmico (TSR) y esto ha de ser tenido en cuenta al considerar la necesidad de reducir las tensiones. Existe literatura técnica disponible para ayudar al cliente en su elección. Línea de ayuda para el VSR Tfno +44 1905 452800 Fax +44 1905 754590

2.1 VSR resulta apropiado en los casos en los que el único criterio para la reducción de tensiones es la estabilidad durante el mecanizado y servicio. Para una máxima y exacta estabilidad, la reaplicación antes del mecanizado final puede dar mejores resultados que el tratamiento térmico - reduciendo las tensiones del mecanizado, especialmente despues del fresado.

2.2 VSR no modifica la condición metalúrgica de los componentes. Esto podría ser una ventaja o una desventaja, dependiendo de cada circunstancia. VSR no afecta adversamente a la rigidez del material - el método térmico si.

El proceso VSR ha de ser entendido y empleado responsablemente:

3.1 VSR es normalmente aplicado una vez, por ejemplo. antes o despues del mecanizado basto.

3.2 Para componentes de aluminio con secciones huecas (RHS) o fabricaciones con paredes estrechas, el excitador de 10-220 HZ (HT220) debería ser usado como mínimo por encima de la gama de frecuencia 10-150Hz, tratando en aproximadamente la base y el punto medio de la respuesta resonante por un periodo de 1 kciclo. El operario ha de tener cuidado de no romper el RHS con las sargentas. Debería ser usada en tubos de un diámetro superior a 50 mm una pieza de separación de aluminio para repartir la carga de la sargenta. También en todos los RHS y RSJ debería ser insertada una delgada pieza de aluminio entre la base del excitador y el componente, sobresaliendo 10 mm por debajo del pie del vibrador para aligerar la conexión de flexión y rigidez: Ej. 25x3x100 mm - 2 unidades.

3.3 En fabricaciones y fundiciones con paredes anchas se ha de usar inicialmente el excitador HT 220 (10-220 Hz), por encima de la gama de frecuencia 10-150Hz. Debería ser excudriñado entre 10 y 110 Hz en auto sin mantenerse en meseta y entonces insistir tanto en la base como en el punto medio del flanco creciente para cada respuesta resonante subsecuente por un periodo de 1 kciclo. Una vez completada esta operación y retornada la velocidad al mínimo, ajustar la posición de los soportes y cambiar al excitador HT110. (10-110Hz), y examine como antes insistiendo en cada respuesta resonante durante 1 kciclo hasta que la velocidad máx. sea alcanzada. El proceso se habrá completado.

Si se dispone de un registrador gráfico o de una impresora, se ha de anotar manualmente en el gráfico el tipo de excitador, los tiempos de insistencia en meseta. encendido y apagado y cualquier anomalía.

4. Inspección. Se ha de obtener un certificado del test para cada operación que muestre el área donde se colocó el vibrador y las frecuencias, modos y tipo de equipo empleado.

Consideraciones adicionales:

Edición no. 940822

The Vibratory Strees Relieving Co., England

APENDICE II  
ACOPLIAMIENTOS



**Wear ear  
protectors**

## AFENDICE 11

### Acoplamientos - Medidas de seguridad

Cuando se lleven a cabo los acoplamientos utilice piezas de adecuadas proporciones donde sea posible - por ejemplo, sargentas y tornillos fraguados standard, en lugar de piezas provisionales de acero rápido.

Emplee pernos de alta calidad y tuercas giratorias con superficies templadas para evitar que se traben los atornillados y se desalineen.

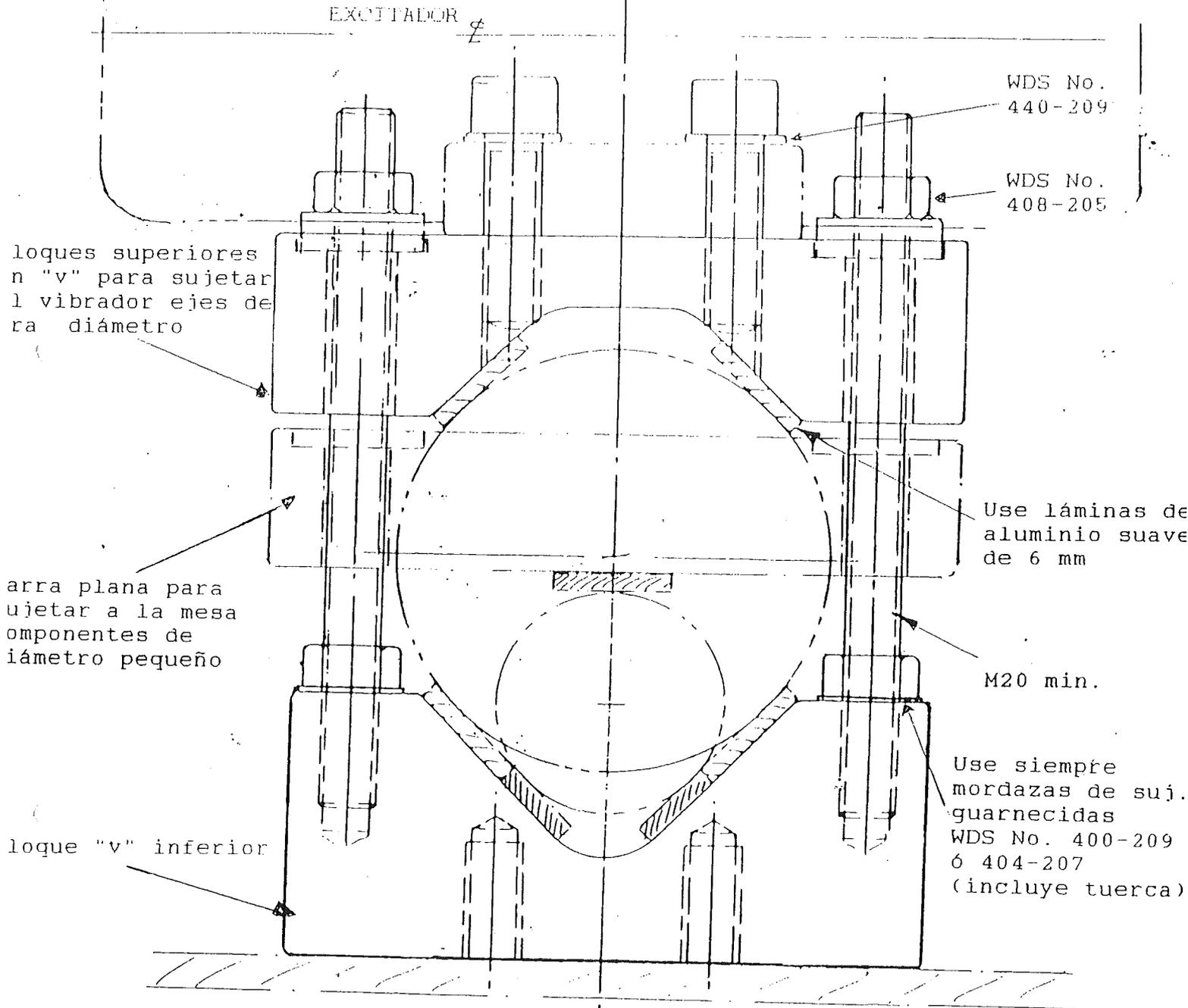
Nunca se apoye sobre el conjunto perno tuerca durante el apretado, y limite siempre el impulso rotativo aplicado a los niveles recomendados.

Tenga en cuenta que acoplamientos empleados con regularidad se deteriorarán con el uso - chequéelos periódicamente y reemplace las partes estropeadas, particularmente los tornillos, para prevenir fallos durante el servicio.

Tenga en cuenta que las sargentas, vibradores y los bloques en "v" son pesados y podrían dañar miembros si se desprendieran ó se manipularan incorrectamente. Asegúrese que las superficies a tratar estén limpias y no resbalen.

ESCALA DEL PLANO: 2 : 1

Mirar pág. siguiente  
para nrs. Wixroyd

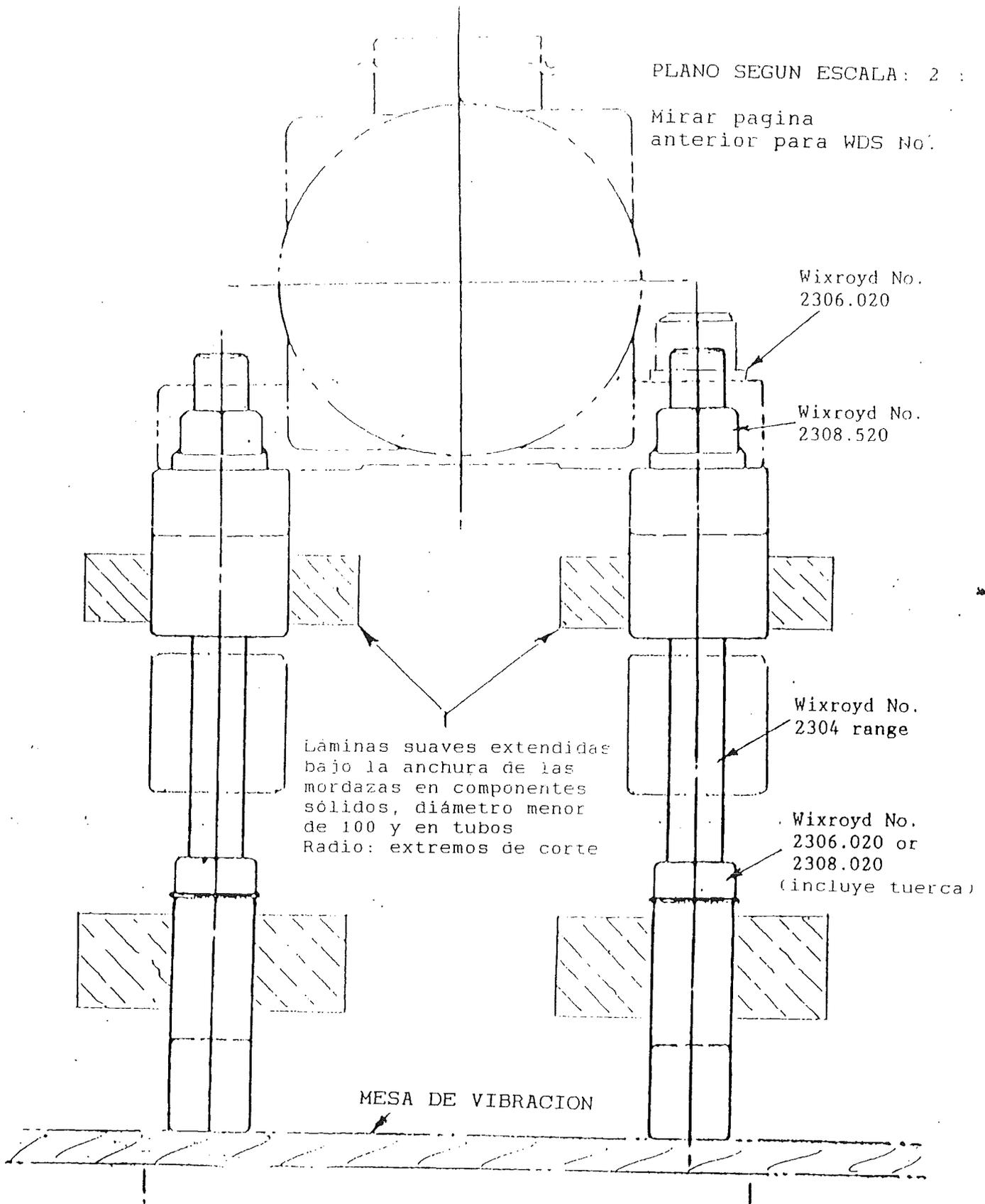


Acoplamiento de bloques en "v" para montar debajo del excitador grandes ejes, o encima de la mesa para pequeños ejes

Compruebe que los pernos y tuercas han sido apretados lo máximo permisible. En caso contrario podría originarse mucho ruido y daños al componente.

PLANO SEGUN ESCALA: 2 : 1

Mirar pagina anterior para WDS No.



Cuando se traten pesos ligeros ó pequeños diámetros, bloques en "v" rebajados deberían ser atornillados a la mesa de vibración

Contactos: WDS Tooling Aids, Leeds, UK. Tel: 01132 581333  
Fax: 01132 590649

Halder (Wixroyd) Germany. Tel: (07392) 7009-0  
Fax: (07392) 7009-60

AFENDICE III

NOTAS DE MANTENIMIENTO



**Wear ear  
protectors**

## AFENDICE III

### LISTA PARA CHEQUEAR FALLOS EXTERNOS

Consola (ver fig. 1.1 a 1.3)

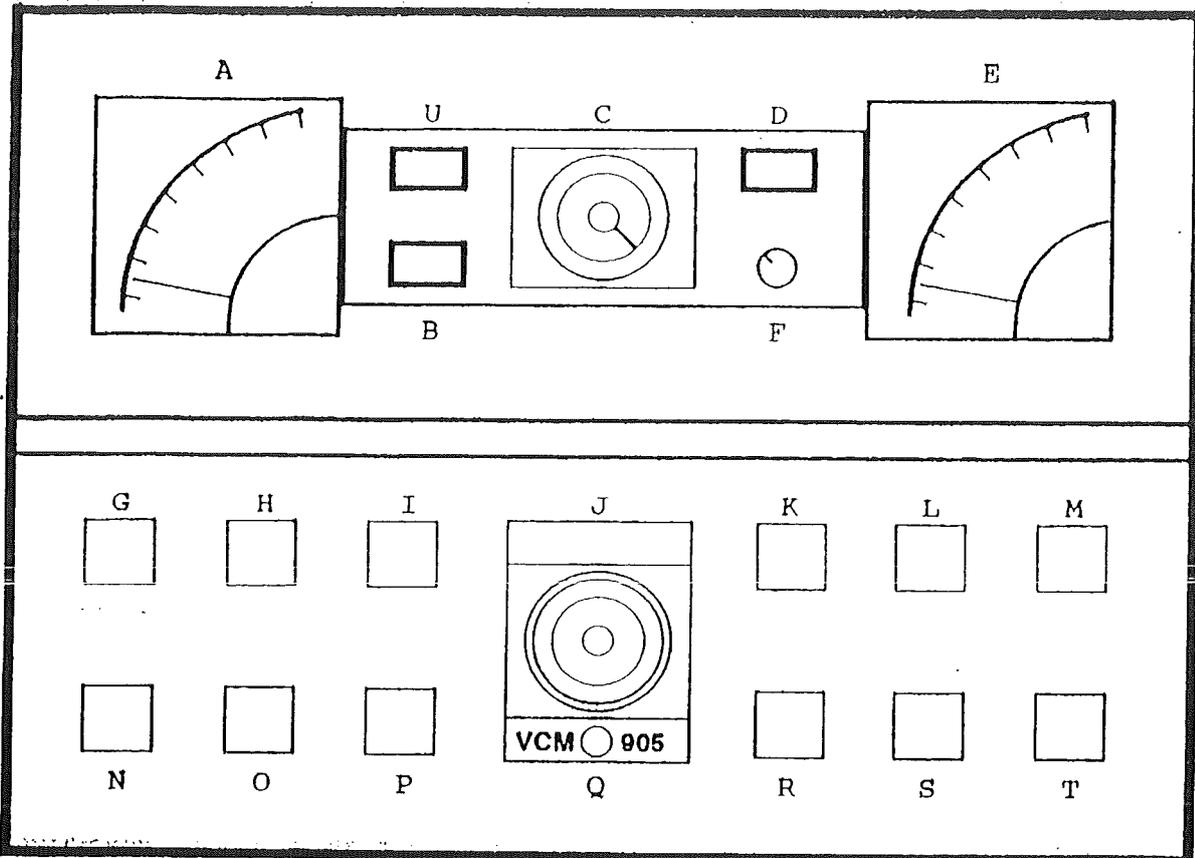
- A. Compruebe que el voltaje se corresponde con el establecido para la máquina en el certificado de prueba. Proceda a enchufar. (Nota - ha de usarse un enchufe RCD). Compruebe que el paro de emergencia no este bloqueado. Enchufe "G".
- B. El potenciómetro (J) auto/manual debería ser girado completamente a la izquierda (en sentido contrario a las agujas del reloj), la luz azul (R) se ha de iluminar (impulso cargado)
- C. El enchufe del excitador debería estar totalmente encajado.
- D. Presione los botones (H) ó (I). La máquina debería arrancar.

- 
1. Si la luz (G) brilla obscuramente, examine el procedimiento de arranque. Si el excitador no arranca estando los botones manual o auto (H) o (I) apretados y la luz de "caída del motor" está iluminada, entonces la causa podría ser una línea de voltaje reducida. Chequee el voltímetro (A) situado en el panel trasero. Si el voltaje es pobre, realice lo siguiente:
    - a) Chequee el voltaje en el enchufe de la pared. Debería ser de 220/240V (ó 110V si su unidad dispone de un transformador externo en la entrada).
    - b) Si el enchufe de la pared presenta el voltaje correcto, compruebe que todos los enchufes y clavijas estén correctamente y firmemente conectados.
    - c) Limpie las clavijas y los enchufes con un material ligeramente abrasivo, "Emery cloth" o similar, con todos los surtidores principales desconectados.
    - d) Compruebe que todos los cables interiores de los enchufes estén bien terminados y con todo el conjunto de alambres. Chequee fusibles y el apretado de los tornillos.

2. Si aun y todo no se iluminan las luces del panel estando enchufada la corriente, chequee los fusibles de control y posibles bombillas defectuosas en el interior de la consola. Esto requerira un electricista cualificado.
3. Si cuando el botón (G) está apretado y brilla pero en lugar del aporreo normal del contacto principal hay un silencio o un zumbido que cesa cuando se suelta el botón, vuelva a chequear como en el punto (1).
4. Si despues de funcionar a un amperaje alto, aproximadamente 6 amperios ó más, la máquina se para ó falla al reencherarla, espere durante 2 minutos, presione conectar (N) y vuelva a intentar.
5. Si, al comunicar energía, el motor se acelera hasta la velocidad máxima, compruebe el funcionamiento del boton subida de fuerza (Q). Podría estar atascado.
6. Si el amperimetro (A) registra cero ó excesiva corriente a lo largo de toda la gama de velocidades ó el motor no arranca en la posición mínima (emitiendo sólo un ligero ruido), entonces es posible que un cable en el enchufe del motor se haya pelado - soltado ó que el motor esté "single-phasing". En este caso, contacté con un electricista cualificado para que compruebe los recovecos del motor. Un chequeo simple con la corriente off y el motor desconectado usando un "avómetro" ó un comprobador de circuitos seria para ver si las tres clavijas fase del enchufe del motor no muestran continuidad con la clavija tierra. La clavija tierra es ligeramente más grande en diametro que las otras tres. Y estas tres deberían mostrar continuidad.
7. Hay una bandeja para el polvo en la parte superior de la consola colocada junto a la parte inferior del respiradero. Una vez al año separe este ensamblaje para limpiarlo, asegurándose de mantenerlo horizontal y de volver a colocarlo tal y como estaba.
8. Si la unidad no se mantiene en auto estando el botón (I) presionado, es porque el conmutador de modo (U) está en la "posición regulada" en lugar de estar en la "posición máxima".

TAN SOLO UN BUEN ELECTRICISTA DEBERIA TENER ACCESO AL INTERIOR DE ESTE EQUIPO. ALGUNAS UNIDADES LLEVAN UNA CARGA RESIDUAL DE MAS DE 700V DURANTE MAS DE 5 MINUTOS DESPUES DE LA DESCONEXION.

## Ergonomía DE LA CONSOLA VCM905



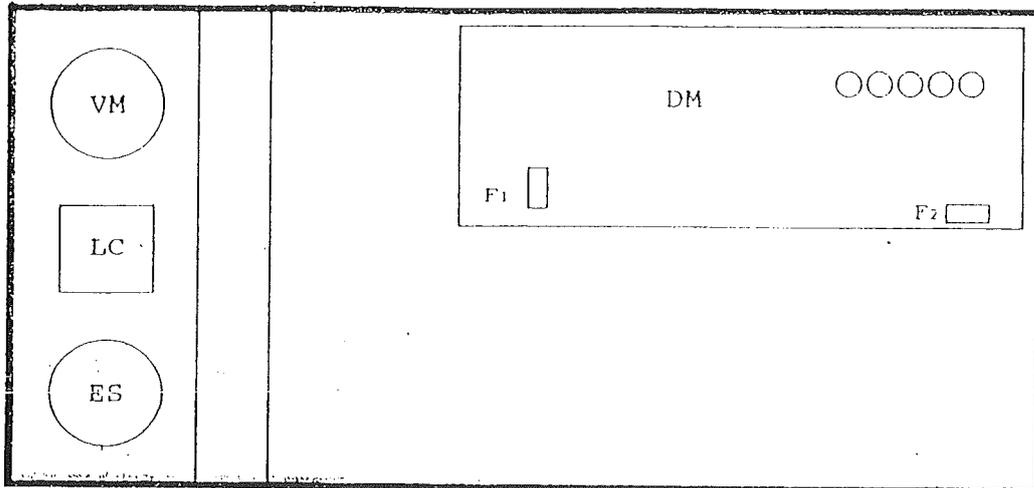
- |                                     |                              |
|-------------------------------------|------------------------------|
| A. Amperímetro                      | L. Luz Amplificador resonan. |
| B. Temporizador de inicio de tiempo | M. Luz de caída motor        |
| C. Selector de tiempo               | N. Desconectado              |
| D. Selector de frecuencia ó de "g"  | O. Parada                    |
| E. Contador de frecuencia y de "g"  | P. Cambio a manual           |
| F. Selector de aprox. señal reson.  | Q. Botón subida de fuerza    |
| G. Marcha                           | R. Luz de velocidad mínima   |
| H. Inicio manual                    | S. Interruptor Amplif. reso. |
| I. Inicio automático                | T. Parada de emergencia      |
| J. Potenciómetro auto/manual        | U. Selector de modo          |
| K. Luz de velocidad máxima          |                              |

## NOTA:

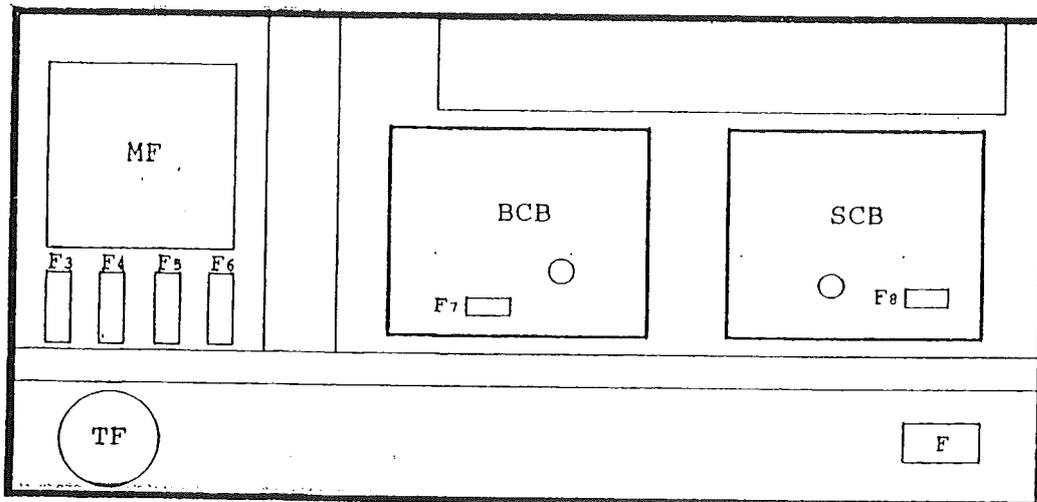
1. Suministro de 240V - utilice enchufes protegidos RCD
2. Solamente está permitido a personal eléctrico cualificado quitar las cubiertas. Abrir la consola sólo cuando la unidad lleve un mínimo de 5 minutos desconectada de la red principal - peligro de descarga de 700 VOLT
3. Si se pierde algún tornillo de las cubiertas, comuníquelo inmediatamente al supervisor.

Fig. 1.2

IDENTIFICACION DE COMPONENTES INTERNOS DE LA CONSOLA Y VALORES DE LOS FUSIBLES



PLACA TRASERA



PLACA BASE

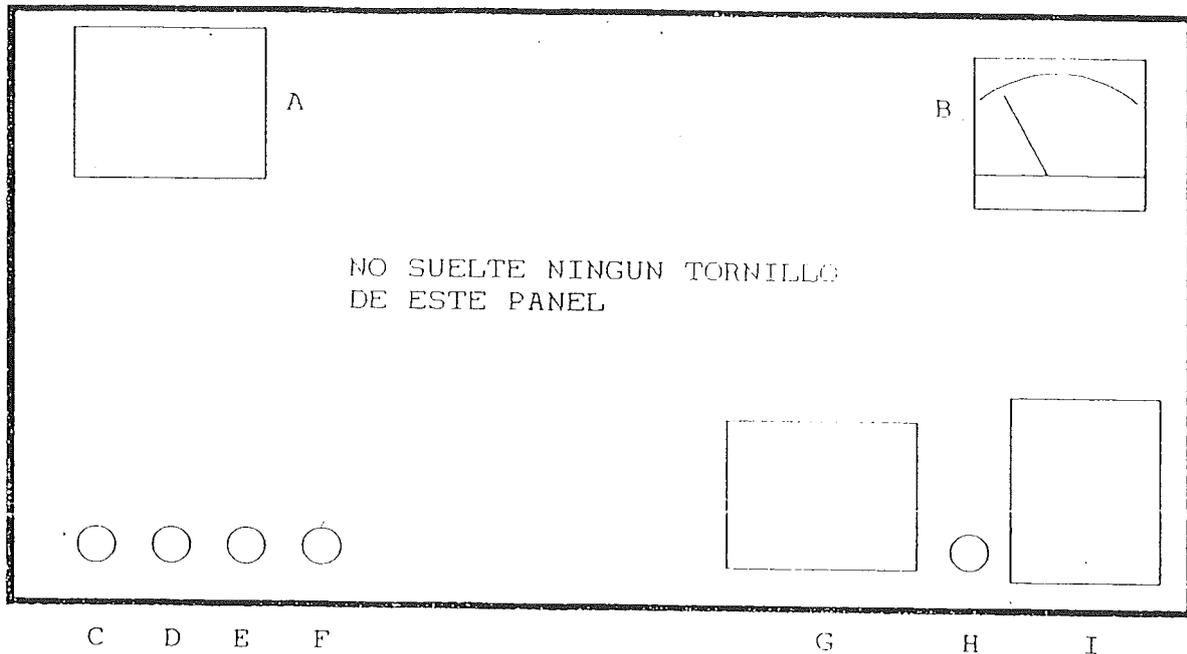
Claves:

F1 & F2 = 20A HRC  
 F3 & F4 = 15A fusión rápida  
 F5 & F6 = 5A fusión rápida  
 F7 = 5A fusión rápida  
 F8 = 1A fusión lenta  
 Fusible principal= 13A

TF = Transformador  
 F = ventilador (si se adapta)  
 BCB= tabla de circuito base  
 SCB= tabla de cond. de señales  
 DM = Módulo directriz  
 LC = contacto de líneas  
 MF = filtro principal  
 VM = Voltmetro  
 ES = Enchufe del excitador

Fig. 1.

PANEL POSTERIOR DE LA CONSOLA VCM905



CLAVES:

- A. Datos de identificación
- B. Voltímetro de entrada principal (220/240 V)
- C. Encendido Impresora
- D. Señal Impresora
- E. Acelerómetro (entrada de señal)
- F. Interruptor para el medidor de Hz/g
- G. Placa de recomendaciones
- H. Cable de entrada principal
- I. Enchufe del excitador

NOTA:

1. Suministro de 240V - utilice enchufes protegidos RCD.
2. Solamente está permitido a personal eléctrico calificado quitar las cubiertas. Abrir la consola sólo cuando la unidad lleve un mínimo de 5 minutos desconectada de la red principal - peligro de descarga de 700 VOLT
3. Si se pierde algún tornillo de las cubiertas, comuníquelo inmediatamente al supervisor.

## PROCEDIMIENTO DE TRABAJO PARA LOS EXCITADORES

Lea conjuntamente con la fig. 1.

Engrasado (& acuñado si fuera necesario).

1. Desconecte el excitador del suministrador de electricidad.
2. Quite las caperuzas finales (4).
3. Chequee el espacio de flote final del ensamblaje del rotor, elevando este contra el bloque en ángulo (ver fig. 2) ó use medidores de cuadrantes.
4. Si el espacio es mayor de 0.010" (0.25 mm) sería recomendable reducirlo entre 0.005 y 0.010" (0.13 a 0.25mm). Esto reduce ruidos y desgaste del rodamiento. Antes del desarme fijese en las posiciones de ensamblaje presentes (fig. 3).
5. El espaciador (accesorio 0.1) es un tornillo (cuña) que se puede descortezar y que se ajusta para reducir el espacio de flote. Este tornillo se coloca detrás del cabezal del canal (carrera) interior del rodamiento (use guantes para proteger las manos). - pero que final se ajusta es importante. Esto se determina moviendo el excitador con los tapones finales quitados y anotando la oscilación del movimiento final. Se notará que despues de un periodo inicial de fluctuación a velocidades bajas el ensamblaje rotor/carga flota y se queda permanentemente en una dirección. Si por ejemplo se queda hacia la derecha, entonces el espaciador ha de ser colocado detrás del cabezal de la parte izquierda de la carrera interior del rodamiento. (ver fig. 4a y b).  
\*Alternativamente elabore un nuevo accesorio espaciador 126 y redúzcalo para conseguir el espacio correcto.

NOTA: Hay una rebaba en el diámetro del tornillo espaciador, la cual ha de ser quitada o colocada hacia afuera para que se acomode al radio del diámetro del canal interior del rodamiento.

6. Para engrasar los rodamientos y/o encajar espaciadores:

NOTA: Trabaje en área limpia. Asegúrese que ninguna de las caras del cuerpo, espaciador, pesos, cojinetes de rodamiento, etc presenten impurezas o polvo, puesto que esto podría causar errores en el montaje.

- a) Marque el cuerpo/cojinete de rodamiento de tal forma que el reensamblaje pueda ser llevado a cabo como el original y aparte el motor. (ver fig. 3).
- b) Quite las cuatro tuercas de ajuste de cada extremo del cojinete de rodamiento (accesorio 104).
- c) Aparte los pernos de ajuste (acces. 5) de ambos extremos usando una buena llave inglesa - quitando primero un extremo y luego el otro - quite los pesos (acces. 8 y 9) del final apartado teniendo cuidado de no perder el rodillo de posición (acces. 11) del peso interior. Evite que la barra (eje) gire poniendo una llave inglesa a lo largo del diámetro de la misma.
- d) Ahora ya pueden ser separados todos los accesorios. Deje el ensamblaje del cojinete de rodamiento (acces. 101, 102, 103 y 104) intacto. Este puede ser limpiado con un agente limpiador de rodamientos adecuado - por ejemplo el limpiador de rodamientos Kluber (ó equivalente) ó triclorotrifluoretano (sustancia inflamable - área bien ventilada - no use luces descubiertas). Primero aparte la grasa vieja excedente con un trapo que no raspe, y despues quite el resto de grasa sumergiendo el rodamiento en el limpiador y agitándolo/rotándolo. Agite y seque el limpiador restante con un trapo mientras gira los rodillos. Póngalo a secar pero no lo caliente por encima de 40°C. Una vez que se haya evaporado por completo el limpiador de todas las partes del rodamiento se puede comenzar con el engrasado.

Rodamientos correctos. HD 12-300KF ó grasa para rodamientos de alta temperatura para excitadores de calidad equivalente. Kluber Isoflex LDS-18 también es aceptable.

NOTA: Los rodamientos no han de ser envueltos en grasa, más bien untados, para asegurar que cada rodillo es rotado y cubierto. También los o/d de los espaciadores (58 & 66) a ambos lados del rodamiento son cubiertos.

## 7. Reensamblaje

Asegúrese de que todas las superficies estén limpias y libres de pintura vieja, rebabas, etc y limpie el diámetro rodamiento del rotor y el diámetro del canal interior del rodamiento con limpiador de soportes y séquelos.

a) Coloque el espaciador laminado (acces. 01), rebajado hasta la anchura correcta con la rebaba quitada ó colocada hacia afuera (ver fig. 2 arriba)

b) Rejunte el canal interior del rodamiento con unas gotas de loctite en el diámetro - también sobre el cojinete de rodamiento para la colocación del cuerpo.

c) Junte todos los demás accesorios como se muestra en la fig. 1, con los pesos puestos idénticamente en cada extremo. Vuelva a asegurarse de que todas las superficies que componen la dimensión axial están limpias y libres de rebabas y pintura.

d) Apriete los pernos finales del mandril normalmente; después golpee el montaje contra el extremo de una tarima de madera o golpee cada extremo con un mazo de plástico, reapretando después los pernos finales y las cargas de choque mediante un golpe de martillo metálico. Hágalo sin temor y no emplee nunca una llave inglesa.

## 8. Compruebe el funcionamiento final

Repita la operación 3 para ver si el espacio muerto resultante está dentro de los límites.

NOTA: El reensamblaje hasta este punto necesita ser realizado lo más rápidamente posible de tal forma que en el caso de que no funcionara, el desmonte no se viera impedido por las gotas de loctite.

o Si todo ha ido bien, vuelva a colocar las caperuzas de plástico, tuercas y arandelas tal y como se muestra.

10. Conecte el excitador, y comience (asegúrese que el motor está rotando). Funcione a un máx. de 2 amperios durante 10 minutos, entonces aumente la velocidad hasta que registre 4 amperios y deje de acelerar hasta que baje hasta 2 amperios. Continúe haciendo esto hasta que la velocidad tope es alcanzada y el amperaje ha bajado a 2 amperios para un 120/120 (HT220) ó 3 amperios para un 140/60 (HT110). Apague y deje el excitador en su posición hasta que se enfríe.

11. Después de eso el motor puede ser usado como siempre.

## Ajustando masas excéntricas

Quite las caperuzas finales y suelte los tornillos que sujetan las masas a los extremos de los ejes. Modifique la posición de las masas en igual cantidad en cada extremo, manteniéndolas en línea en cada extremo del excitador. Apriete, tan fuerte como pueda, sujetando con los tornillos los pesos, coloque las caperuzas, tuercas y arandelas y apriete sin miedo. El excitador ya está preparado para uso.

DIAGRAMAS DE AYUDA  
 ENGRASADO DE RODAMIENTOS &  
 COLOCACION DEL ESPACIADOR

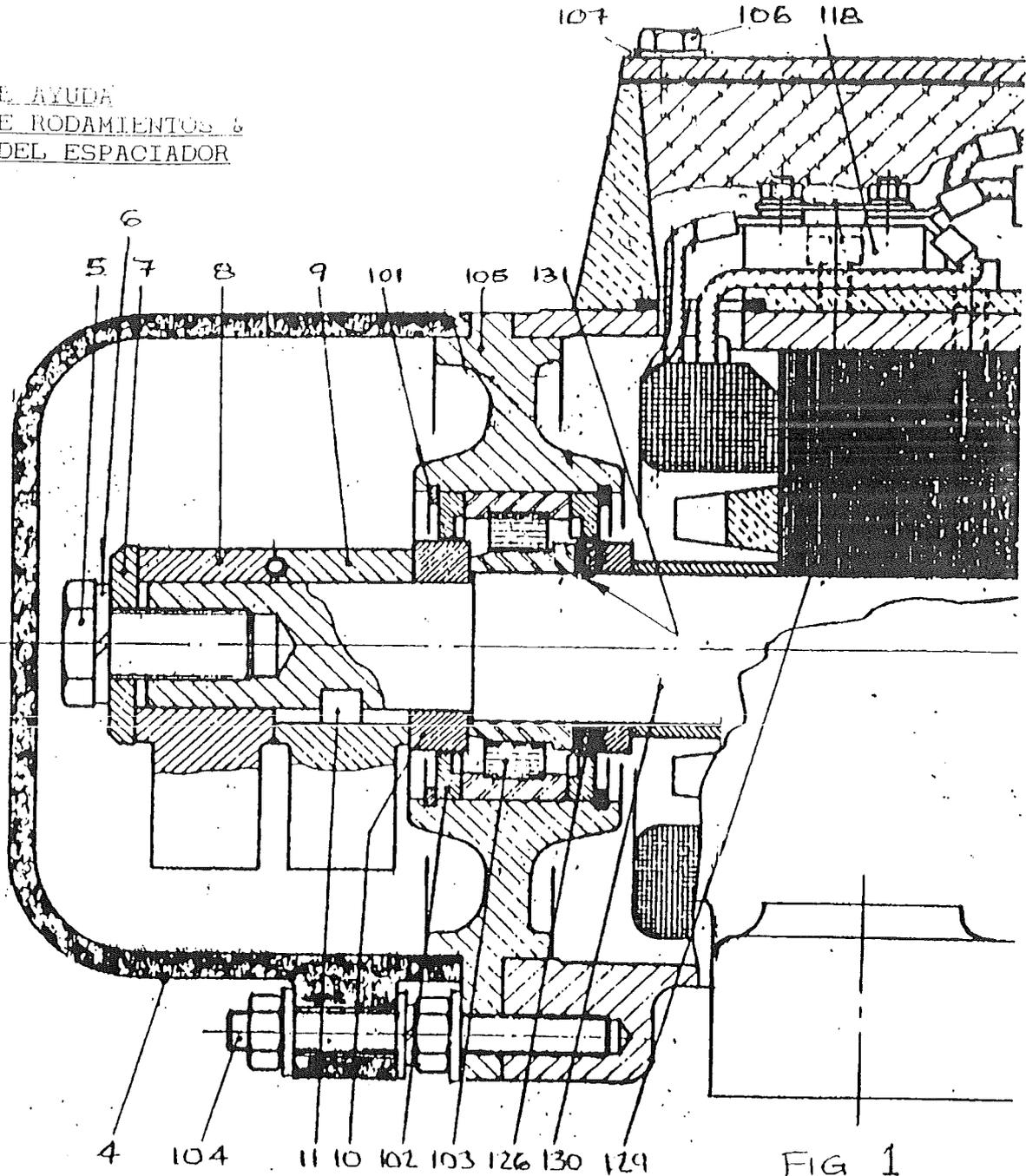


FIG 1

Mide el espacio muerto  
 con calibradores o  
 indicador de cuadrante

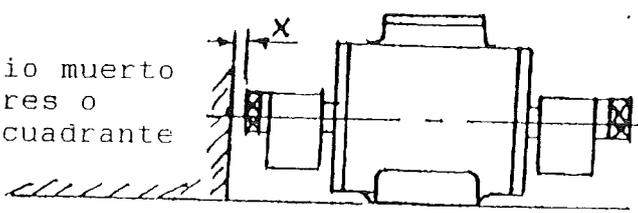


Fig. 2.

Calculando anchura del tornillo

Empuje el montaje  
 hasta el tope y  
 retire para dejar  
 espacio X

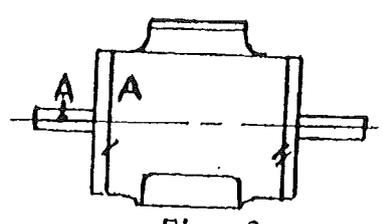


Fig. 3.

Montaje del cuerpo  
 excitador

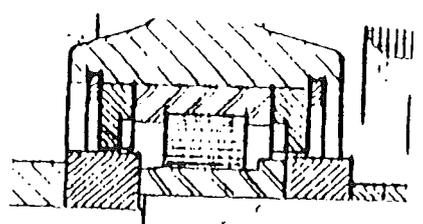


Fig. 4a.

Espacio sin tornillo

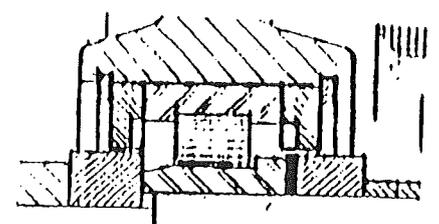
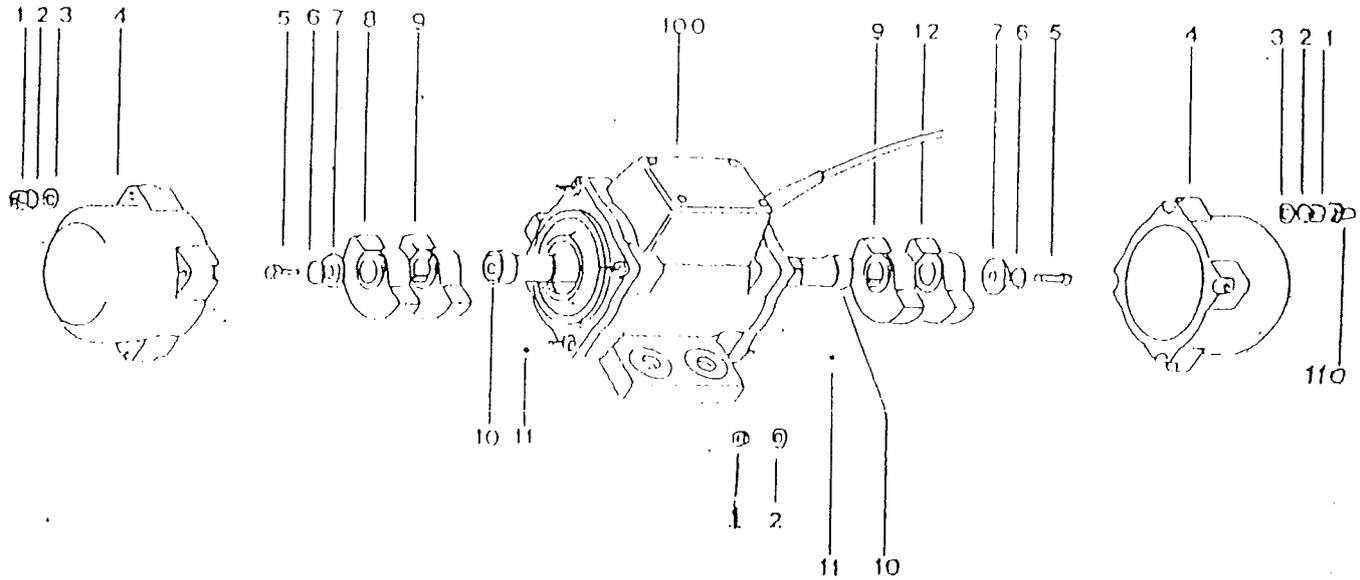


Fig. 4b.

Espacio reducido

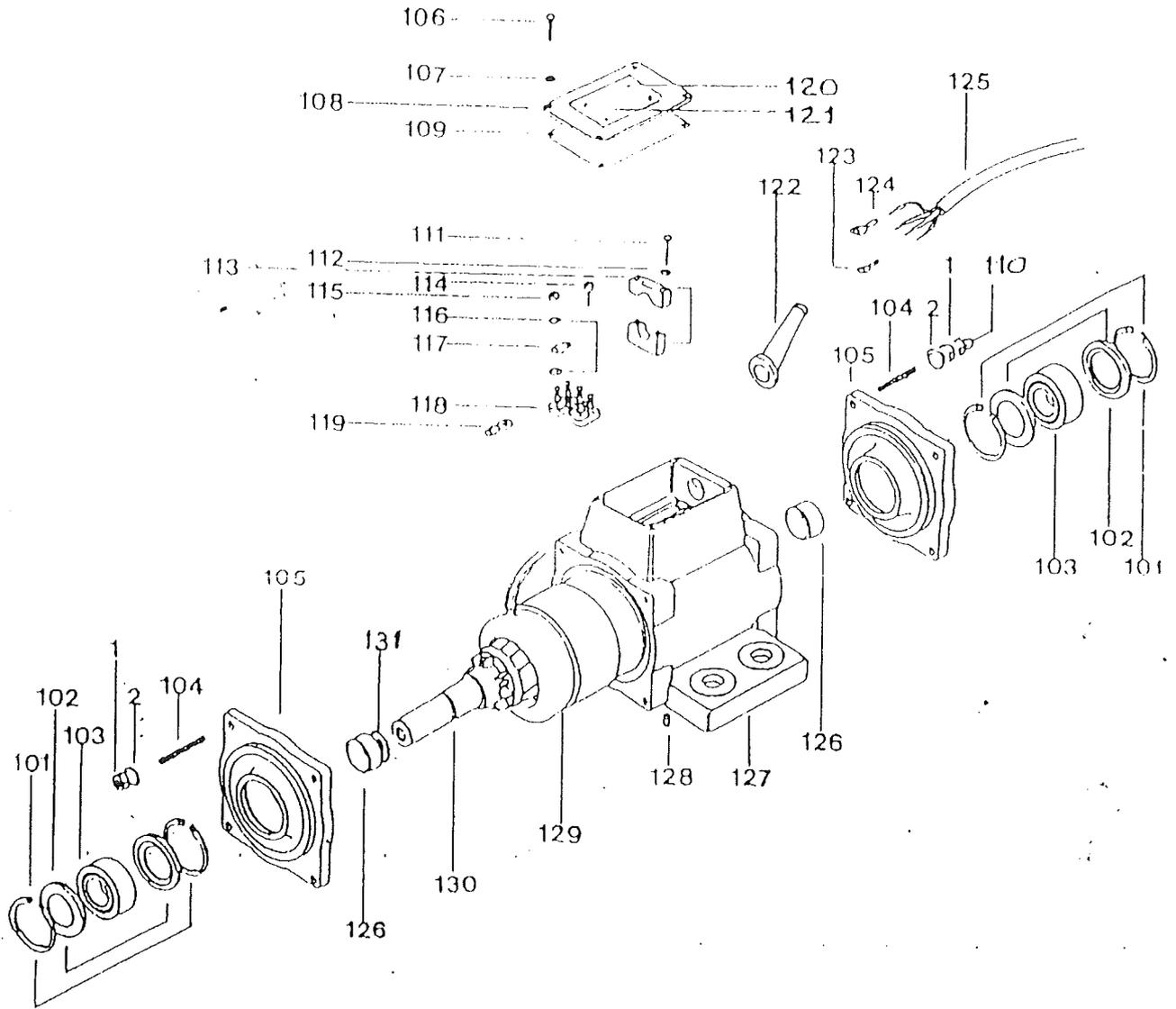
Fig. 1

DETALLES DEL EXCITADOR - Hoja 1 de 2



<u>Acces. N°</u>	<u>Descripción</u>	<u>Acces. N</u>	<u>Descripción</u>
1	Tuerca	8	Masa móvil A
2	Arandela	9	Masa fija
3	Arandela	10	Casquillo B
4	Caperuza	11	Pitón
5	Tornillo	12	Masa móvil B
6	Arandela	100	U n i d a d excitadora
7	Arandela	110	Tuerca plástica

DETALLES DEL EXCITADOR - Hoja 2 de 2



<u>Acces. N°</u>	<u>Descripción</u>	<u>Acces. N</u>	<u>Descripción</u>
100	Conjunto motor	116	Arandela
101	Anillo elástico	117	Puente
102	Retén	118	Placa conexión
103	Rodamiento	119	Terminal
104	Espárrago	120	Remache
105	Plato soporte	121	Placa caract.
106	Tornillo	122	Recubrimiento
107	Arandela	123	Terminal
108	Tapa	124	Terminal
109	Junta tapa	125	Cable
110	Taco goma	126	Casquillo A
111	Tornillo	127	Cuerpo
112	Arandela	128	Pitón roscado
113	Brida	129	Estator
114	Tornillo	130	Rotor
115	Tuerca	131	Tornillo